

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**Université Mouloud MAMMERY de TIZI-OUZOU**

**Faculté de Génie Electrique et d'Informatique**

**Département d'Electrotechnique**



# **MEMOIRE**

**De fin d'études**

**En vue de l'obtention du Diplôme d'ingénieur d'état en Electrotechnique**

**Option : Machines Electriques**

***Thème :***

***Etude et réalisation d'un générateur  
d'ondes de choc***

**Dirigé par :**

**M<sup>r</sup>: M.A.HANDALA**

**Réalisé par :**

**M<sup>elle</sup> : S. AIT GHERBI**

**M<sup>r</sup>: C. BELKESSA**

**Promotion 2012/2013**

## ***REMERCIEMENTS***

Au terme de ce travail, nous tenons à remercier notre promoteur **M.A.HANDALA**, pour la confiance qu'il nous a accordée en acceptant de nous encadrer, et qui est avec ses conseils précieux et son aide, nous a dirigés durant l'élaboration de ce mémoire.

Nous tenons aussi à remercier Monsieur **H.HOUASSINE** pour son aide, ainsi **A.BADJI** et **H.AKHMOUM** les étudiants de 5<sup>eme</sup> année master 2 qui ont contribué dans ce travail.

Nous remercions aussi toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Nos remerciements anticipés vont aussi membre du jury qui nous feront l'honneur de juger ce travail.

**S.AIT GHERBI**

**C.BELKESSA**

# *DÉDICACES*

## *JE DÉDIE CE TRAVAIL À :*

- Mes chers parents
- Mes sœurs
- Mes frères
- Tout(es) mes amis(es)

***SALIHA***

## *JE DÉDIE CE TRAVAIL À :*

- Ma **mère**, qui sans elle je ne saurais jamais arriver à ce stade.
- Ma grande mère **FATIMA**
- Mes tantes **TASSADIT, DALILA, et CHERIFA**
- Mes sœurs **NOURA, et LOUIZ**
- Mes frères **Ahmed, M<sup>ed</sup> SAID, et KHALED**
- Tout(es) mes amis(es), en particulier **I.YKEN et C.HOUASSINE**

***CHERIF***

# ***SOMMAIRE***

<b>Introduction générale:</b> .....	1
-------------------------------------	---

## **Chapitre I : Généralités**

I. Introduction :.....	4
II. Surtensions :.....	4
II.1.Définitions : .....	4
II.2.Origines des surtensions :.....	4
II.2.1.Les surtension temporaires :.....	5
II.2.2.Les surtensions de manœuvre :.....	5
II.2.3.Les surtensions de foudre :.....	7
II.2.3.1.Définition d'un coup de foudre : .....	7
II.2.3.2.Types de coup de foudre :.....	8
II.2.3.2.1.Le coup de foudre direct :.....	8
II.2.3.2.2.Le coup de foudre indirect :.....	9
II.2.3.3.Caractérisation de l'onde de foudre :.....	9
II.2.3.3.1.Courant de la foudre : .....	10
II.2.3.3.2.Les surtensions créés par les coups de foudre :.....	11
II.2.4.Surtensions externes dues aux explosions nucléaires: .....	12
II.3.But de l'étude des surtensions :.....	12
III. Essais en laboratoire de haute tension :.....	12
III.1.Les essais à haute tension alternative à fréquences industrielles à 50 ou 60 Hz : .....	12

# ***SOMMAIRE***

III.2.Les essais sous HT continue : .....	13
III.3.Les essais spéciaux sous HT et haute fréquence :.....	13
III.4.Les essais de choc : .....	13
IV. Equipement de laboratoire à haute tension : .....	15
IV.1.Appareillage de mesure :.....	16
IV.2.Générateurs de haute tension : .....	16
IV.2.1.Générateurs de tension alternative :.....	16
IV.2.1.1.Transformateur élévateur :.....	16
IV.2.1.2.Circuit résonnant :.....	17
IV.2.1.2.1. Résonance série :.....	17
IV.2.1.2.2.Résonance parallèle : .....	18
IV.2.2.Générateurs de tension continue :.....	19
IV.2.2.1.Redresseur de tension alternative : .....	19
IV.2.2.1.1.Redresseur à simple alternance :.....	19
IV.2.2.1.2.Redresseur double alternance : .....	19
IV.2.2.1.3.Doubleur de tension : .....	20
IV.2.2.1.4.Redresseur en cascade : .....	20
IV.2.2.2.Multiplieur de tension : .....	21
IV.2.2.3.Générateur électrostatique: .....	21
IV.2.3.Générateurs de tensions de choc :.....	22
IV.2.3.1. Définition de choc :.....	22
IV.2.3.2.Générateur de choc à un étage :.....	24
IV.2.3.3.Générateur de choc à plusieurs étages :.....	24

# ***SOMMAIRE***

IV.2.3.4.Générateur de Ruhmkroff : .....	25
IV.2.3.5.Générateur de Tesla : .....	26
V. Conclusion : .....	26

## **Chapitre II : Eléments de construction du générateur d'ondes de choc**

I. Introduction : .....	28
II. Eléments de construction pour circuits haute tension : .....	28
II.1.Resistances a haute tension : .....	28
II.1.1.Principe de construction : .....	28
II.1.2. Utilisation des résistances à HT Haefely : .....	29
II.1.3.Propriétés de résistances a HT de Haefely : .....	30
II.1.4.Différents types de résistances à HT : .....	30
II.1.5.Choix d'un type de résistance à HT : .....	32
II.1.6. Désignations des types de résistances a HT : .....	32
II.1.7. Association de résistances : .....	33
II.1.7.1. En parallèle : .....	33
II.1.7.2. En série : .....	33
II.1.8. Mesure de tension de choc par diviseur de tension résistif : .....	33
II.2. Capacités haute tension : .....	34
II.2.1.Définitions : .....	34
II.2.2.Principe de construction: .....	35
II.2.3.Calcul de la capacité des condensateurs de configuration courante : ..	38

# ***SOMMAIRE***

II.2.3.1.Le condensateur plan :.....	38
II.2.3.2.Le condensateur sphérique :.....	39
II.2.3.3.Le condensateur cylindrique :.....	40
II.2.4. Calcule de la capacité de groupement : .....	42
II.2.4.1.Groupement en parallèle :.....	42
II.2.4.1.Groupement en série :.....	43
II.2.5.mesure de tension de choc par diviseur de tension capacitif : .....	44
II.3.Eclateurs : .....	45
II.3.1.Introduction : .....	45
II.3.2.Fonctionnement : .....	45
II.3.3.Différentes types d'électrodes : .....	45
II.3.3.1.Plaques parallèles dans l'air : .....	46
II.3.3.2.Sphère vis-à-vis d'un plan :.....	46
II.3.3.3.Sphères identiques vis-à-vis : .....	47
II.3.3.4.Cylindre parallèle à un plan :.....	47
II.3.3.5.Cylindre concentriques :.....	48
II.3.3.6.Cylindres parallèles : .....	49
II.3.3.7.Cylindres croisés : .....	49
II.3.3.8.Sphères concentriques : .....	50
II.3.4.Eclateur à sphère :.....	50
II.3.4.1.Introduction : .....	50
II.3.4.2.Principe de construction : .....	51
II.3.4.3.Utilisation de l'éclateur : .....	52

# ***SOMMAIRE***

II.3.4.4.Mesure de tension de choc par éclateur : .....	52
II.3.4.5.Principe de fonctionnement : .....	53
III. Conclusion : .....	54

## **Chapitre III : Principe de fonctionnement du générateur d'ondes de choc**

I. Introduction : .....	56
II. Les circuits générateurs de puissances pulsées : .....	56
III. Principe général de la commutation de puissance:.....	57
IV. Tenue diélectrique de l'air : .....	58
IV.1. L'avalanche électronique : .....	58
IV.2. Loi de Paschen : .....	59
IV.3. Le streamer : .....	61
IV.4. Notion de volume critique : .....	62
IV.5.L'élection germe : .....	64
IV.5.1. Le détachement à partir d'ions négatifs présents dans le gaz .....	64
IV.5.2. La production par émission cathodique : .....	64
V. Générateurs des ondes de choc : .....	64
V.1. Onde de choc : .....	64
V.2.Différentes méthodes utilisées pour la génération des ondes de choc : ...	65
V.2.1. Milieu solide : .....	65
V.2.2. Milieu liquide : .....	65
V.2.3. Milieu gazeux : .....	65

# ***SOMMAIRE***

V.2.4. Décharge électrique entre deux électrodes :.....	66
V.3. Propagation de la décharge électrique :.....	66
V.4. Schéma de base pour génération des tensions de choc : .....	67
V.5. Le générateur de Marx : .....	68
V.5.1. Introduction : .....	68
V.5.2. Principe de fonctionnement :.....	69
V.5.3. Les générateurs délivrant de fortes énergies :.....	72
V.5.4. Les générateurs de Marx délivrant de moyennes ou faibles énergies :.	72
V.5.5. Equation de la forme d'onde : .....	73
V.5.5.1. Domaine de Laplace :.....	73
V.5.5.2. Domaine de temps :.....	75
V.5.6. Facteur de proportionnalité : .....	76
V.5.7. Rendement d'un générateur d'onde de choc :.....	76
V.5.8. Bilan énergétique et charge disponible : .....	77
V.5.9. La commutation des éclateurs :.....	78
VI. conclusion :.....	79

## **Chapitre IV : Simulation et réalisation pratique**

I. Introduction :.....	81
II. Simulation du schéma de base :.....	81
II.1. Calcul du temps de queue :.....	82

# ***SOMMAIRE***

II-2- Calcul du temps de front :.....	82
I-3- Mise en évidence de la variation de la durée de la queue :.....	82
II-4- Mise en évidence de la variation du front :.....	91
II-5- Discussion et interprétation des résultats : .....	99
II-6- Conclusion :.....	99
III- Réalisation pratique :.....	100
III-1- Introduction :.....	100
III-2- Le circuit réalisé :.....	100
III-3- Fonctionnement :.....	101
III-4- Conclusion :.....	102
<b>Conclusion générale</b> :.....	<b>104</b>
<b>Bibliographie.</b>	

A decorative border resembling a scroll, with a central rectangular frame. The scroll is unrolled at the top and bottom, with the top edge curving upwards and the bottom edge curving downwards. The scroll is outlined in black, and the unrolled sections are shaded in light gray.

***INTRODUCTION***

***GÉNÉRALE***

Dans la technologie des isolants (des câbles, diélectriques des condensateurs...) ou des systèmes d'isolation (pylônes, isolateurs, éclateurs et parafoudres des lignes aériennes), les valeurs des champs électriques sont déterminantes pour la fiabilité et la durée de vie du matériel considéré.

Il résulte que la mesure ou le calcul le plus précis possible de la valeur du champ électrique ont une grande importance pratique dans le domaine des hautes tensions.

Aux contraintes dues aux champs électriques locaux (engendrés par ces hautes tensions) s'ajoutent celles dues à d'autres phénomènes ; naturel comme la foudre, techniques comme les surtensions de manœuvre, ou encore les surtensions dues aux explosions d'origine nucléaires (NEMP).

Malgré le progrès énorme des méthodes numériques de calcul des champs électriques et qui font appel notamment à l'ordinateur et qui permettent un dimensionnement plus précis du matériel électrique, le comportement de ce dernier soumis à des champs électriques importants reste pratiquement impossible à prévoir uniquement par les calculs.

Il est donc nécessaire d'effectuer des essais en vraie grandeur qui, combinés avec des calculs conduisent à une meilleure protection de ces équipements.

Donc pour pouvoir étudier tout ces phénomènes et les contraintes qu'ils engendrent, il faut recourir à leur simulation dans un laboratoire à haute tension. Dans cette simulation, on essaie de s'approcher au maximum des conditions de fonctionnement réelles des équipements (essais sous pollution, sous pluie et sous pression). Ces essais sont réalisables à l'aide de différents équipements ; ainsi on dispose dans un laboratoire à haute tension des différentes stations :

- Générateur de hautes tensions continues.
- Générateur de hautes tensions alternatives.
- Générateur de tension de choc.

Ce dernier représente une partie très importante dans un laboratoire à haute tension car il permet de générer des ondes (courants ou tensions) transitoires d'amplitude qui peut dépasser les 1000 kV et pendant des temps très courts.

Donc il est nécessaire une maîtrise et un dimensionnement bien précis pour garantir un bon service, aussi garantir les résultats des tests et donc apporter la preuve de sécurité et de la fiabilité des équipements testés.

Nous nous intéresserons dans notre travail à l'étude du générateur d'ondes de choc de tension, et à la réalisation d'un circuit générateur de ces ondes. Pour faire cette étude, nous avons divisé notre travail en deux parties : partie théorique, et partie simulation et réalisation.

Le premier chapitre est consacré aux généralités on a donné des définitions et des rappels sur les différents phénomènes qui se manifestent en haute tension notamment les surtensions transitoires, temporaire, et leurs origines. Nous avons aussi donné un aperçu des différents appareils utilisés au laboratoire haute tension.

Dans le deuxième chapitre nous avons donné les différents procédés utilisés dans la technologie de construction des composants haute tension, et les méthodes utilisées pour la mesure des tensions de choc.

Nous avons consacré le troisième chapitre aux quelques rappels sur la structure générale des circuits générateurs de puissances pulsées et sur les décharges électriques dans les gaz. On a abordé aussi dans ce chapitre le principe de fonctionnement des générateurs d'ondes de choc, et nous avons décrit les différentes méthodes utilisées pour la génération des ondes de choc.

La deuxième partie est consacrée à la simulation et la réalisation pratique, où nous avons été contraints de recourir à la basse tension (faute de moyens) et réaliser un circuit de base illustrant le principe de fonctionnement de générateur d'ondes de choc et la méthode de mesure de ces dernières.

Enfin nous avons terminé notre travail avec une conclusion générale.

A decorative border resembling a scroll, with rounded corners and a vertical strip on the left side. The scroll is outlined in black, and the corners are filled with a light gray color.

***CHAPITRE I***

***GÉNÉRALITÉS***

## ***I-Introduction :***

Ce chapitre est consacré aux définitions et au rappel des buts de l'étude des différentes contraintes (surtensions) appliquées à un système électrique et simulées par les générateurs de choc dans les laboratoires à haute tension. Pour bien voir la place et l'importance qu'occupent ces générateurs dans les laboratoires à haute tensions, nous avons donné quelques rappels sur les essais à haute tension et les différents équipements utilisés [1].

## ***II-Surtensions :***

### ***II-1-Définitions :***

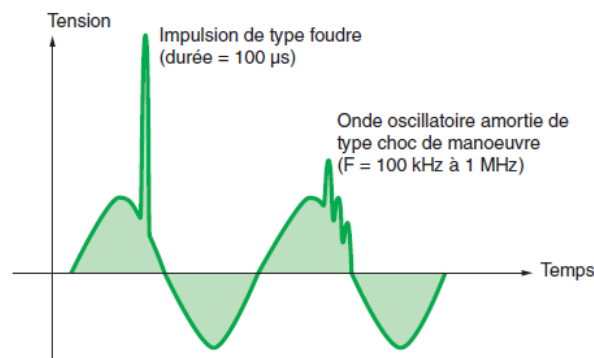
On qualifie de surtension toute tension fonction du temps qui dépasse la tension crête de régime permanent à sa tolérance maximale [2].

Une surtension est une impulsion ou une onde de tension qui se superpose à la tension nominale du réseau [3].

On distingue deux sortes de surtensions

**Transversales** apparaissant entre un conducteur et la terre ou entre deux conducteurs,

**Longitudinales** ou entre spires, correspondant à un accroissement exagéré de la différence de potentiel entre deux points voisins d'un même conducteur [4].



**Fig. I-1 : Exemple de surtensions**

### ***II.2-Origines des surtensions :***

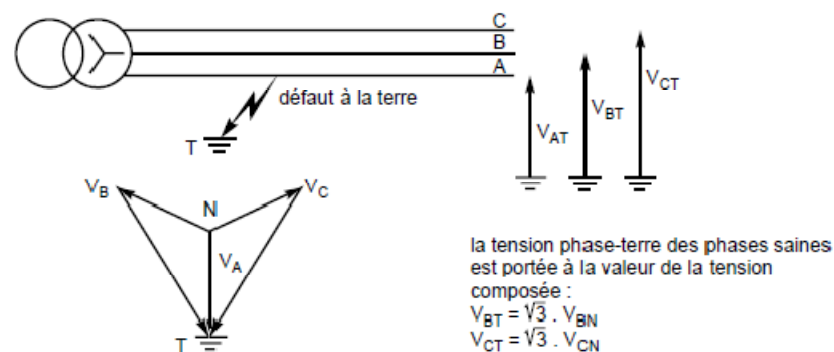
Les surtensions peuvent avoir deux origines :

- Une origine interne, liée à l'exploitation même des réseaux : ce sont les surtensions temporaires et les surtensions de manoeuvre,
- Une origine externe : ce sont les surtensions dues aux coups de foudre.

### II.2-1- Les surtensions temporaires :

Les surtensions temporaires sont les surtensions à fréquence industrielle qui résultent des changements brusques de configuration du réseau, qu'ils soient provoqués ou fortuits (par exemple déclenchement de charge active ou réactive, apparition d'un défaut à la terre, etc.), et dont la durée dépend de la rapidité de réponse des systèmes de protection et des régulateurs de vitesse des alternateurs. Celle-ci varie de quelques dixièmes à quelques secondes.

Quant aux niveaux qu'elles peuvent atteindre, ils dépendent de la configuration même du réseau sitôt après leur apparition et du point considéré dans le réseau. En un point donné, ces niveaux sont d'autant moins élevés que le réseau est puissant et maillé et que les mises à la terre sont nombreuses. On est toutefois limité dans cette voie par le double ceci de ne pas laisser croître trop les courants de défaut monophasé afin d'assurer les tenues thermiques et mécaniques des matériels et de réduire la gêne aux tiers, principalement due à la circulation du courant de défaut [5].



**Fig. I-2 : Surtension temporaire sur un réseau à neutre isolé de la terre, en présence d'un défaut d'isolement.**

### II.2-2- Les surtensions de manœuvre :

Tout changement brusque de configuration d'un réseau (fonctionnement de disjoncteur, apparition d'un défaut, etc.) engendre également une surtension transitoire rapide, dite surtension de manœuvre qui se propage sur ce réseau et la durée de front peut s'échelonner de quelques dizaines de microsecondes à quelques dizaines de millisecondes.

Les surtensions de manœuvre ont des amplitudes par rapport à la terre et des formes différentes selon le point du réseau considéré ; de plus elles sont très sensibles à la configuration du réseau et ont un caractère aléatoire, c'est-à-dire qu'une manœuvre déterminée en un point donné peut créer, selon le cas, des surtensions différentes.

Ces surtensions sont les plus fortes lors de l'ouverture des disjoncteurs sur charge réactive (coupure de ligne à vide, de transformateur à vide, de défaut), et lors de la fermeture ou de la refermeture d'une ligne.

Dans le cas de l'ouverture d'une ligne à vide en 225 et 400 kV – ou d'une charge capacitive en général – l'emploi de disjoncteurs sans réamorçage, comme le sont les disjoncteurs modernes à air comprimé et à  $SF_6$  satisfaisant aux normes NF C 64-115 et 64-116 est de nature à éviter les surtensions de coupure élevées qui apparaissent avec les anciens disjoncteurs à huile [5].

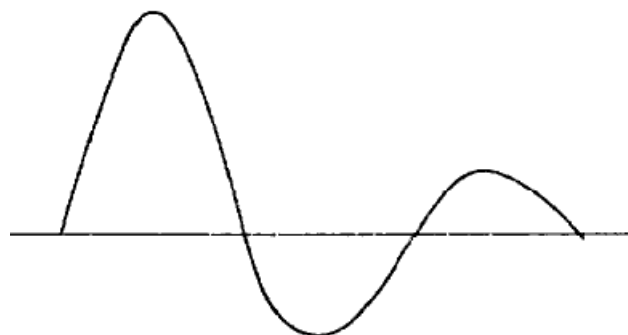
- *Quelques formes possibles de la surtension de manœuvre :*



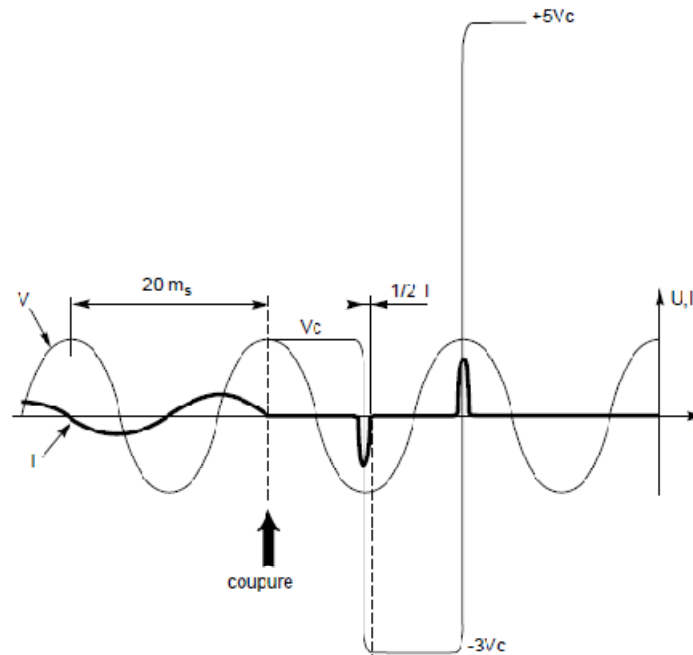
**Fig. I-3 : Enclenchement d'une ligne à vide**



**Fig. I-4 : Réamorçage après déclenchement d'une ligne à vide**



**Fig. I-5 : Oscillation de déclenchement amortie.**



**Fig. I-6 : Escalade de tension lors de la séparation d'un banc de condensateurs du réseau par un appareil à manœuvre.**

### ***II-2-3- Les surtensions de foudre (atmosphérique) :***

Les surtensions de foudre n'ont leur amplitude limitée que par l'amorçage d'éléments du réseau, le plus souvent d'éléments de ligne, ou par celui des dispositifs de protection qui y sont placés. Lorsqu'un coup de foudre atteint une ligne, il peut frapper un conducteur de phase, un pylône ou le câble de garde de la ligne lorsqu'il existe. S'il atteint un conducteur de phase et est de faible amplitude, aucun amorçage n'a lieu et l'onde de courant de foudre se propage dans les deux directions en provoquant une montée en tension égale au produit du demi-courant de foudre par l'impédance d'onde de la ligne ; s'il est de forte amplitude, il peut donner lieu à un amorçage direct entre une phase et la terre, créant alors une onde de tension coupée qui se propage dans les deux directions vers les postes les plus proches.

Il se peut également que le coup de foudre atteigne directement un support ou le câble de garde de la ligne lorsqu'il existe. Le courant de foudre s'écoule alors à la terre, mais en provoquant une élévation locale du potentiel de terre, donc de celui du support correspondant, d'autant plus grande que son intensité et l'impédance de terre sont élevées. Cette élévation de potentiel peut être suffisante pour créer un amorçage entre le support et une ou plusieurs phases, appelé communément amorçage en retour [5].

#### ***II-2-3-1- Définition d'un coup de foudre :***

Le coup de foudre est une décharge électrique se produisant dans un grand intervalle dont les « électrodes » sont d'une part un nuage orageux chargé et d'autre part la terre [7].

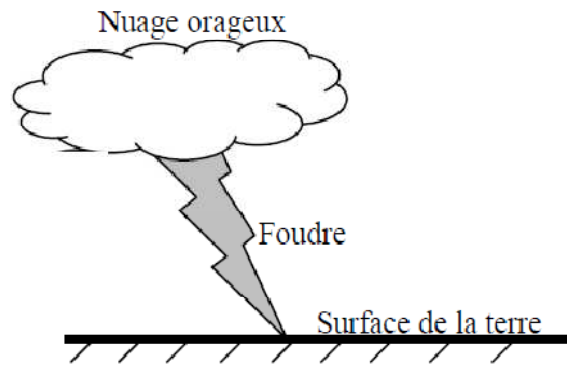


Fig. I-7: coup de foudre.

### II-2-3-2- Types de coup de foudre

Il existe deux types de coup de foudre:

#### II-2-3-2-1- Le coup de foudre direct :

Il se manifeste par l'injection dans la ligne, d'une onde de courant de plusieurs dizaines de kA. Cette onde de courant, qui peut faire fondre des conducteurs en se propageant de part et d'autre du point d'impact (cf. fig. I-8), provoque une augmentation de tension  $U$  donnée par la formule :

$$U = z_c \cdot i$$

Avec :

$i$  : le courant injecté

$z_c$  : L'impédance homopolaire caractéristique de la ligne (300 à 1000 ohms).

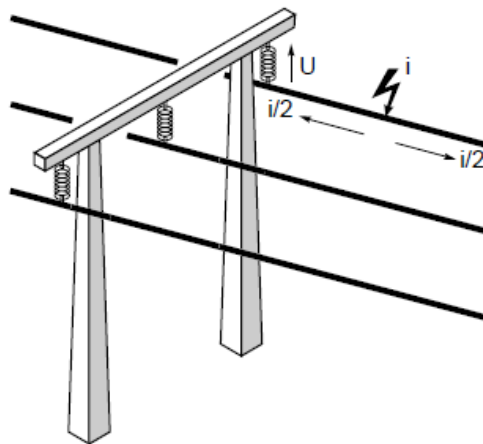


Fig. I-8: lors d'un coup de foudre directe

### II-2-3-2-2- Le coup de foudre indirect :

Lorsqu'il se produit sur un support, ou même simplement à proximité d'une ligne, des surtensions importantes sont générées dans le réseau. Ce deuxième cas, plus fréquent que le précédent, peut se révéler presque aussi dangereux.

- si la foudre tombe sur le pylône ou le câble de garde, l'écoulement du courant provoque l'augmentation du potentiel de la masse métallique par rapport à la terre (cf. fig. I-10). La surtension  $U$  correspondante peut atteindre plusieurs centaines de kV [6].

$$U = R \cdot \frac{i}{2} + \frac{L}{2} \cdot \frac{di}{dt}$$

Avec

$R$  : résistance en onde raide de la prise de terre

$L$  : l'inductance du pylône et/ou du conducteur de mise à la terre.

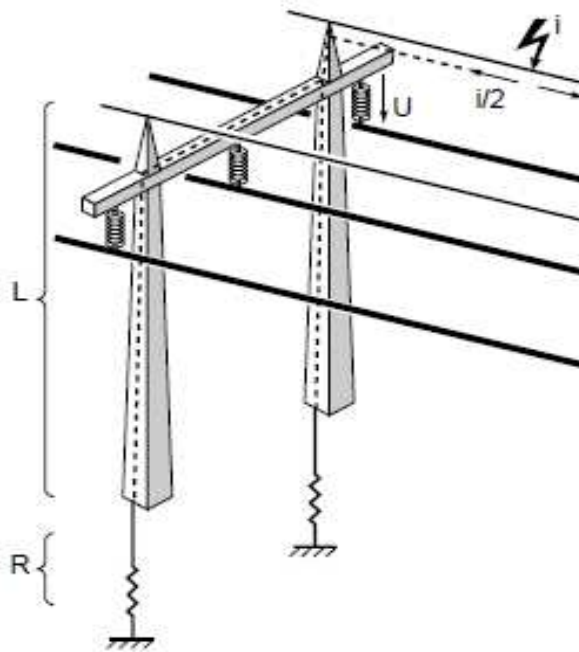


Fig. I-10: lorsque la foudre tombe sur le câble de garde.

### II-2-3-3- Caractérisation de l'onde de foudre.

L'analyse des phénomènes permet de définir les types d'ondes de courant et de tension de foudre [3].

### II-2-3-3-1- COURANT DE LA Foudre :

Le coup de foudre est équivalent à un générateur de courant. Le courant est en fait constitué par les charges superficielles du sol qui remontent le canal ionisé du traceur : on observe alors un fait fortement lumineux qui progresse du sol en direction du nuage, avec une vitesse estimée à  $10^8$  m/s. c'est « l'arc en retour » ou « return stroke » [7].

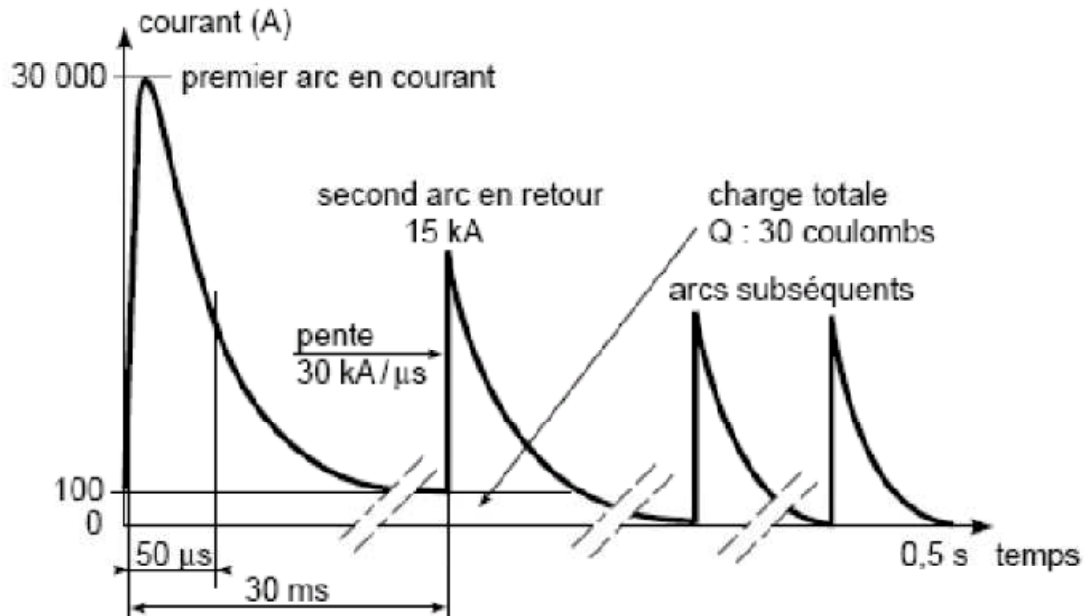


Fig. I-11 : forme du courant de la foudre.

Deux types d'onde de courant sont retenus par les normes CEI :

- onde 10/350 μs : pour caractériser les ondes de courants de *coup de foudre direct* (Fig. I-12),

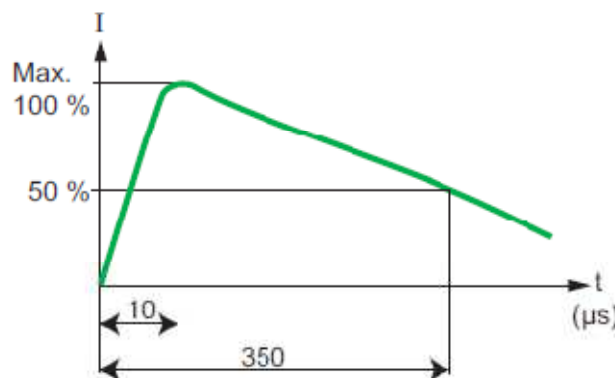


Fig. I-12 : Onde de courant 10/350 μs.

- onde 8/20 μs : pour caractériser les ondes de courants de *coup de foudre indirect* (Fig. I-13).

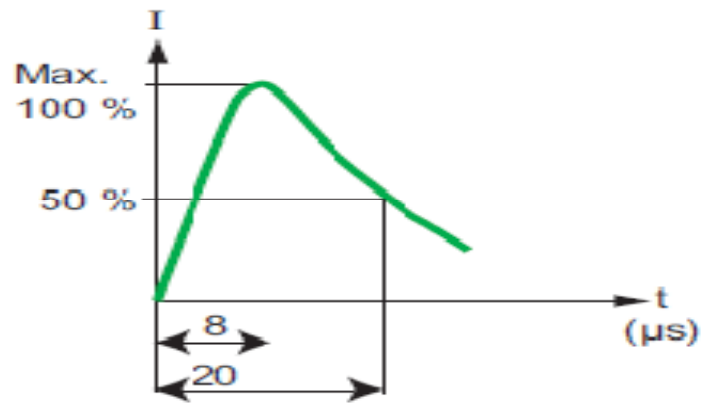


Fig. I-13- : Onde de courant 8/20  $\mu s$

Ces 2 types d'onde de courant de foudre sont utilisés pour définir les essais des parafoudres (norme CEI 61643-11) et l'immunité des équipements aux courants de foudre. La valeur crête de l'onde de courant caractérise l'intensité du coup de foudre.

#### II-2-3-3-2- Les surtensions créées par les coups de foudre :

Les surtensions créées par les coups de foudre sont caractérisées par une onde de tension 1,2/50  $\mu s$  (cf. Fig.I-14).

Ce type d'onde de tension est utilisé pour vérifier la tenue des équipements aux surtensions d'origine atmosphérique (tension de choc suivant CEI 61000-4-5) [3].

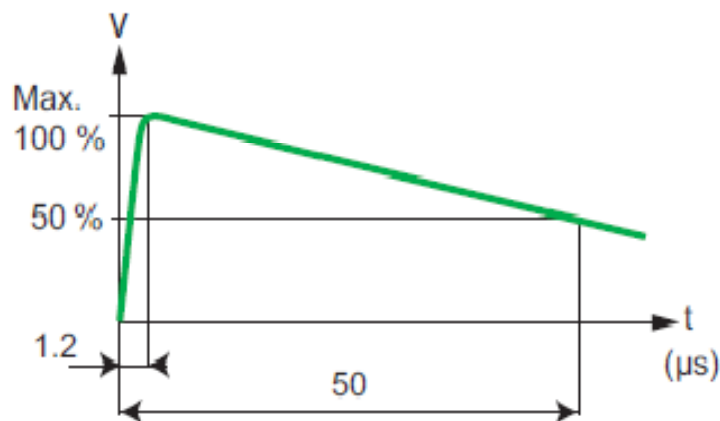


Fig. I-14 : Onde de tension 1,2/50  $\mu s$

En plus de ce type de surtension de foudre (atmosphérique) nous avons des **surtensions externes dues aux explosions nucléaires(NEMP)**.

### ***II-2-4-Surtensions externes dues aux explosions nucléaires (NEMP):***

L'explosion d'une bombe nucléaire déclenche divers phénomènes, dont l'émission des impulsions (chocs) électromagnétiques d'origine nucléaire NEMP (Nuclear Electromagnetic puls).

Une description des mécanismes de génération des perturbations NEMP a montré que la nature de perturbation qui résultent d'une explosion nucléaire dépend essentiellement de :

- La conception et du calibre de la bombe.
- L'altitude de l'explosion.
- L'orientation de champs magnétiques terrestres.
- La distance de l'observation.

Les différentes formes et les intensités des champs électriques et magnétiques perturbateurs peuvent alors prendre des valeurs extrêmement variées. Toutefois, il est généralement admis qu'une onde NEMP peut être représentée sous forme d'un choc dont le front est extrêmement raide.

Les composants électriques et magnétiques du choc NEMP induisent des surtensions transitoires dont les ordres de grandeur peuvent provoquer des perturbations de fonctionnement, voir même des destructions de composants.

### ***II-3- But de l'étude des surtensions :***

Le but de l'étude des surtensions est de permettre :

- La prévision des surtensions dans un système électrique (réseau haute tension, appareillage électrique, réseau de transmission de l'information) lors de son dimensionnement.
- L'analyse des surtensions dans un système électrique suite à des défauts d'isolement.

Connaissant les causes et le développement des surtensions et compte tenu de leur propagation sur les lignes, il est possible de connaître les surtensions réelles auxquelles sont soumis les matériels électriques. Afin d'assurer la fiabilité de ces matériels, des essais simulant les contraintes réelles sont effectués dans les laboratoires de haute tension au moyen des générateurs appropriés [1].

### ***III-Essais en laboratoire de 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 quatre catégories d'essais.

#### ***III-1- Les essais à haute tension alternative à 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.

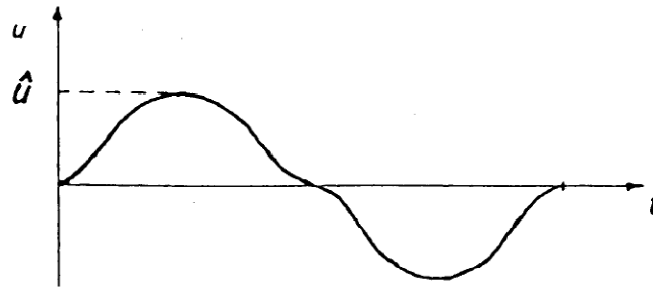


Fig. I-15 : Tension non sinusoïdale.

On utilise actuellement des systèmes résonants pour lesquels la tension est parfaitement sinusoïdale.

La tension d'essai de crête sera :  $\hat{U}_{essai} = \sqrt{2} U_{essai}$

$U_{essai}$  : tension d'essai en  $V_{eff}$

Le plus souvent la valeur de crête est mesurée à l'aide d'un dispositif de mesure de tension de crête.

### **III-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.

### **III-3- Les essais spéciaux sous HT et haute fréquence :**

On les utilise généralement pour les essais d'isolateurs, de transformateurs ou de vieillissement des câbles.

### **III-4- Les essais de choc :**

L'essai de choc consiste à appliquer une onde unidirectionnelle, en général de forme normalisée, à l'objet à essayer. Elle simule un coup de foudre tombant sur le réseau.

#### **Caractéristiques de l'onde normalisée**

#### **Essais de tenue au choc de foudre**

La CEI définit la **tension** de choc normalisée suivant la figure I-16

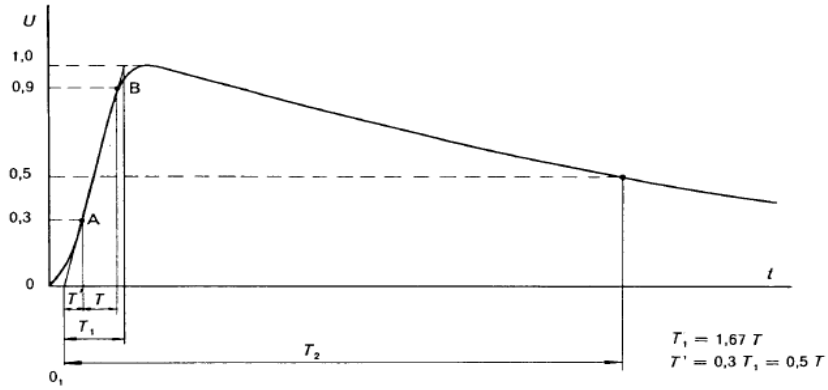


Fig. I-16 : essai de choc

Les valeurs et tolérance sont les suivantes :

Tension de crête :	tolérance	± 3 %
T1 :	1.2 μ s	± 30 %
T2 :	50 μ s	± 20 %

En pratique, on mesure T sur l'oscillographe et l'on calcule T1 = 1.67 T. Le point "01" est l'origine conventionnelle de l'onde. On peut également calculer la raideur "S" du front :

$$S = \frac{\text{Val de crête}}{T_1} \quad [\text{KV}/\mu\text{S}]$$

On réalise également des ondes de courant de choc pour l'essai des parafoudres; la forme d'onde est identique à la figure ci-dessus et les valeurs normalisées sont les suivantes :

Courant de crête :	tolérance	± 5 %
T1 :	4 ou 8 μ s	± 10 %
T2 :	10 ou 20 μ s	± 10 %

Les ondes ci-dessus simulent l'effet de la foudre. Pour simuler une onde de manœuvre, on utilise une onde 250/2500 μ s. Pour des essais de transformateurs et d'appareillage isolés au SF6, on utilise l'onde coupée, selon figure suivante;

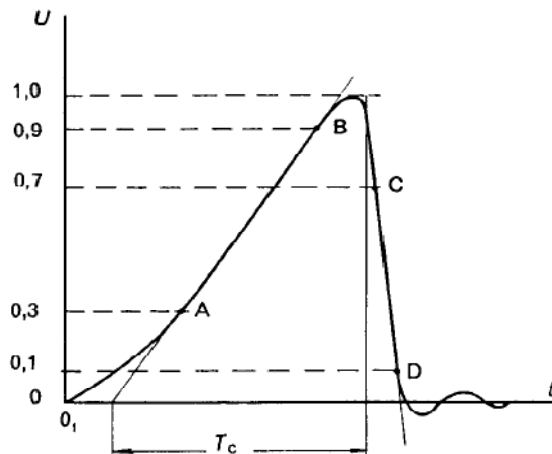
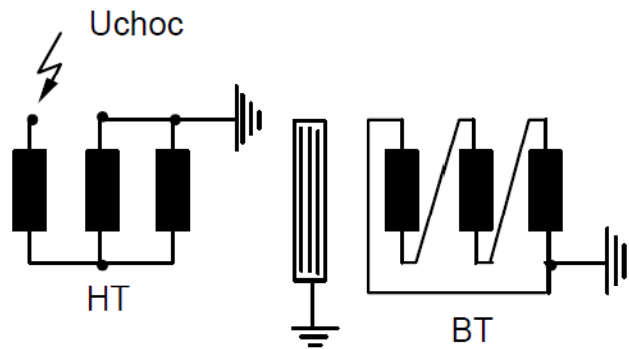


Fig. I-17 : onde coupée

Les  $dU/dt$  importants engendrent des contraintes diélectriques plus sévères.

- **Couplage pour essai de choc :**

- Exemple : essai d'un transformateur (voir aussi CEI 76)



**Fig. I-18: essai d'un transformateur**

Appareil bon ou mauvais, observer l'oscillogramme (cf. ci-dessous) :

Les cas suivants peuvent se présenter : [4].

Onde complète,  
pas de  
contournement,  
objet en ordre

Contournement à  
environ  $\hat{U}$

Contournement  
pendant le front  
d'onde

Contournement  
lorsque U décroît

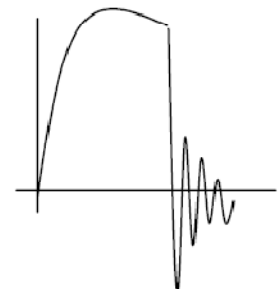
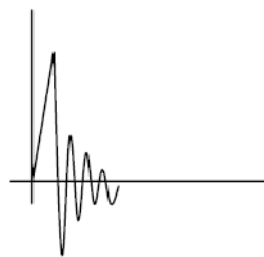
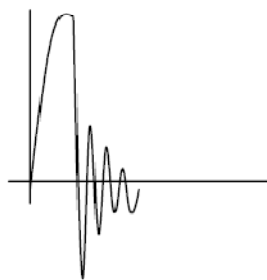


fig. I.18-1

| fig. I.18-2

| fig. I.18-3

| fig. I.18-4

#### **IV- Equipement de laboratoire à haute tension**

L'équipement de base d'un laboratoire à haute tension comprend :

- L'appareillage de mesure
- Les générateurs de haute tension

### **IV-1- Appareillage de mesure :**

Les principaux appareils de mesure en haute tension sont :

- L'électromètre
- L'éclateur à sphère
- Voltmètre électrostatique.
- Transformateur de mesure.
- Diviseur de tension.
- Diviseur de courant.
- Voltmètre de crête.
- Oscilloscope de choc [1].

### **IV-2- GENERATEURS DE HAUTE TENSION :**

Les générateurs de haute tension sont utilisés dans les laboratoires de recherche scientifique, ainsi dans les laboratoires d'essai, pour tester les équipements haute tension avant leurs utilisation (*isolateur*, câble, transformateur, appareil de coupure...); et par mesure de sécurité, les tensions d'essai utilisées sont bien entendu supérieures à la tension de service de l'équipement testé, et de nombreuses applications utilisant la haute tension (rayon X, effet couronne, laser...)

Il y a trois types de tensions conventionnelles :

- Tension alternative
- Tension continue
- Tension de choc

#### **IV-2-1- GENERATEURS DE TENSION ALTERNATIVE**

##### **IV-2-1-1- 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.

➤ **Exemple** : considérons un isolant de capacité C alimenté par une Haute Tension délivrée par un transformateur (Figure I-19).

$r_1 + j L_1 \omega$  : impédance de l'enroulement primaire du transformateur

$r_2 + j L_2 \omega$  : 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  $1/\omega C$ .

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

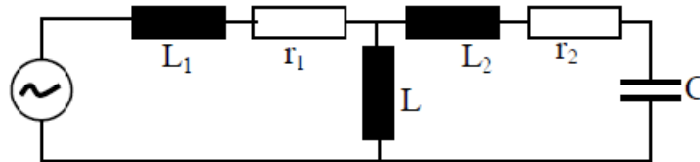


Fig. I-19 : circuit électrique équivalent du transformateur et de l'isolant testé

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.

**IV-2-1-2- 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.

Le phénomène de résonance est mis à profit pour produire de très hautes tensions. On distingue deux types de résonance [8].

**IV-2-1-2-1- Résonance série**

- **Schéma général :**

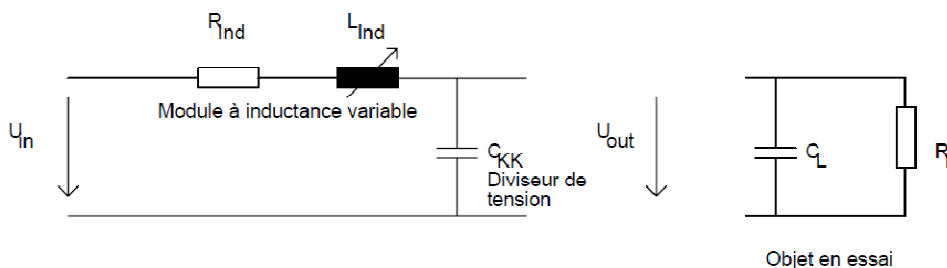


Fig. I-20: schéma de principe du circuit résonnant série

- *avantages et inconvénients :*

Ce générateur présente des avantages et des inconvénients :

- **Avantages:** - Modulaire très hautes tensions
  - Compact, léger
  - Faible consommation env. 1/50 de la puissance de sortie seulement
  - Tension d'essai filtrée
- **Inconvénients:** - Tension de sortie dépendant de l'état de résonance
  - Objets capacitifs uniquement
  - Tension d'excitation nécessaire

#### IV-2-1-2-2- Résonance parallèle

- *Schéma général :*

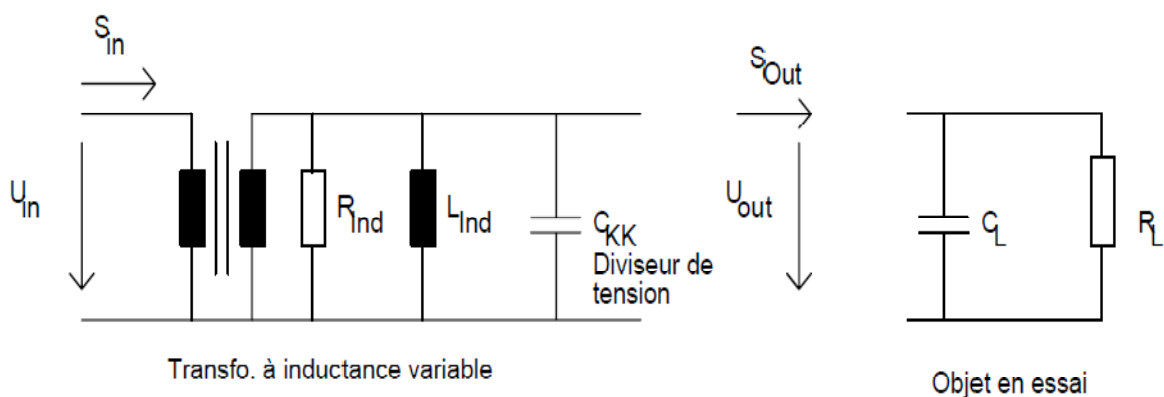


Fig. I-21: schéma de principe du circuit résonnant parallèle

- *avantages et inconvénients :*

Ce type de générateur présente des avantages et des inconvénients :

- **Avantages:** - Tension de sortie stable
  - Prises intermédiaires de tension
  - Raccordé à la tension du réseau
  - Pas de transformateur d'excitation nécessaire
- **Inconvénients:** - Tensions limitées (400 kV)
  - Système fixe [4].

### IV-2-2- 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 ou les essais de test d'équipement à charge capacitive sont très nombreux ; pour des raisons économiques on évite la tension alternative.

#### IV-2-2-1- Redresseur de tension alternative :

##### IV-2-2-1-1- 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.

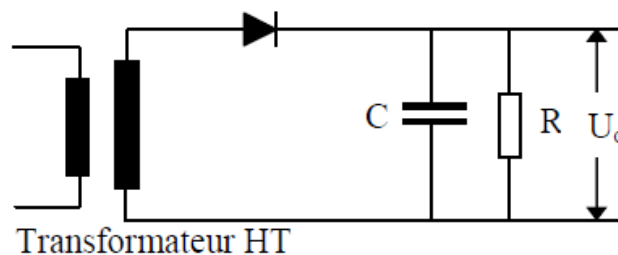


Fig. I-22 : redresseur à simple alternance en charge

##### IV-2-2-1-2- Redresseur double alternance :

Contrairement au redresseur à simple alternance, l'alternance négative est également redressée.

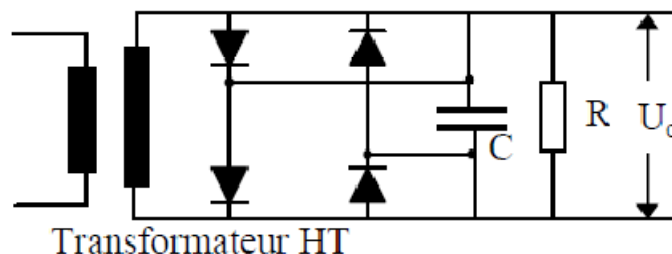
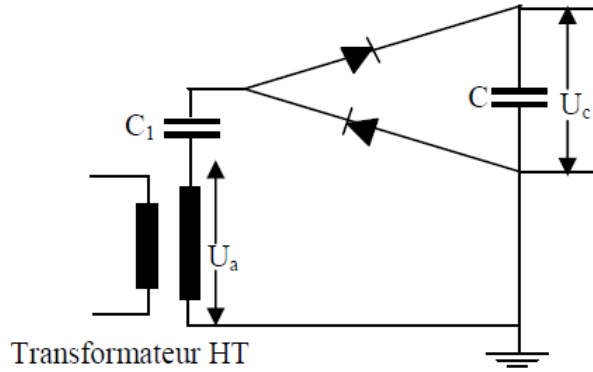


Fig. I-23 : Redresseur à double alternance en charge (pont de Graetz)

**IV-2-2-1-3- 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.



**Fig. I-24 : Doubleur de Schenkel**

**IV-2-2-1-4- Redresseur en cascade :**

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

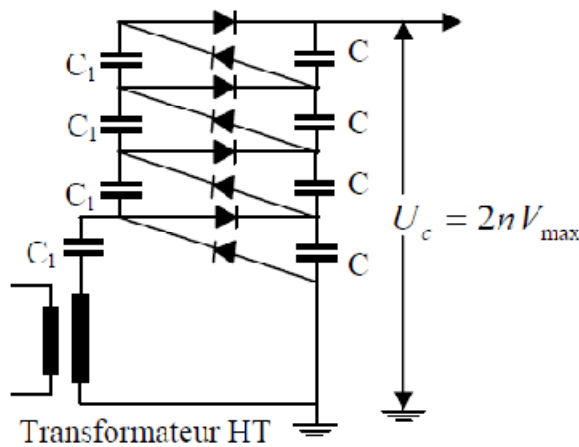
Comme chaque étage délivre une tension à vide égale à  $2V_{max}$ , la tension obtenue (à vide) est :

$$U_c = 2n V_{max}$$

Avec n : nombre d'étages.

En charge :

$$U_c = 2n V_{max} - \Delta U$$



**Fig. I-25 : Cascade de Greinacher ou de Cockcroft-walton à vide**

### IV-2-2-2- 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 :

$$U_c = n U_0$$

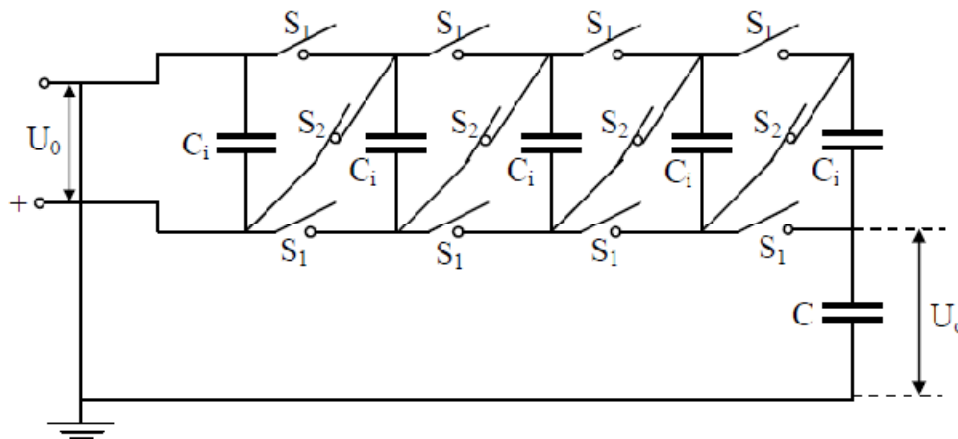


Fig. I-26 : multiplicateur de tension

### IV-2-2-3 Générateurs électrostatiques : (Van de Graff)

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

- **Principe de fonctionnement :**

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) ou 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 Graff n'est pas très utilisé car le courant délivré est faible (de l'ordre du PA), mais la tension de sortie peut atteindre jusqu'à une centaine de MV.

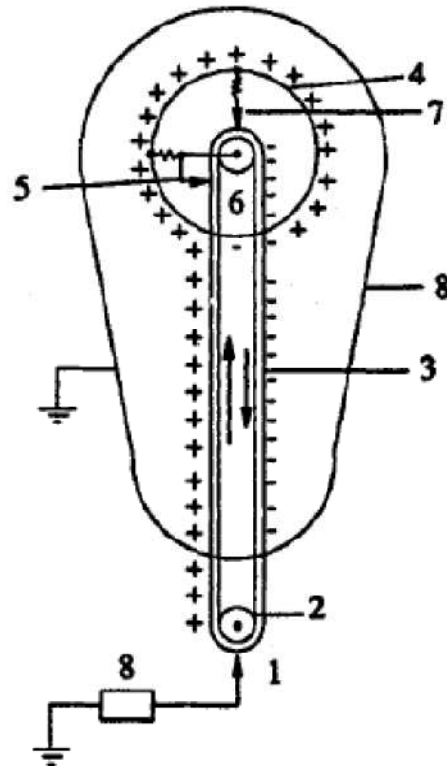


Fig. I-27 : Générateurs électrostatiques : (Van de Graff)

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 a la terre [8].

### IV-2-3- GENERATEURS DE TENSIONS DE CHOC :

#### IV-2-3-1-Définition de choc :

Un choc est une tension ou un courant transitoire apériodique appliqué intentionnellement qui habituellement croît rapidement jusqu'à une valeur de crête, puis décroît plus lentement jusqu'à zéro. Un tel choc est en général bien représenté par la somme de deux exponentielles.

Pour les besoins spéciaux, des chocs ayant des fronts approximativement linéaires ou des chocs de forme oscillante ou approximativement rectangulaire sont utilisés.

Le terme « **choc** » doit être distingué du terme « **surtension** » qui se réfère aux phénomènes transitoires se produisant dans les équipements électriques et les réseaux en service.

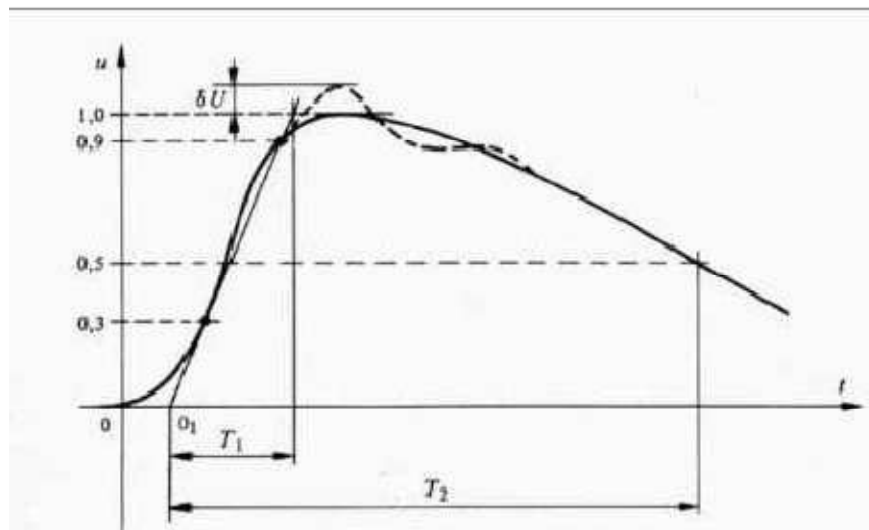
- **Choc de foudre et de manœuvre :**

Une distinction est faite entre les chocs de foudre et les chocs de manœuvres d'après la durée du front.

Les chocs, dont les durées du front sont comprises entre moins d'une à quelques dizaines de microsecondes, sont en général considérés comme étant des chocs de manœuvre. Généralement, les chocs de manœuvre sont également caractérisés par des durées totales considérablement plus longues que celles des chocs de foudre [5].

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.



**Fig. I-28 : Onde de choc conventionnelle**

➤ **Remarque 1:**

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).

➤ **Remarque 2:**

Le temps de montée  $t_1$  est appelé *temps de front*, et le temps de diminution  $t_2$  est appelé *temps de queue*.

#### IV-2-3-2- Générateur de choc à un étage

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

$C_1$  : Capacité de choc.

$C_2$  : Capacité de l'objet en essai ;

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

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

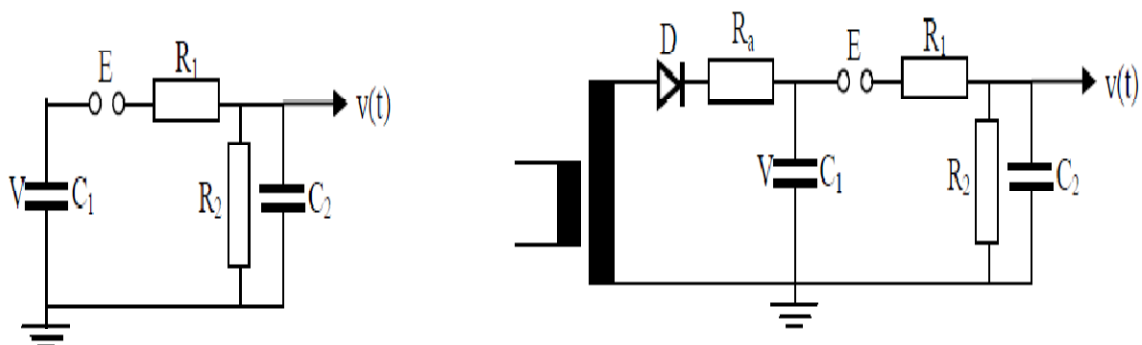


Fig. I-29 : Générateur de choc à un étage.

#### IV-2-3-3- 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 réalise env. 6 MV).

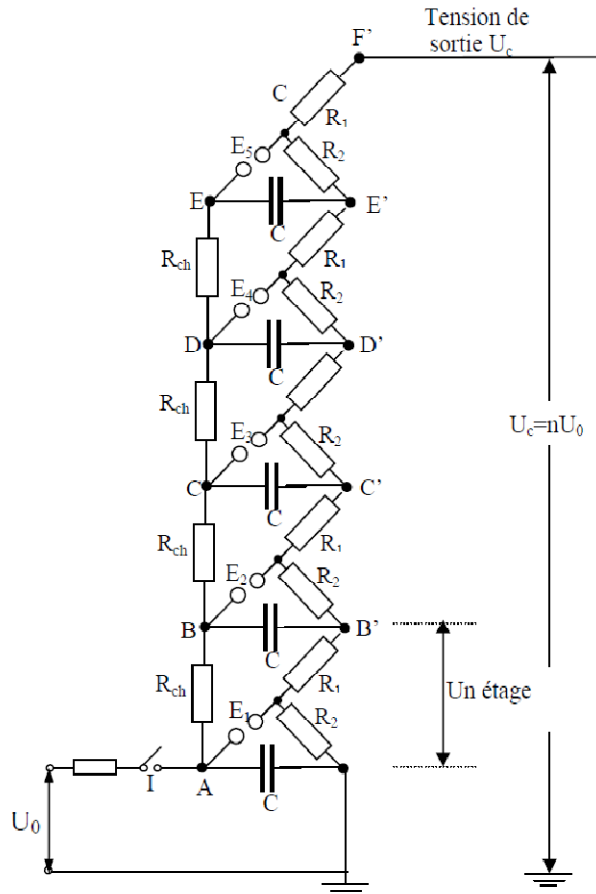


Fig. I-30 : générateur de Marx à 5 étages

**IV-2-3-4- générateur de Ruhmkroff :**

La haute tension est produite par l'interruption du courant dans un circuit inductif. Le schéma de principe du générateur de Ruhmkroff est donné par la figure ci-dessous :

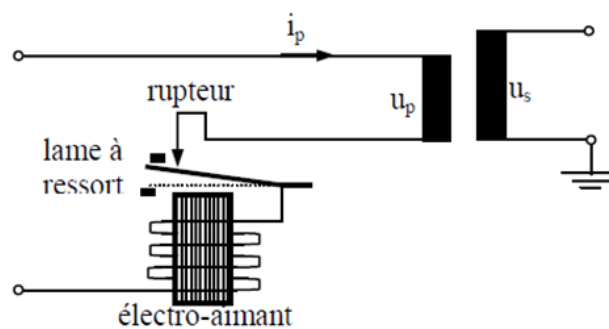


Fig. I-31 : générateur de Ruhmkroff

Les vibrations du rupteur ferment et ouvrent brusquement le circuit.

L'équation du circuit est :

$$U_p = R_p i_p + L_p \frac{di_p}{dt} + M \frac{dis}{dt}$$

Ou  $R_p$  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.

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).

#### IV-2-3-5- générateur de Tesla :

Il fournit une haute tension oscillante. Le schéma de principe du générateur de Tesla est donné par la figure ci-dessous :

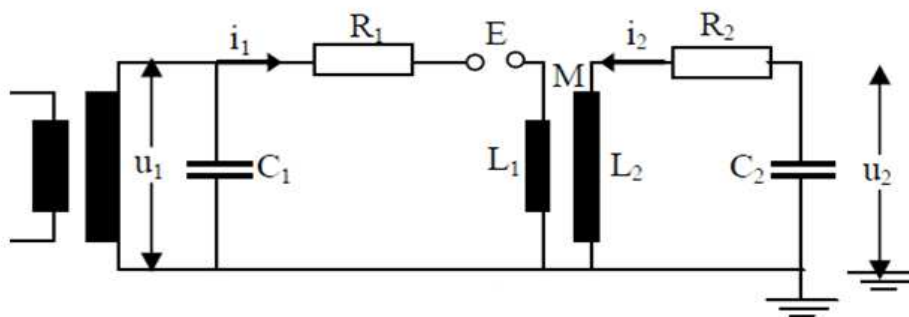


Fig. I-32 : générateur de Tesla

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

Les principales applications du générateur de Tesla sont les suivantes :

- La recherche des défauts d'isolations ;
- L'étude d'écoulement gazeux ;
- Les générateurs d'ozone ;
- Les applications médicales (effet calorifique) [8].

#### V- Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à l'étude générale des surtensions, et les différents générateurs de haute tension qui sont utilisés généralement dans les laboratoires de recherche scientifique ; et ainsi dans les laboratoires d'essai, pour tester les équipements haute tension avant leur utilisation (isolateur, câble, transformateur, appareils de coupure...).

***CHAPITRE II***

***ÉLÉMENTS DE  
CONSTRUCTION  
D'UN GÉNÉRATEUR  
D'ONDES DE CHOC***

### ***I-introduction:***

Les équipements pour des expériences en haute tension sont généralement placés à l'air libre. Les dimensions requises pour les éléments de construction utilisés dépendent seulement de l'amplitude de la tension qui apparaît à leurs bornes. A part ceci, il est nécessaire de considérer la dissipation des pertes opérationnelles pour éviter la surchauffe inadmissible.

### ***II-Eléments de construction pour circuits Haute Tension***

La plupart des composants qui vont suivre, et qui seront décrits brièvement représentent les plus importants éléments de construction haute tension pour des installations intérieurs. Dans la sélection des exemples, une priorité particulière est donnée à ceux applicables dans les expériences pratiques réalisables en haute tension et aussi à la faisabilité de ces dispositifs [1].

#### ***II-1-Résistances à haute tension***

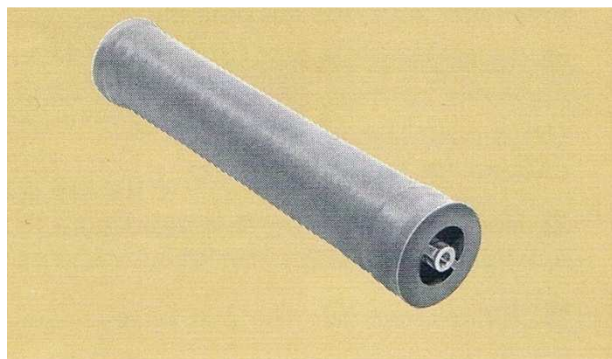
Les résistances à Haute Tension Haefely satisfont aux exigences spécifiques des laboratoires à Haute Tension et à grande puissance: l'application de ces résistances demande une rigidité diélectrique élevée et grande capacité de charge thermique. Pour une multitude d'applications les plus variées, on dispose de type, normalisées tout aussi bien que de résistances fabriquées selon les indications du client.

##### ***II-1-1-principe de construction***

Les résistances à haute tension Haefely sont bobinées sur un support selon un procédé anti-inductif. Deux variantes d'exécution sont disponibles:

##### **➤ Type ZB**

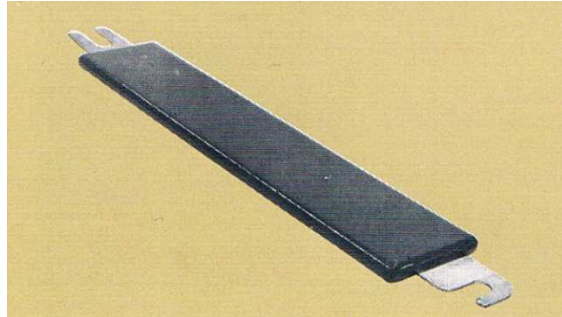
Résistance enroulée sur un tube support selon, et protégée contre les chocs mécaniques par une gaine rétractable munie respectivement d'un bandage supplémentaire pour une capacité de charge plus élevée par impulsion. La figure de cette résistance est représentée ci dessous :



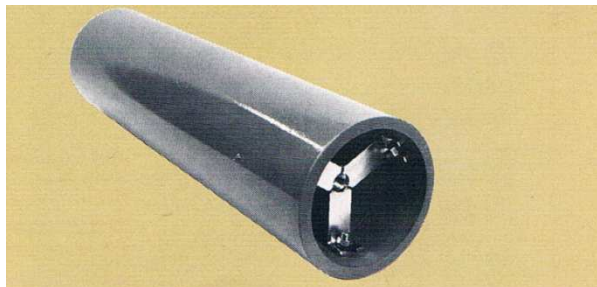
**Fig. II-1 : Résistance haute tension type ZB-**

➤ *Type FV et type ZV*

Résistances coulées dans l'araldite pour des sollicitations élevées par impulsion ; elles sont représentées par les figures suivantes :



**Fig. II-2 : Resistance haute tension de type FV-**



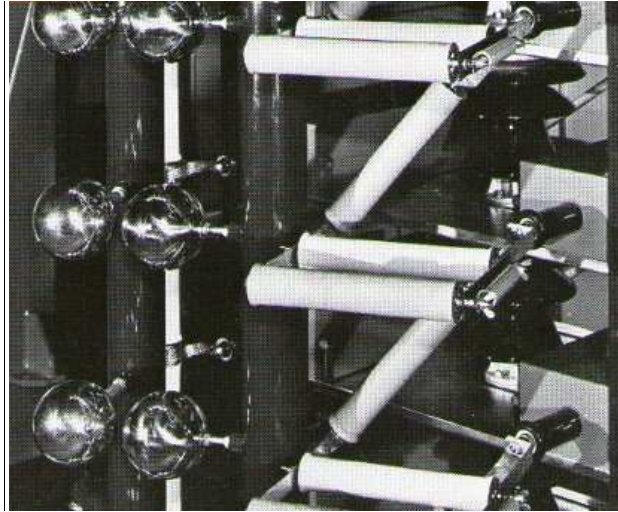
**Fig. II-3 : Resistance haute tension de type ZV-**

**II-1-2-Utilisation des résistances à HT Haefely :**

On utilise les résistances à haute tension de Haefely pour les générateurs de tension de choc. Deux exemples d'application sont représentés sur les figures suivantes :



**Fig. II-4 : Générateur de choc série v (type de résistance FV)**



**Fig. II-5 : Générateur de choc série E (type de résistance ZB)**

### ***II-1-3-propriétés des résistances à haute tension de Haefely :***

- Rigidité diélectrique élevée pour tous genres de tension
- Grande capacité de charge par impulsion
- Résistance aux surcharges
- Longévité élevée
- tolérances serrées de la résistance
- Faible influence de la température
- Stabilité de longue durée
- Faible inductance (valeurs typiques de la constante de temps inductive  $L/R=10$  à  $100$  ns)
- Utilisables dans l'air, le SF6 ou l'huile
- montage simple
- Raccordements selon les désirs des clients.

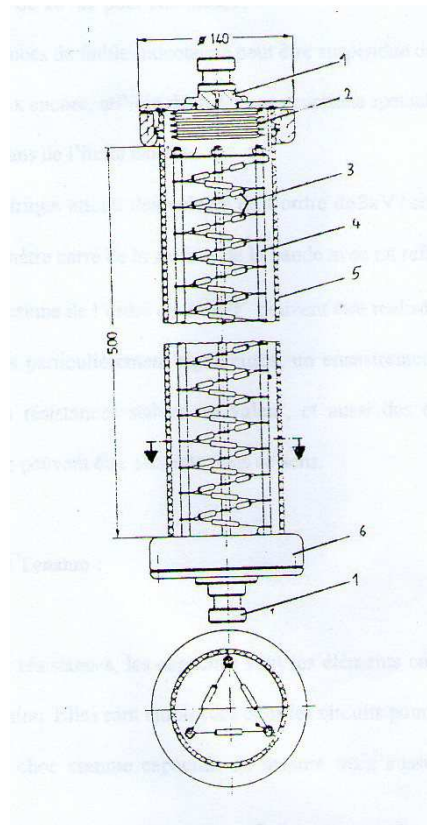
### ***II-1-4-différents types de résistance à HT***

Nous avons plusieurs types de résistance à haute tension :

- Les résistances de charge
- Les résistances séries
- Les résistances parallèles
- Les résistances d'amortissement pour des installations de courants de choc
- Les résistances terminables pour systèmes de mesure, par ex. résistance pour la connexion haute tension d'un diviseur de tension d choc [9].

-Les résistances pour la production de la forme d'impulsion désirée avec des générateurs de tension de choc selon Marx (par exemple. Tensions de choc de foudre 1.2/50  $\mu$  s, respectivement tension de choc de manœuvre 250/2500  $\mu$  s).

Pour augmenter la perturbation admise de la tension et améliorer la dissipation de chaleur de chaque élément de résistance, on doit les immerger dans de l'huile comme représenté sur la figure ci-dessous [1].



**Fig. II-6 : Résistances de charge immergées dans un tube isolant rempli d'huile  $10M\Omega$ , 140KV court service 1mn**

- 1-Bornes de fixation.
- 2-couvercle.
- 3-Eléments de la résistance.
- 4-support de matériel isolant.
- 5-Tube trempé.
- 6-partie métallique [1].

**II-1-5 -Choix d'un type de résistance à haute tension**

Pour la conception correcte d'une résistance à haute tension, les caractéristiques techniques suivantes doivent être données à la commande :

- valeur ohmique
- pour des sollicitations de choc :
  - Energie et cadence des chocs
- pour des régimes permanents :
  - Tension et puissance
  - Sollicitations maximales en tension

**II-1-6-Désignations des types de résistance à haute tension**

Première lettre :	type de construction	F = plat Z = cylindre
Deuxième lettre :	exécution	V = coulée dans l'araldide B = avec bandage ou gaine rétractable
Premier chiffre :	longueur L en mm, tolérance $\pm 1\%$	
Deuxième chiffre :	diamètre D en mm	

**Exemple :**

Type ZV 580-200

-Z : cylindre

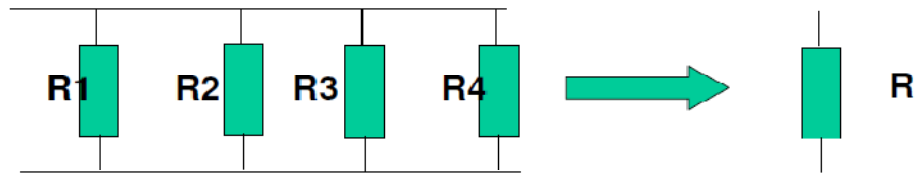
-V : coulé dans l'araldide

-580 : longueur L (mm)

-200 : diamètre D (mm) [9].

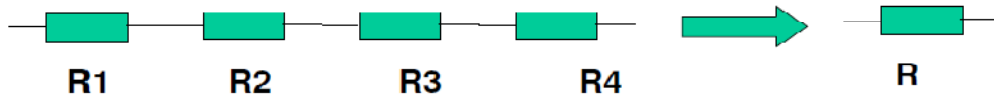
**II-1-7-Association de résistance**

**II-1-7-1- En parallèle :**



$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}$$

**II-1-7-2- En série :**



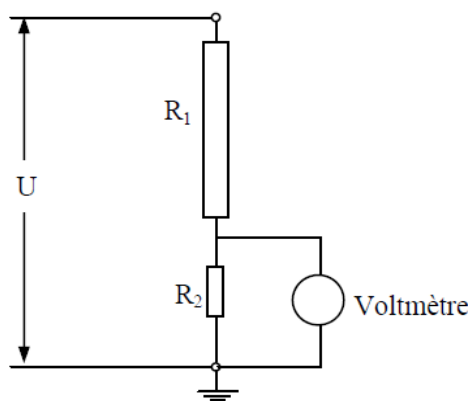
$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$$

**II-1-8- Mesure de tension de choc par diviseur de tension résistif :**

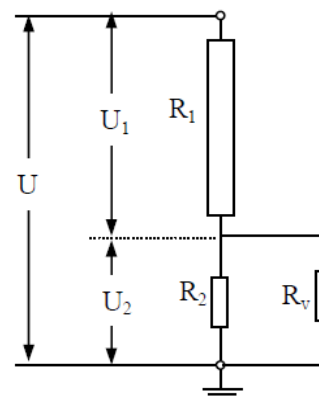
Des dispositifs de mesures de tension de choc, comprenant un diviseur capacitif ou résistif, à la partie inférieure duquel on prélève la tension à mesurer. Ce dispositif est prévu pour mesurer des ondes de choc de courte durée.

A noter qu'aux fréquences élevées que représente l'onde de choc, les câbles doivent être adaptés. En général, le câblage et les adaptateurs font partie intégrante du système de mesure

Ce diviseur de tension est formé d'une grande résistance R1 et d'une petite résistance R2 placées en série.



Diviseur de tension résistif



Circuit électrique équivalent

**Fig. II-7: diviseur de tension résistif**

Rapport de division g:

$$g = \frac{U}{U_2} = \frac{R_1 + R_2'}{R_2'}$$

Avec :  $\frac{1}{R_2'} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_V}$  ou  $R_V$  résistance du voltmètre.

$$\text{Or } R_V \gg R_2 \Rightarrow R_2' \approx R_2 \Rightarrow g = \frac{U}{U_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

$$\text{Comme aussi } R_1 \gg R_2 ; g = \frac{U}{U_2} = \frac{R_1}{R_2} \Rightarrow U = \frac{R_1}{R_2} U_2$$

La mesure de la ddP  $U_2$  aux bornes de  $R_2$  nous donne la valeur de la tension globale  $U$ .

Comme il s'agit d'un rapport  $R_1/R_2$ , les variations de température, d'humidité et de vieillissement ayant lieu en général dans le même sens, la précision de mesure est peu affecté (généralement inférieure à 1 %) [10].

Dans la conception des résistances HT dont la valeur est indépendante de la charge et du temps, on doit utiliser des conducteurs métalliques. Le problème essentiel rencontré dans la réalisation de ces résistances est la sensibilité mécanique des enroulements pour des résistances HT qui peuvent atteindre une valeur de  $10^6 \Omega$  pour chaque KV.

Leur rigidité diélectrique atteint des valeurs de l'ordre de 3KV/cm. Des valeurs de résistances de plus de 6M $\Omega$  par mètre carré de la surface de la bande avec un refroidissement automatique à l'air et d'une énergie continue de l'ordre de **10KV** peuvent être réalisées [1].

## II-2-Capacité Haute Tension

En plus des résistances, les capacités sont les éléments communs les plus utilisés dans les circuits à haute tension. Ils sont employés dans les circuits pour génération de tensions continues et de tensions de choc comme capacités de mesure mais aussi comme dispositifs de stockage d'énergie [1].

### II-2-1- Définitions :

La **capacité** représente la quantité de charge électrique stockée pour un potentiel électrique donné. Elle est définie comme étant la somme des charges électriques d'un élément divisée par le potentiel de cet élément :

$$C = \frac{Q}{U}$$

La capacité peut être également exprimée à l'aide du flux électrique (voir théorème de Gauss)

$$C = \epsilon_0 \frac{\phi}{U}$$

Où

$C$  : est la capacité en farads

$U$  : est le potentiel en volts

$\epsilon_0$  : la permittivité électrique du vide qui vaut  $8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$

$\phi$  : est le flux électrique (associé à la charge  $Q$  en coulombs), le flux s'exprime en webers.

### ***II-2-2-principe de construction :***

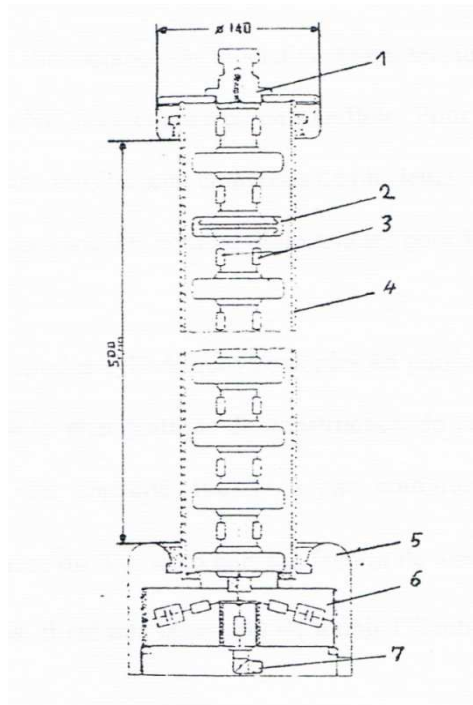
Le type du diélectrique usuellement utilisé dans ces capacités consiste en plusieurs couches de papier imprégné d'huile. L'épaisseur du diélectrique est de l'ordre de 50 à 100  $\mu\text{m}$ .

Les électrodes sont en papier Aluminium. Un grand nombre de capacités avec une tension partielle de quelques kV sont connectées en série.

On peut aussi utiliser à la place du papier diélectrique, du papier plastic à faible perte.

En général, les diélectriques céramiques ont un facteur de dissipation qui augmente avec la diminution, de la fréquence. Il est donc convenable pour la fabrication des capacités à haute fréquence pour les hautes tensions.

Toutefois, pour des raisons technologiques, la tension possible par élément est limitée à des valeurs de 10 kv.



**Fig. II-8 : Diviseur de tension capacitivement amorti pour tension de choc de plus de 200kV construit avec des capacités céramiques.**

- 1-Borne HT.
- 2-Capacité céramique.
- 3-Resistance d'amortissement.
- 4-Tube isolant.
- 5-métal de mise à la terre.
- 6-Section BT.
- 7-Borne pour câble de mesure.

Pour atteindre des hautes tensions, on doit utiliser une connexion série de plusieurs éléments qui doivent être placés soit dans l'air, soit dans de l'huile.

La figure (II-8) représente un exemple l'application des capacités céramiques pour la réalisation d'un diviseur de tension de choc capacitif avec amortissement.

Ce diviseur a un temps de réponse extrêmement très court  $T=6\text{ns}$ , et peut être utilisé pour des tensions de choc de plus de 200kv. Sa capacité résultante est de 60pF, et sa résistance résultante est de 660 $\Omega$ .

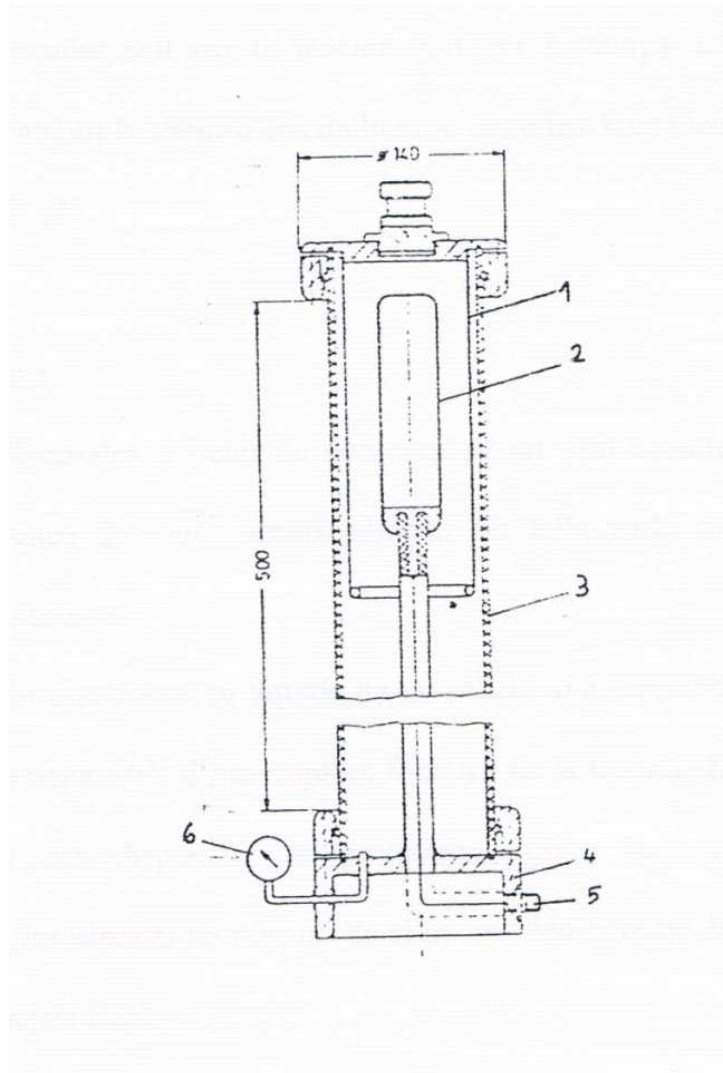
Dans le but de maintenir l'inductance de la section de basse tension la plus faible possible, un très grand nombre d'éléments RC sont connectés en parallèle. Pour la même raison, les

composants ohmiques de la section haute tension sont composés de plusieurs résistances en parallèle.

Les gaz comprimés sont convenables comme diélectriques pour la fabrication de capacités à faible pertes.

Le montage avec des électrodes cylindriques coaxiales en particulier, d'après Shering et Viewg, a prouvé que c'est la forme la plus pratique de construction de ces capacités. Comme exemple, la figure (II-9) représente une capacité 100 kv à gaz comprimé. Elle est fabriquée pour des utilisations haute tension et isolée avec du SF<sub>6</sub> à 3.5 bar, son facteur de dissipation reste inférieur à  $10^{-5}$ .

Pour d'autre application, il est très important de munir l'électrode d'un bouclier avec une borne haute tension .



**Fig. II-9 : Capacité pour 100kV avec gaz isolant comprimé.**

- 1-Electrode HT.
- 2-Electrode de mesure.
- 3-Tube isolant.
- 4-Métal de mise à la terre.
- 5-Borne pour câble de mesure.
- 6-Manomètre [1].

### II-2-3- Calcul de la capacité des condensateurs de configuration courante

Essentiellement, on utilise la définition pour calculer la capacité des condensateurs de configuration courante et il faut considérer le calcul de la capacité des groupements.

Dans le cas des configurations courantes, il y a :

- le condensateur plan,
- le condensateur sphérique,
- le condensateur cylindrique
- le cas des conducteurs isolés.

#### II-2-3-1- Le condensateur plan :

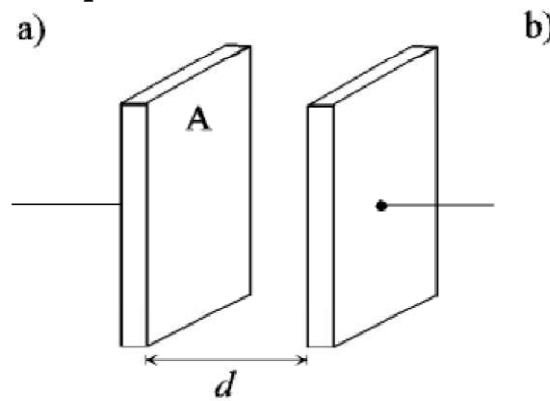


Fig. II-10-condensateur plan.

Le condensateur plan est constitué de deux plans conducteurs de surface « $A$ » séparé d'une distance « $d$ » de dimension petite par rapport aux dimensions des cotés de la surface « $A$ ». Dans ces conditions, le champ électrique  $E$  est uniforme entre les armatures est donné par :

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{Q}{\epsilon_0 A}$$

La différence de potentiel entre les armatures est alors donnée par :

$$V = E d = \frac{Q d}{\epsilon_0 A}$$

La capacité est alors obtenue en appliquant la définition :

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{\frac{Q d}{\epsilon_0 A}}$$

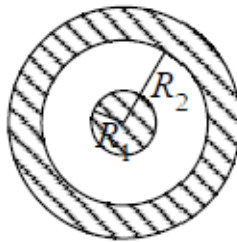
$$\rightarrow C = \frac{\epsilon_0 A}{d}$$

Comme on le constate, la capacité dépend de la constante diélectrique du milieu entre les armatures, ainsi que des facteurs géométriques :

- la capacité est proportionnelle à la surface «  $A$  » des armatures qui représente en fait la mesure de l'espace où est disposée la charge  $Q$ ;

- la capacité est inversement proportionnelle à la distance «  $d$  » entre les armatures, car l'énergie potentielle qu'il faut donner aux charges sur les armatures est proportionnelle à la distance entre celles-ci, ce qui en fait un facteur limitatif de la charge totale qui peut être emmagasinée sur chacune des armatures. De fait, dans la définition de la capacité, la différence de potentiel entre les armatures qui est proportionnelle à la distance entre celles-ci est au dénominateur.

### II-2-3-2- Le condensateur sphérique :



**Fig. II-11-condensateur sphérique.**

Ce type de condensateur est constitué d'une sphère conductrice de rayon  $R_1$  (armature positive) portant une charge  $+Q$  placée à l'intérieur d'une coquille sphérique conductrice mince de rayon  $R_2$  (armature négative) portant une charge  $-Q$ .

Le champ électrique entre les sphères est donné par :

$$E(r) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

La différence de potentiel entre les sphères est alors donnée par :

$$V = | V_2 - V_1 | = \left| - \int_{R_1}^{R_2} E(r) dr \right| = \left| - \int_{R_1}^{R_2} \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \right|$$

$$\Rightarrow V = \left| \left( \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r} \right) \Big|_{R_1}^{R_2} \right|$$

$$\rightarrow V = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

De la définition de la capacité,  $C = \frac{Q}{V}$ , on obtient :

$$\rightarrow C = 4\pi\epsilon_0 \frac{R_1 R_2}{(R_2 - R_1)}$$

### II-2-3-3- Le condensateur cylindrique :

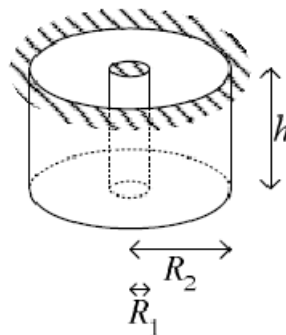


Fig. II-12-condensateur cylindrique

Le condensateur cylindrique est constitué d'un cylindre central conducteur de rayon  $R_1$  et de longueur  $\ll h \gg$  qui constitue l'armature de polarité positive (portant une charge  $+Q$ ) situé dans l'axe d'une coquille conductrice cylindrique mince de rayon  $R_2$  qui constitue l'armature de polarité négative (portant une charge  $-Q$ ). La différence de potentiel entre les armatures se calcule comme suit :

$$E = \frac{2k\lambda}{r} = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 h r}$$

$$\Rightarrow V = | V(r=R_2) - V(r=R_1) | = \left| - \int_{R_1}^{R_2} \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 h r} dr \right|$$

$$\Rightarrow V = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 h} \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)$$

Avec la définition  $C = \frac{Q}{V}$ , on trouve :

$$\rightarrow C = \frac{2\pi\epsilon_0 h}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}$$

Finalement, il faut considérer la question de la valeur de la capacité d'un conducteur isolé. On l'obtient expérimentalement en mesurant la charge sur le conducteur et la différence de potentiel avec l'**autre armature, la terre**. La capacité est alors donnée par le rapport

$$C = \frac{Q}{V}$$

Dans le cas d'une sphère conductrice isolée de rayon  $R$  portant une charge  $Q$ , on peut déterminer l'expression de la capacité puisque la valeur du potentiel de la sphère est celui à sa surface. Il est donné par :

$$V = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R}$$

Ce résultat correspond à la différence de potentiel avec la terre dont le potentiel est considéré égal à 0.

Avec  $C = \frac{Q}{V}$ , on trouve :

$$C = 4\pi\epsilon_0 R$$

La question de la capacité d'un conducteur isolé soulève un problème bien connu en électrotechnique, celui de la "gestion" de l'électricité statique. En particulier, si le conducteur comporte une ou des zone(s) en pointe, il y aura dans le voisinage de celle(s)-ci un champ électrique intense si des charges s'y installent. De plus, la capacité des conducteurs utilisés dans les circuits électriques doit être prise en considération, car les effets peuvent être non négligeables. L'un des cas très importants est celui des lignes de transport de l'énergie électrique, pour lesquelles on ne peut négliger la capacité des fils utilisés.

### II-2-4-Calcul de la capacité des groupements :

On distingue 2 types de groupements: les groupements en parallèle et les groupements en série.

- Lorsqu'on ne dispose pas de condensateurs de capacité suffisante, il faut les regrouper pour obtenir une capacité équivalente assez importante pour les fins d'une certaine application. Il suffit alors de les disposer en parallèles.
- Lorsque les condensateurs ne peuvent supporter la différence de potentiel de la source, il faut les regrouper en séries pour ramener la différence de potentiel à ce que ceux-ci peuvent supporter.
- Finalement, il faudra parfois combiner les 2 types de groupement pour obtenir un groupement de capacité équivalente voulue.

Voilà la justification du calcul de la capacité équivalente des groupements série et parallèle

#### II-2-4-1- Groupements en parallèle

La figure qui suit illustre un groupement de 3 condensateurs en parallèles et le circuit équivalent.

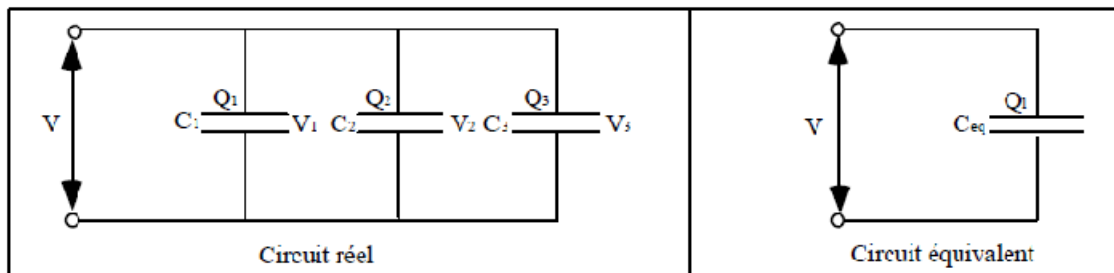


Fig. II-13: groupement de 3 condensateurs en parallèle

Les relations caractéristiques de ce type de groupement sont (voir la figure) :

$$V = V_1 = V_2 = V_3$$

(Égalité des tensions sur chacun des condensateurs)

$$Q_l = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

(Charge libre = somme des charges sur chacun des condensateurs)

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3$$

(La capacité équivalente est la somme des capacités)

- **Remarque (1) :** On utilise souvent la configuration en parallèle pour obtenir des groupements de grande capacité équivalente.
- **Remarque (2) :** Les armatures de même signe sont reliées (donc au même potentiel) dans ce type de groupement.

### II-2-4-2- Groupement en série

La figure qui suit illustre un groupement de 3 condensateurs en série et le circuit équivalent.

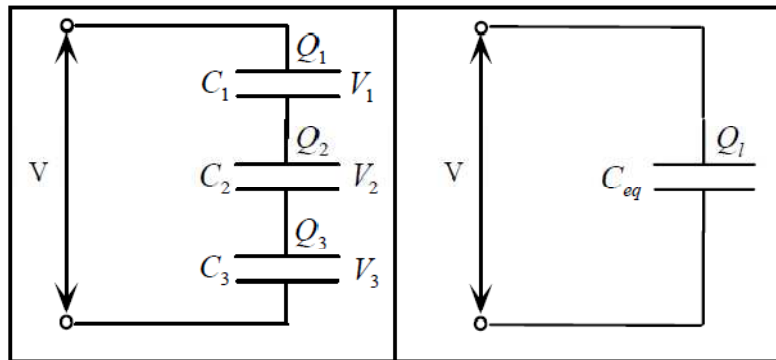


Fig. II-14:groupement de 3condensateur en série

$$Q_l = Q_1 + Q_1 + Q_3$$

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

$$\frac{1}{C_{EQ}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

- **Remarque (1) :**

L'égalité des charges sur chacun des condensateurs est physiquement une condition essentielle pour que dans les conditions statiques, le champ électrique soit nul à l'intérieur des armatures, puisqu'on est dans un conducteur. D'autre part, la charge dans la partie isolée du groupement se doit d'être nulle.

- **Remarque (2):**

On constitue habituellement (mais pas exclusivement) ce type de groupements lorsque les condensateurs dont on dispose ne peuvent supporter la tension maximale à laquelle ceux-ci seraient soumis dans les circuits où ils seraient utilisés. En les disposants en série, on peut résoudre ce problème.

➤ *Remarque (3) :*

La capacité équivalente de deux condensateurs en série est plus petite que la capacité de celui de plus petite capacité. D'autre part, la capacité équivalente de 2 condensateurs de capacité  $C_1$  et  $C_2$  est donnée par :

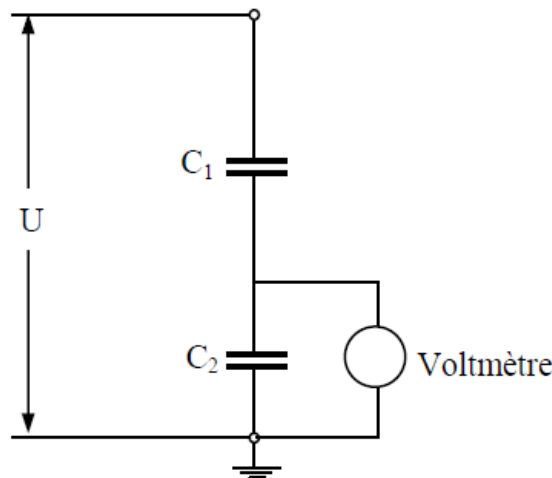
$$C_{eq} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

Finalement, il est important de préciser qu'il n'est généralement possible de constituer des groupements de capacité voulue qu'en combinant les deux types de groupements [11].

### II-2-5- Mesure de tension de choc par diviseur de tension capacitif :

Des dispositifs de mesures de tension de choc, comprenant un diviseur capacitif ou ohmique, à la partie inférieure duquel on prélève la tension à mesurer. Ce dispositif diffère du premier mentionné, car il est prévu pour mesurer des ondes de choc de courte durée.

A noter qu'aux fréquences élevées que représente l'onde de choc, les câbles doivent être adaptés. En général, le câblage et les adaptateurs font partie intégrante du système de mesure



**Fig. II-15: diviseur de tension capacitif**

La capacité  $C_1$  est un condensateur à haute tension dont la valeur de capacité est beaucoup plus faible que celle du condensateur  $C_2$  de la branche basse tension. D'autre part, on néglige la grande impédance du voltmètre devant celle de  $C_2$ .

- *Rapport de division :*

$$g = \frac{U}{U_2} = \frac{(1/C_1\omega + 1/C_2\omega)I}{1/C_2\omega I} = \frac{1/C_1 + 1/C_2}{1/C_2} = \frac{C_1 + C_2}{C_1}$$

Comme  $U = \frac{C_1 + C_2}{C_1} U_2$ , la mesure de  $U_2$  nous donne la tension globale  $U$ .

Notons que puisque  $C_2 \gg C_1 \Rightarrow \frac{U}{U_2} = \frac{C_2}{C_1}$  [10].

### ***II-3-Eclateurs :***

#### ***II-3-1-Introduction :***

Les éclateurs sont des éléments de construction typiquement HT. Ils sont utilisés comme des interrupteurs commandés soit par la tension soit par le temps. La résistance comparativement grande de l'arc qui établit le chemin de conduction entre les deux électrodes est le seul inconvénient dans les circuits HT [1].

#### ***II-3-2-fonctionnement :***

Les deux électrodes à l'état de non-conduction sont usuellement séparées par un milieu gazeux, de préférence de l'air atmosphérique, de telle sorte que la répétition du processus d'interruption soit assurée.

Des intervalles inter électrodes en liquide ou en solide sont rarement utilisés. Les éclateurs à deux électrodes sont des dispositifs d'interruption fonction de la tension. Ils peuvent par conséquent, être employés comme des dispositifs de protection contre les surtensions excessives, comme interrupteurs dans les circuits de tension de choc ou bien comme des éclateurs de mesure pour des tensions de choc [1].

#### ***II-3-3-différentes types d'électrodes :***

Cette partie traite les problèmes de claquage, en donnant l'influence des paramètres suivants: tension, forme des électrodes, fréquence, durée d'application de la tension, conditions atmosphériques, pertes des isolants. La tension de claquage est déterminée par le champ électrique maximum que peut supporter l'isolant. Il faut donc calculer ce champ maximum apparaissant entre deux électrodes (sachant qu'il n'est pas constant dans l'espace). Nous distinguerons la tension de claquage, de la tension d'apparition de couronne. Cette dernière apparaissant pour une tension environ moitié de la tension de claquage.

Le problème consiste alors à trouver la relation entre  $E$  et  $U$  pour différentes formes et dimensions de montage.

$$E = f(u, r, d)$$

u = tension appliquée.

r = rayon de courbure ou des sphères.

d = distance minimum entre les électrodes.

### II-3-3-1- Plaques parallèles dans l'air :

La figure II-16 montre les paramètres permettant de calculer  $E = U / d$ . Une formule empirique de la tension de claquage dans l'air est donnée par la formule de Stephenson:

$$U_{\max} = 24,22 \cdot d + 6,08 \cdot \sqrt{d} \quad d \text{ en cm et } U \text{ en KV}$$

Soit :

$$E_{\max} = 24,22 + \frac{6,08}{\sqrt{d}} \quad \text{KV / cm} \quad (\text{formule A})$$

Il s'agit ici d'une tension (ou un champ) maximum, l'effet de couronne est atteint pour environ une tension moitié.

La tension d'utilisation doit être environ 20 % en dessous.



Figure II-16. Plaques parallèles

### II-3-3-2- Sphère vis à vis d'un plan : (Figure II-17)

La relation entre champ et tension:

$$E = 0,9 \frac{U}{d} \cdot \frac{r+d}{r}$$

Le champ maximum est celui apparaissant au point de la sphère la plus proche du plan. La formule (A) permet de calculer la tension maximum applicable:

$$U_{\max} = 1,1 \cdot \frac{r \cdot d}{r + d} \cdot \left( 24,22 + \frac{6,08}{\sqrt{d}} \right)$$

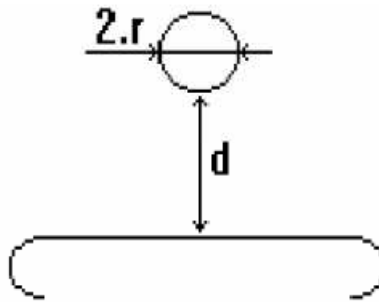


Figure II-17. Sphère vis à vis d'un plan.

II-3-3-3- Sphères identiques vis-à-vis : (Figure II-18).

La relation entre champ et tension:

$$E = 0,9 \cdot \frac{U}{d} \cdot \frac{r + d/2}{r}$$

Correspondant à une tension maximum:

$$U_{\max} = 1,1 \cdot \frac{r \cdot d}{r + d/2} + (24,22 + \frac{6,08}{\sqrt{d}})$$

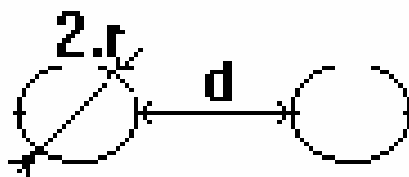


Figure II-18. Deux sphères vis à vis.

II-3-3-4- Cylindre parallèle à un plan :(Figure II-19).

Il est important que les extrémités du cylindre soient arrondies par exemple en forme d'ellipse.

La relation entre champ et tension est:

$$E = 0,9 \cdot \frac{U}{r} \cdot \frac{1}{2,3 \cdot \log \frac{r+d}{r}} = U \cdot f_1(r, d)$$

Ce qui correspond à une tension maximum:

$$U_{\max} = \left(24,22 + \frac{6.08}{\sqrt{d}}\right) \cdot \frac{1}{f_1(r, d)}$$

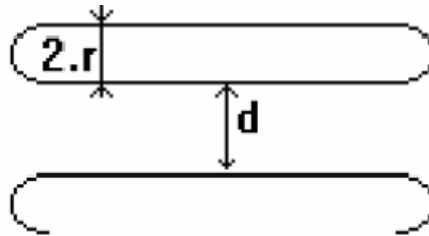


Figure II-19. Cylindre parallèle à un plan

**II-3-3-5- Cylindres concentriques. (Figure II-20)**

Il faut également donner des formes arrondies aux extrémités. Ce montage est généralement utilisé comme ligne coaxiale, c'est à dire qu'il doit conserver l'adaptation.

Les formes doivent permettre de conserver le rapport  $R / r$ .

$$E = 0,9 \frac{U}{r} \cdot \frac{1}{2.3 \cdot \log \frac{R}{r}} = U \cdot f_2(r, d)$$

On en déduit de la même façon la tension maximum:  $U_{\max} = E_{\max} \cdot f_2(r, d)$ .

$$U_{\max} = \left(24,22 + \frac{6.08}{\sqrt{d}}\right) \cdot \frac{1}{f_2(r, d)}$$

Avec  $d = R - r$

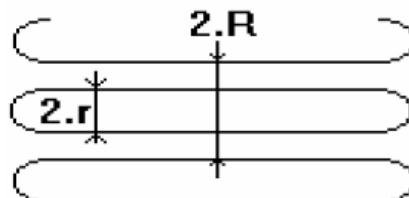


Figure II-20. Cylindres concentriques.

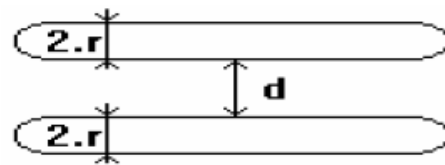
**II-3-3-6- Cylindres parallèle. (Figure II-21)**

La relation entre champ et tension est :

$$E = 0,9 \frac{U}{r} \cdot \frac{1}{4.6 \cdot \log \frac{r+d}{r}} = U \cdot f_3(r, d)$$

Et de la même façon:

$$U_{\max} = \left( 24.22 + \frac{6.08}{\sqrt{d}} \right) \cdot \frac{1}{f_3(r, d)}$$

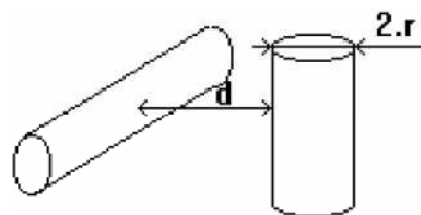


**Figure II-21. Cylindres parallèles.**

**II-3-3-7- Cylindres croisés. (Figure II-22)**

Le maximum de champ se produit au point de distance la plus courte. La relation entre champ et tension est valable en ce point.

$$E = 0,9 \frac{U}{r} \cdot \frac{1}{4.6 \cdot \log \frac{r + d/2}{r}} = U \cdot f_4(r, d)$$

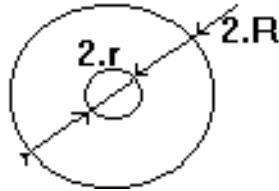


**Figure II-22. Cylindres croisés.**

**II-3-3-8- Sphères concentriques. (Figure II-23)**

La relation entre champ et tension:

$$E = \frac{U}{(R - r)} \cdot \frac{R}{r} = U \cdot f_5(r, d). [12]$$

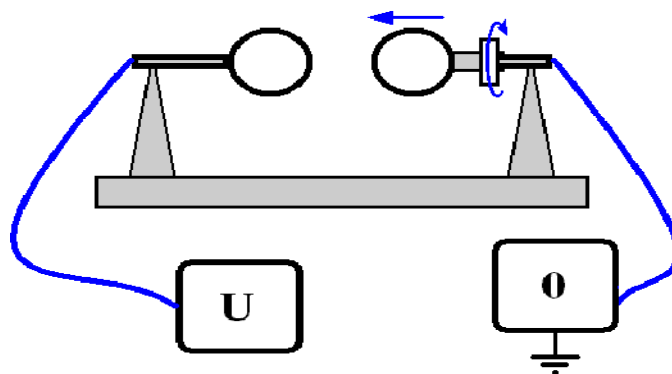


**Figure II-23. Sphères concentriques.**

**II-3-4- Eclateur à sphère :****II-3-4-1- Introduction :**

L'éclateur à sphères peut en principe être utilisé directement pour mesurer une tension : soit deux objets entre lesquels existe une certaine différence de potentiel. Si on connecte ces objets aux deux pôles d'un éclateur « suffisamment écarté », rien ne se passe. Ensuite, on rapproche les deux sphères de l'éclateur jusqu'à ce qu'une étincelle éclate ; l'écartement atteint à ce moment permet de connaître la valeur de la tension.

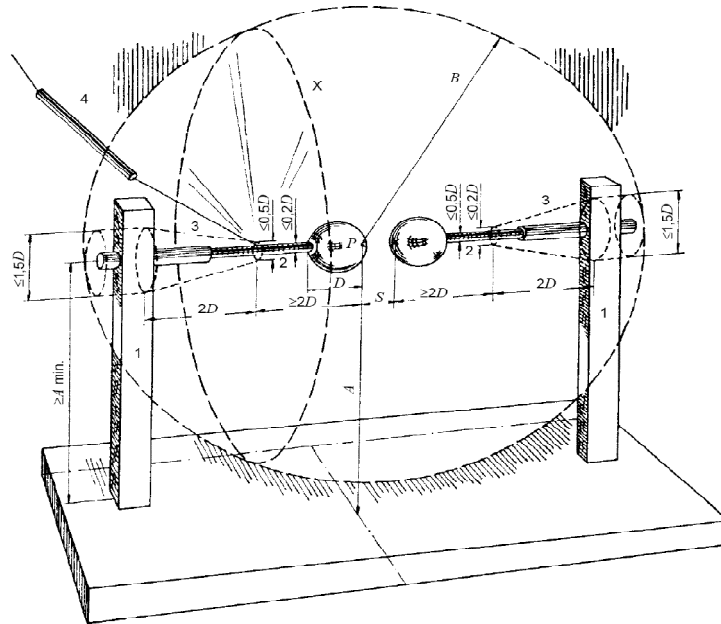
En pratique, toutefois, l'éclateur n'est utilisé de cette façon que pour l'étalonnage des voltmètres à haute tension.



**Fig. II-24. Éclateur à sphère**

### II-3-4-2- principe de construction :

Selon la norme CEI 60052, *Mesure de tension au moyen des éclateurs à sphères normalisés*, l'éclateur à sphères peut être conçu horizontalement ou verticalement.



**Fig. II-25. Éclateurs à sphères horizontal**

En plus des différentes dimensions indiquées sur le schéma, l'éclateur doit remplir les conditions suivantes :

- Les deux sphères sont de même diamètre, à  $\pm 2\%$ . Le rayon des sphères doit correspondre à l'une des valeurs indiquées dans le tableau des tensions disruptives (voir annexe).
- Les tiges qui supportent les sphères sont alignées et sont cylindriques (elles ne comportent pas d'arêtes vives).
- La surface des sphères présente une rugosité maximale de  $10 \mu\text{m}$ .
- Les distances A et B – indiquées sur les schémas – sont comprises dans un intervalle donné par

Le tableau ci après :

Rayon R des sphères [mm]	$A_{\min}$	$A_{\max}$	$B_{\min}$ , en fonction de l'écartement d
$R \leq 31,25$	$14 \cdot R$	$18 \cdot R$	$14 \cdot d$
$50 \leq R \leq 75$	$12 \cdot R$	$16 \cdot R$	$12 \cdot d$
125	$10 \cdot R$	$14 \cdot R$	$10 \cdot d$
250	$8 \cdot R$	$12 \cdot R$	$8 \cdot d$
375	$8 \cdot R$	$12 \cdot R$	$8 \cdot d$
500	$7 \cdot R$	$10 \cdot R$	$7 \cdot d$
750	$6 \cdot R$	$8 \cdot R$	$6 \cdot d$
1000	$6 \cdot R$	$8 \cdot R$	$6 \cdot d$

Fig. II-26-tableau

Finalement, l'éclateur est considéré comme *Approuvé par la CEI*, lorsque la *dispersion conventionnelle* est inférieure à 1% de la valeur moyenne en AC50Hz et en choc de foudre, ou inférieure à 1,5% de la valeur moyenne en choc de manœuvre.

#### II-3-4-3- Utilisation de l'éclateur :

Lors de la mesure d'une tension, différentes prescriptions sont à respecter :

- Au moment où l'étincelle se produit, le courant qui circule dans l'éclateur doit être limité par des résistances en série de 0,1 à 1 M $\Omega$  de manière à éviter la piqûre des sphères.
- Pour les faibles tensions (inférieures à 50 kV), une irradiation additionnelle est nécessaire. L'irradiation est nécessaire pour garantir la reproductibilité de la décharge : pour mesurer une tension faible il faut réduire l'écartement des sphères. Or, dans un très petit intervalle d'air, le nombre d'électrons présents – susceptibles d'amorcer la décharge – est trop aléatoire. On en augmente donc artificiellement la quantité en plaçant à proximité une source de rayonnement ionisant (UV ou radioactifs) [13].

#### II-3-4-4-Mesure de tension de choc par éclateur:

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, ou la distance inter-électrodes d est réglable. Il peut être conçu pour être utilisé soit:

- dans une position horizontale (voir la figure précédente) qui est la disposition la plus fréquemment utilisée ;
- dans une position verticale, utilisée pour les sphères de grand diamètre D ( $D \geq 50\text{cm}$ ).

**II-3-4-5- Principe de fonctionnement :**

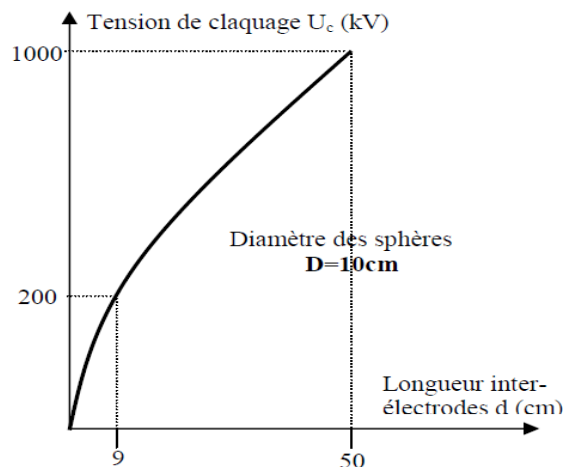
Chaque éclateur possède une abaque, qui est une courbe d'étalonnage entre la tension critique de claquage  $U_c$  et la longueur inter-électrodes  $d$  (voir figure ci-dessous).

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 une abaque tracée  $U_c = f(d_c)$  qui fait correspondre à chaque distance critique la tension critique  $U_c$ , cette abaque donne la mesure de la tension appliquée qui correspond à la valeur  $d_c$ .

➤ **Exemple :**

Par exemple, la tension à mesurer provoque un claquage de l'éclateur pour une distance critique  $d_c = 9$  cm. Si on suppose que la figure ci-devant représente l'abaque de cet éclateur, la tension mesurée est donc 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.



**Fig. II-27-tension de claquage (kV) en fonction de longueur inter-électrode (cm)**

L'éclateur peut être utilisé pour la mesure des trois types de tension : alternative et onde de choc (valeur crête), ainsi que la tension continue. Il compte parmi les tous premiers appareils utilisés pour la mesure des HT. Il constitue la référence conventionnelle permettant d'étalonner tous les types de voltmètres utilisés dans un laboratoire d'essais à haute tension. 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 (voir figure suivante).

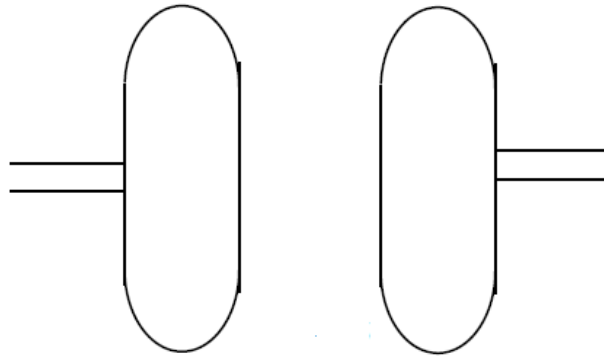


Fig. II-28- électrodes moins arrondie et plus plate

➤ *Remarque :*

L'éclateur constitue la référence conventionnelle permettant d'étalonner tous les types de voltmètres utilisés dans un laboratoire d'essais à HT [10].

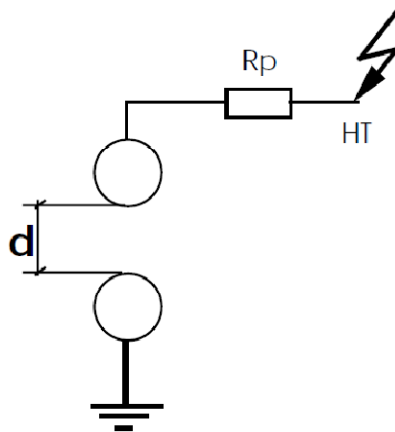


Fig. II-29- Principe de l'éclateur à sphères.

**III-Conclusion :**

Nous nous sommes intéressés, dans ce second chapitre à l'étude des éléments de construction de générateur d'ondes de choc (résistance HT, capacité HT, et éclateur), et leurs principes de construction, et ainsi les différentes méthodes utilisées pour mesurer les tensions de choc.

# ***CHAPITRE III***

## ***PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN GÉNÉRATEUR D'ONDES DE CHOC***

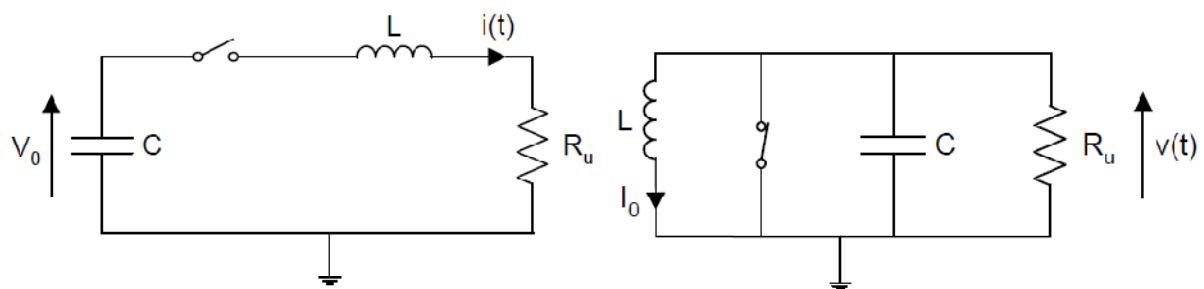
## I-Introduction

L'étude de la réponse d'un objet quelconque à certaines contraintes électrique nécessite d'essayer ou de tester cet objet. A l'aide d'appareils spécialement conçus pour reproduire les contraintes en question. Les contraintes appliquées en exploitation réelle sont si difficiles à simuler qu's'en contente d'appliquer à l'objet en essai une représentation approchée, simplifiée de ces contraintes [1].

Avant de commencer cette étude, nous proposons quelques rappels sur la structure générale des circuits générateurs de puissances pulsées et sur les décharges électriques dans les gaz qui sont à la base du fonctionnement des commutateurs à gaz, ou éclateurs.

## II-Les circuits générateurs de puissances pulsées

Les générateurs de puissances pulsées reposent sur le principe d'un stockage lent de l'énergie suivi de sa commutation brutale sur une charge (utilisation). Les puissances instantanées mises en jeu sont alors considérables (GW). Le stockage de l'énergie peut être, soit capacitif, soit inductif. Un schéma de principe de ces deux formes de stockage est présenté figures 2.1.



(a): Stockage capacitif

$V_0$ : tension initiale aux bornes de  $C$

$C$ : capacité du condensateur de stockage

$L$ : self-inductance parasite du circuit

$R_u$ : résistance d'utilisation

(b): stockage inductif

$I_0$ : courant initial traversant  $L$

$L$ : self-inductance de la bobine de stockage

$C$ : capacité du condensateur parasite de la résistance d'utilisation

$R_u$ : résistance d'utilisation

**Fig. III-1 : Stockages capacitif et inductif**

Dans les deux cas, le régime transitoire peut être sur-critique, critique ou sous-critique, donnant lieu, ou pas, à un régime d'oscillations accompagné de surtension(s). La discrimination des différents régimes se fait sur la valeur de la pulsation  $\omega_d$ .

$i(t) = \frac{V_0}{\omega_d L} e^{-\alpha_1 t} \sin \omega_d t$	$\omega_d^2 > 0$ Régime sous-critique	$V(t) = -\frac{I_0}{\omega_d C} e^{-\alpha_2 t} \sin \omega_d t$
$i(t) = \frac{V_0 t}{L} e^{-\alpha_1 t}$	$\omega_d^2 = 0$ Régime critique	$V(t) = -\frac{I_0 t}{C} e^{-\alpha_2 t}$
$i(t) = \frac{V_0}{\beta L} e^{-\alpha_1 t} \sinh \beta t$	$\omega_d^2 < 0$ Régime sur-critique	$V(t) = -\frac{I_0}{\beta C} e^{-\alpha_2 t} \sinh \beta t$

Avec :  $\alpha_1 = \frac{R_u}{2L}$  ,  $\alpha_2 = \frac{1}{2CR_u}$  ,  $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$  et  $\omega_d^2 = \omega_0^2 - \alpha_i^2 = -\beta^2$

Les deux montages proposés sont duaux, les commutateurs aussi : un commutateur à la fermeture, placé en série avec le condensateur, dans le cas du stockage capacitif et un commutateur à l'ouverture, placé en parallèle de la bobine, dans le cas du stockage inductif. Il faut noter que, dans ces deux configurations, les circuits de charge ne sont pas représentés et qu'ils doivent se trouver isolés lors de la commutation des interrupteurs. Le temps de commutation des interrupteurs fixe le temps nécessaire à l'application de la tension maximum aux bornes de l'utilisation et donc le rendement de l'ensemble. Dans la grande majorité des applications, les temps de montée les plus faibles sont recherchés ; ils sont atteints pour les valeurs des éléments, notamment parasites, les plus faibles. Leurs valeurs peuvent être approximées en fonction des éléments des circuits (tableau 2.1).

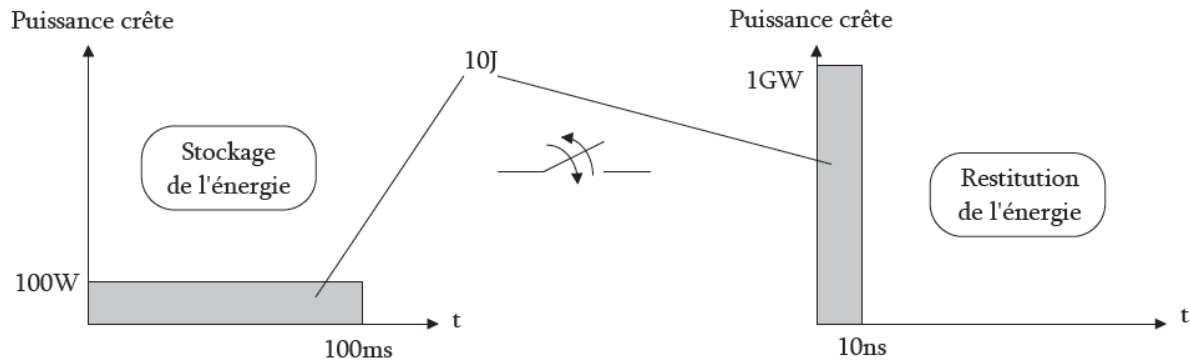
$T_f$ (temps de montée)	Régime
$\frac{1}{\omega_d} \tan h^{-1} \left( \frac{\omega}{\alpha_i} \right)$	sur-critique
$\frac{1}{\alpha_i}$	critique
$\frac{1}{\omega_d} \tan h^{-1} \left( \frac{\omega}{\alpha_i} \right)$	sous-critique

Tableau 2.1 : Valeur du temps de montée suivant la nature du régime transitoire

De par la simplicité de réalisation des commutateurs à fermeture, le stockage capacitif est le plus répandu [14].

### III-Principe général de la commutation de puissance:

Ce principe repose sur le stockage lent d'une énergie électrique donnée et sa restitution rapide au travers d'un commutateur. Autrement dit, on amplifie, en sortie, la puissance disponible à l'entrée du système en comprimant le temps de sa restitution.



**Figure. III-2 : Principe général des puissances pulsées**

Une alimentation continue de 100W permet de stocker une énergie de 10J en 100ms. Si on est capable de restituer cette même énergie en 10ns, la puissance délivrée sera de 1GW (figure III-2).

Le stockage inductif est fréquemment utilisé pour produire de très fortes puissances pulsées. Cependant, les commutateurs qui lui sont associés sont à ouverture. Ces commutateurs soulèvent des problèmes technologiques complexes, ils offrent également beaucoup moins de diversité que les commutateurs à fermeture associés au stockage de type capacitif. Le choix important de condensateurs haute tension disponibles sur le marché, la diversité et le prix des commutateurs à fermeture ainsi que l'expérience du laboratoire dans ce domaine sont les principales raisons qui nous poussent à choisir ce type de stockage capacitif pour ces travaux [15].

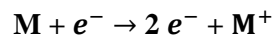
#### ***IV-Tenue diélectrique de l'air :***

Les phénomènes de décharge électrique, étudiés pourtant depuis près de deux siècles, font toujours l'objet de recherche active auprès des scientifiques. On pourrait s'étonner de cet état de fait mais on comprendrait vite que cela n'est dû qu'à la très grande complexité du phénomène et des mécanismes qui le constituent. Cependant de grandes avancées ont été faites ces dernières décennies dans l'amélioration des moyens de diagnostic des premiers instants de la décharge et donc dans l'étude des mécanismes d'initiation. Cela a permis d'accroître les connaissances sur le phénomène [16].

##### ***IV-1- L'avalanche électronique***

L'avalanche électronique constitue le mécanisme de base de toute décharge électrique. Lorsqu'une tension est appliquée entre deux électrodes, un champ électrique est généré. Un électron germe (provenant de rayons cosmiques ou par un phénomène de radioactivité naturelle) présent dans ce champ électrique est mis en mouvement. Il est alors accéléré,

acquérant de l'énergie cinétique qui lui permet d'ioniser des atomes et des molécules par collisions, à condition que son énergie excède leur potentiel d'ionisation. Ainsi [17].



Les deux électrons obtenus par ionisation sont alors accélérés par le champ électrique et peuvent à leur tour ioniser de nouvelles molécules. Townsend a proposé en 1914 l'introduire d'un coefficient d'ionisation  $\alpha$  (appelé premier coefficient de Townsend) pour traduire mathématiquement ce phénomène d'ionisation. Ce coefficient dépend du champ réduit  $E/N$  (avec  $N$  désignant la densité du gaz) et son inverse  $1/\alpha$  représente le libre parcours moyen d'un électron entre deux collisions ionisantes. L'apparition d'un électron primaire au niveau de la cathode se traduit par l'arrivée de  $e^{\alpha \cdot d}$  électrons au niveau de l'anode. Ce processus est appelé « avalanche électronique ». La relation de Townsend s'écrit alors :

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_0 \cdot e^{\alpha \cdot d}$$

Avec  $I$  : courant (A)

$I_0$  : courant initial dû aux électrons primaires (A)

$d$  : distance inter-électrode (m)

$\alpha$  : premier coefficient de Townsend ( $m^{-1}$ )

La probabilité de produire des électrons secondaires se traduit par l'introduction d'un second coefficient de Townsend  $\gamma$ . Le critère d'auto-entretien de la décharge (nombre adimensionnel) s'écrit alors :

$$\gamma \cdot (e^{\alpha \cdot d} - 1) = 1$$

C'est le critère de Townsend [16].

#### **IV-2- Loi de Paschen :**

Les gaz étant en général de bons isolants électriques, comme décrit précédemment, l'application d'une forte tension entre deux électrodes permet de produire des électrons et des ions par collisions, et donc un courant. Pour amorcer la décharge, et donc le passage du courant, il est nécessaire d'atteindre une tension suffisante dite tension de claquage (ou disruptive), qui correspond au champ électrique minimal permettant d'ioniser le gaz. Elle est donnée par les courbes de Paschen :  $U_c = f(p, d)$ , (figure III.3) où  $p$  (torr) est la pression et  $d$  (cm) la distance inter-électrode, dépend de la nature de gaz introduit [17].

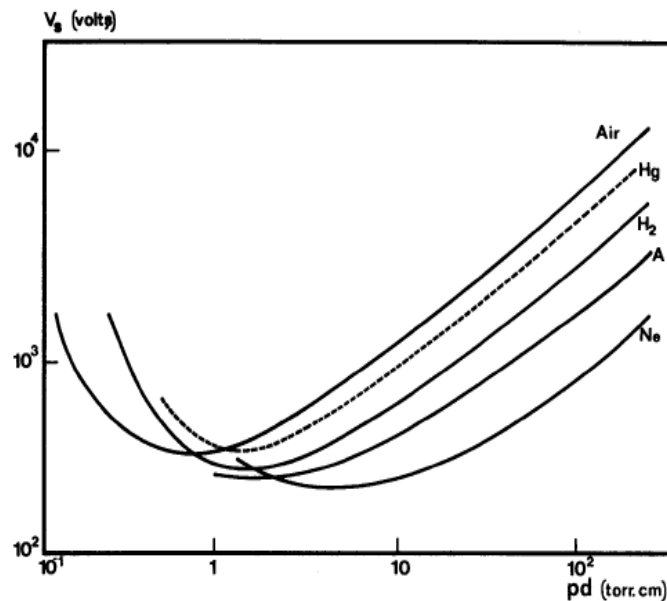


Fig. III-3 : Tension de claquage pour différents gaz en fonction du produit p.d

Cette fonction a été déterminée expérimentalement dans des gaz purs, ou des mélanges gazeux, généralement à de faibles pressions et pour des distances de quelques millimètres ou centimètres.

Ces courbes montrent que  $V_s$  présente un minimum unique, pour une valeur  $(P.D)_{\min}$ . A partir de cette valeur, si l'on augmente le produit P.D, un électron accéléré par le champ électrique aura une probabilité plus grande de rencontrer une molécule du gaz, mais l'énergie moyenne acquise entre deux collisions étant plus faible, la probabilité d'obtenir une collision ionisante diminue, à moins d'augmenter la tension. Si P.D est inférieur à  $(P.D)_{\min}$ , la tension d'amorçage croît également par diminution du nombre de collisions. Pour le cas de l'air, qui nous intéresse ici, et à droite du minimum,  $V_s$  croît à peu près linéairement avec le logarithme de P.D, ce qui revient à dire que le gradient d'amorçage dépend seulement de la pression. Pour les valeurs extrêmes de P.D, on commence à observer des écarts par rapport à la loi de Paschen. Ainsi, pour une valeur donnée de P.D,  $V_s$  n'est plus constant mais commence à décroître quand on diminue la distance entre les électrodes au-dessous d'une certaine valeur : l'influence de l'état de surface et de la nature des électrodes devient prépondérante [14].

Des études plus anciennes, comme celles relatées dans le livre de Meek et Craggs, décrivent la variation de tension de claquage en fonction de la géométrie des électrodes et de leur polarité, comme nous pouvons le voir sur la Figure III-4 [17].

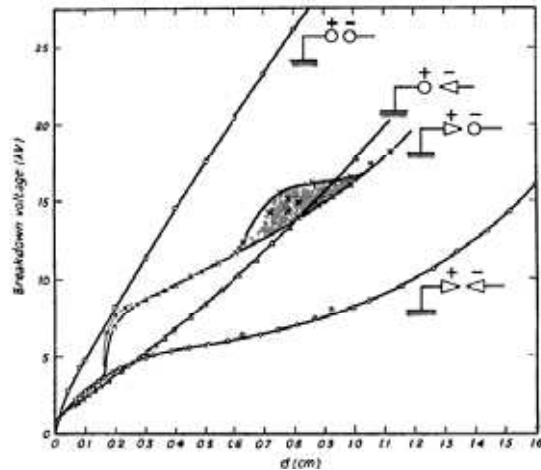


Fig. III-4 : Tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes pour différentes natures d'électrodes.

Le champ électrique est bien plus important localement avec des électrodes en pointe qu'avec des électrodes arrondies. La tension de claquage est donc plus faible pour le premier type d'électrodes que pour le second.

**IV-3- Le streamer :**

Après plusieurs ionisations successives, il existe une petite zone dans laquelle la densité électronique et ionique est supérieure au reste de l'espace inter électrodes. Dans cette zone, la différence de mobilité entre les ions et les électrons entraîne la formation d'un front d'électrons se propageant vers l'anode, suivi d'une « traînée » d'ions quasi-immobiles (Figure III-5 (a)). Cette ségrégation des espèces engendre un champ local de charge d'espace. Cette distorsion induit une augmentation du champ en tête et en queue de l'avalanche avec les électrons se situant en tête et les ions en queue d'avalanche.

Les électrons étant plus mobiles, leur propagation vers l'anode est plus rapide que celle des ions positifs vers la cathode. A ce stade, une zone proche de l'anode est composée d'ions et d'électrons (c'est le canal de décharge), et une zone en tête de ce canal est chargée positivement (Figure III-5(b)).

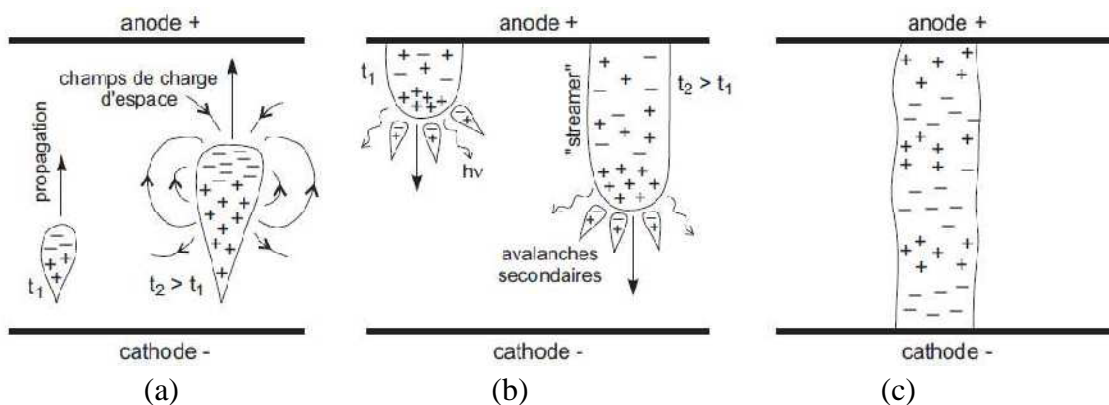


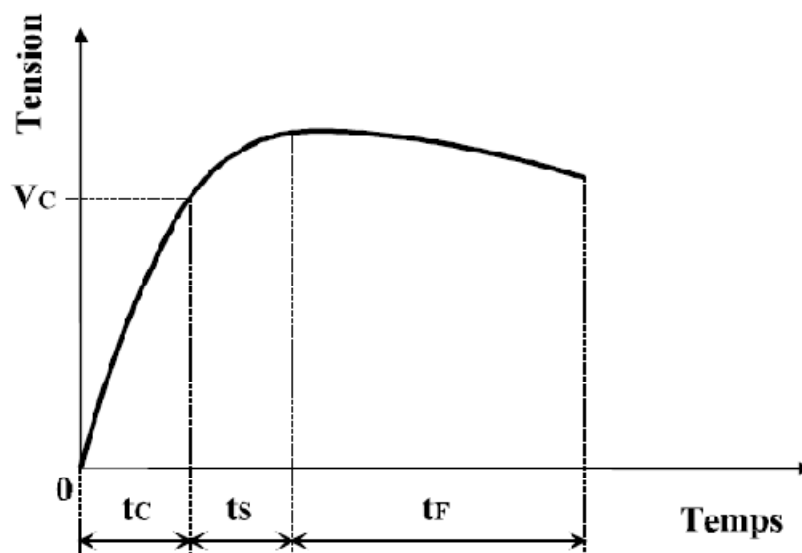
Figure III-5 : Développement d'un canal de décharge filamentaire avec : (a) formation du front d'électrons, (b) Propagation du canal cathode, (c) formation du canal de décharge.

Par ailleurs, un processus d'émission secondaire, attribué à la photo-ionisation dans le gaz, crée des électrons supplémentaires entre la charge d'espace positive de l'avalanche initiale située en tête du canal de décharge et la cathode. Ces électrons secondaires se dirigent très rapidement vers le nuage positif laissé par l'avalanche primaire et s'y raccordent (Figure III-5(b)). Ainsi le canal de décharge s'étend, mais sa tête reste positive. Le canal se propage très rapidement vers la cathode, dans le sens opposé au mouvement des électrons. La décharge est formée lorsque tête et queue de streamer ont atteint respectivement anode et cathode (Figure III-5 (c)).

Nous avons ici décrit le mécanisme d'amorçage le plus courant à la pression atmosphérique : le **streamer**. Les phénomènes de photo-ionisation y jouent un rôle essentiel. Le temps de création d'électrons secondaires est beaucoup plus rapide par photo-ionisation que par émission à la cathode. En effet la photo-ionisation est un processus quasi instantané car il est induit par l'émission de lumière. En revanche pour qu'un électron soit émis de la cathode par bombardement ionique, il faut que cet ion traverse tout l'espace inter électrodes. Dans le cas d'un claquage de type streamer le canal devient conducteur avant que les ions n'atteignent la cathode [17].

#### IV-4-Notion de volume critique :

Pour une configuration d'électrodes et une forme d'onde données, on note que le temps  $T_b$  (time of breakdown), nécessaire au développement complet d'une décharge menant au claquage, présente une dispersion remarquable. Pour comprendre ce phénomène, on peut décomposer ce temps  $T_b$  en trois intervalles (figure III-6).



$t_c$  : temps nécessaire pour que l'impulsion atteigne la valeur critique  $V_c$   
 $t_s$  : temps de retard statistique  
 $t_f$  : temps de retard formatif

**Fig. III-6 : Variation en fonction du temps d'une onde de tension et définition des Principaux temps de retard au claquage ( $T_b = t_c + t_s + t_f$ )**

Les deux premiers intervalles de temps,  $t_c$  et  $t_s$ , sont associés à la naissance de la décharge. Celle-ci nécessite deux conditions :

- un niveau de tension suffisant,  $V_c$  (correspondant au champ critique  $E_c$ ), atteint au bout d'un temps  $t_c$ , compté à partir de l'instant d'application de la contrainte de tension,  
- puis un délai supplémentaire  $t_s$ , nécessaire à l'initiation du premier phénomène de décharge ; lorsque le niveau de tension devient suffisant, c'est en effet l'apparition d'un électron germe, convenablement situé dans une certaine zone de l'intervalle inter-électrodes appelée volume critique, qui initie les premiers processus responsables du déclenchement de la décharge. Ce volume critique est défini de la manière suivante :

- la valeur du champ électrique dans le volume doit être telle que :  $\alpha - \eta > 0$ ,
- l'avalanche électronique issue d'un électron germe situé dans le volume doit parcourir une distance suffisante pour s'amplifier et dégénérer en un streamer.

Ces deux conditions permettent de définir les frontières du volume critique. En champ uniforme, dès que  $E > E_c$ , tout l'intervalle d'étude correspond au volume critique.

Si le premier intervalle de temps,  $t_c$ , peut être déterminé en fonction de la forme de l'onde de tension appliquée, en particulier de son front de montée, le second,  $t_s$ , appelé temps de retard statistique, est en revanche de nature tout à fait aléatoire.

Le troisième intervalle de temps,  $t_F$ , appelé temps formatif, est le temps nécessaire à la décharge pour se propager d'une électrode à l'autre et réaliser la mise en court-circuit des deux électrodes. Cependant, le régime de décharge peut également présenter un caractère aléatoire qui se répercute sur la valeur de  $t_F$ . On comprend donc que le temps  $T_b = t_c + t_s + t_F$  puisse varier considérablement dans des conditions expérimentales identiques.

On peut aussi comprendre qu'en champ non uniforme, le développement de la décharge puisse ne pas être total à chaque fois : si la valeur crête,  $V_M$ , de la tension appliquée n'est pas suffisamment élevée, la décharge ne parvient pas à mettre en court-circuit les deux électrodes et le claquage n'est pas réalisé. On parle alors de « tenue », le diélectrique ayant « tenu » la contrainte. Au contraire, pour des valeurs élevées de  $V_M$ , tous les chocs mènent au claquage. Pour des valeurs intermédiaires, le nombre d'amorçages (ou claquages), pour un ensemble d'essais identiques, est encore une grandeur aléatoire. Seule une étude statistique permet d'établir, à  $V_M$  constante, la probabilité d'amorçage d'un intervalle donné. Ainsi, on appelle  $U_{50}$  la valeur de la tension crête conduisant à une probabilité de rupture diélectrique égale à 0,5. La détermination expérimentale de  $U_{50}$  nécessite une étude statistique [14].

### ***IV-5- L'électron germe***

Il existe deux principaux modes de production d'électrons germes :

#### ***IV-5-1- Le détachement à partir d'ions négatifs présents dans le gaz :***

L'origine de l'électron germe, susceptible d'initier la décharge, est attribuée aux ions négatifs présents dans le gaz, ces derniers pouvant disparaître par l'intermédiaire de mécanismes très divers (collision, effet de champ...) qui conduisent toujours au détachement de l'électron de la molécule ou de l'atome.

#### ***IV-5-2- La production par émission cathodique :***

Deux paramètres régissent l'émission d'électrons à la surface des métaux : la température et le champ électrique. La présence d'un champ électrique à la surface de l'électrode modifie la barrière de potentiel. Le travail de sortie du matériau est légèrement abaissé et un nombre important d'électrons peut s'extraire du métal par effet tunnel. Une émission par effet de champ à partir d'une cathode froide peut être envisageable pour des champs de l'ordre de  $10^7 \text{V.m}^{-1}$  [14].

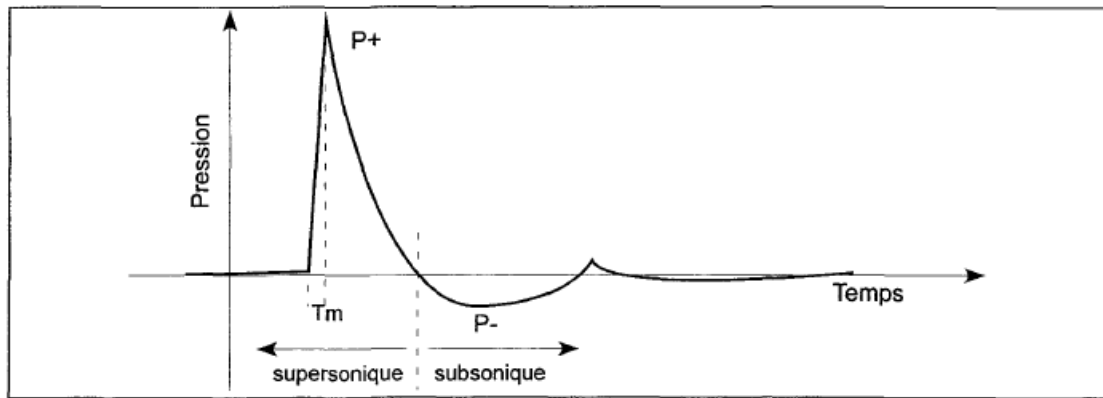
### ***V-Génération des ondes de choc :***

De façon générale, une onde de choc est produite dans un milieu de deux façons différentes, soit : lorsqu'un objet rigide se déplace plus rapidement que la vitesse du son dans le milieu où il se trouve, ou encore lorsqu'il se produit une variation supersonique du volume du milieu comme dans le cas d'une explosion.

#### ***V-1- Onde de choc :***

##### ***Définition :***

Une onde de choc se reconnaît facilement sur un graphique pression-temps à cause de sa forme en « N » (voir Figure 1). Elle est constituée d'une surpression supersonique (P+), suivie d'une raréfaction subsonique (P-). En fait, comme la vitesse de chacun des points du profil de l'onde est différente, la forme du profil varie au cours du temps, ce qui explique la dispersion rapide de l'onde de choc. Le temps de montée en surpression (T<sub>m</sub>) est de l'ordre d'une ou deux microsecondes dans l'air. Ces variations brusques de pression à l'intérieur du matériau sont susceptibles d'entraîner sa rupture en régime fragile.



**Fig. III-7: profil de l'onde de choc.**

### ***V-2- Différentes méthodes utilisées pour la génération des ondes de choc :***

Plusieurs techniques sont utilisées en laboratoire pour produire des ondes de choc et le choix dépend surtout de l'état du milieu (solide, liquide ou gazeux) et de l'application visée. On décrira dans ce qui suit de façon brève les méthodes les plus importantes, pour s'étaler par la suite de manière plus détaillée sur la méthode la plus utilisée, à savoir : le stockage de l'énergie électrique sous forme capacitive.

#### ***V-2-1- Milieu solide :***

Dans le cas d'un milieu solide la production d'ondes de choc se fait en utilisant des impacteurs, des explosifs et des impulsions laser en surface.

#### ***V-2-2- Milieu liquide :***

Dans un milieu liquide, les possibilités sont plus variées, on peut utiliser des dispositifs piézo-électriques, des alliages magnétostrictifs, des pistons électromagnétiques, des décharges électriques ou encore des explosifs.

#### ***V-2-3- Milieu gazeux :***

Dans les gaz, leur génération s'effectue surtout à l'aide de tubes à chocs. Il serait fastidieux d'énumérer tous les types de tubes à chocs. Disons simplement qu'ils sont principalement constitués d'une chambre d'essai où la pression est faible et d'une chambre à moteur où le gaz se trouve en surpression. Une mince pellicule métallique sépare les deux chambres et c'est la disparition rapide de cette pellicule qui permet l'écoulement supersonique du gaz moteur dans la chambre d'essai engendrant du même coup une onde de choc. La prise de mesure s'effectue dans la chambre d'essai.

### V-2-4- Décharge électrique entre deux électrodes :

Lors d'une décharge électrique entre deux électrodes dans l'air libre, un arc est produit. L'apparition brusque de cet arc engendre une augmentation rapide de volume produisant une onde de pression sphérique. Le front de cette onde de pression se déplace à une vitesse supersonique, c'est donc une onde de choc. La hauteur du pic de pression de cette onde est fonction du voltage appliqué. Par contre la profondeur de la partie en raréfaction est limitée par la pression atmosphérique. En décharge libre, le voltage de décharge est principalement fonction de l'écartement des électrodes, du niveau d'ionisation de l'air et dans une moindre mesure de l'humidité, la pression, la température et la teneur en aérosol [18].

### V-3- Propagation de la décharge électrique

Le schéma ci-dessous représente la propagation de la décharge électrique subsonique à travers les bulles de gaz, qui dans ce cas est l'air, de l'électrode de haute tension à celle de la masse.

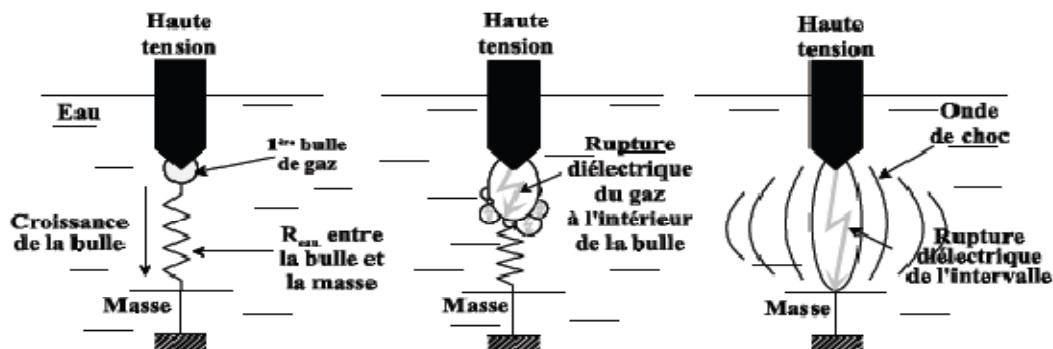


Figure III-8: Schéma d'une décharge électrique subsonique.

Dès que l'énergie emmagasinée par les condensateurs est délivrée, cette dernière sert principalement à chauffer l'eau qui se trouve au voisinage de l'électrode de haute tension, du fait de la géométrie de celle-ci. Il y a alors création d'une bulle de gaz, soit de la vapeur d'eau, près de la pointe où on retrouve un champ électrique assez élevé, soit supérieur au claquage de l'air contenu dans la bulle d'air formée. D'après la théorie, de la lumière ultraviolette et infrarouge émane de l'arc créé par le claquage du diélectrique, ce qui signifie que les températures ainsi atteintes sont assez grandes pour chauffer l'intérieur de la bulle ainsi que son pourtour, ce qui permet alors de créer de nouvelles bulles. L'arc électrique est alors reporté à l'extrémité de l'autre bulle et peut ainsi continuer de se propager jusqu'à atteindre l'électrode à la masse. Une telle propagation est lente et la tension décroît au fil du temps. Ce qui entraîne deux conséquences possibles lors de ce phénomène :

Soit il n'y a pas assez de tension, ou d'énergie, afin que d'obtenir des claquages et la formation de nouvelles bulles, alors le phénomène arrête.

Soit le phénomène se propage jusqu'à atteindre le plan (l'électrode à la masse) et il y a rupture diélectrique complète du milieu [19].

#### V-4- Schéma de base pour génération des tensions de choc :

Pour obtenir aux bornes de l'objet en essai une onde unidirectionnelle à front raide, on utilise généralement le schéma suivant :

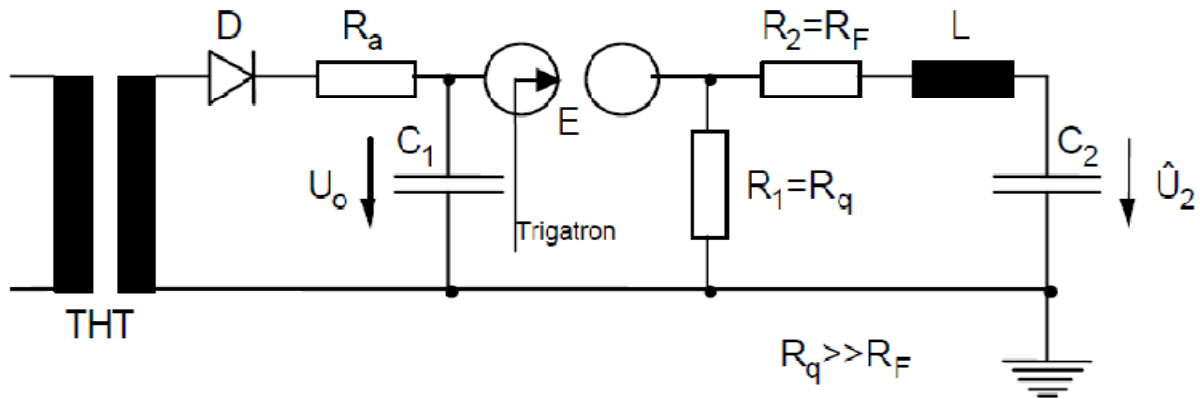


Fig. III-9: schéma -essai de choc

$C_1$  = capacité de choc

$C_2$  = capacité de l'objet en essai + capacité du diviseur de tension

$R_1$  = résistance de queue d'onde (parallèle)

$R_2$  = résistance front d'onde (série)

$L$  = self-inductance du circuit, due aux dimensions et composants physiques

La condition d'apériodicité  $R^2 > 4 \frac{L}{C}$  doit être remplie pour avoir une onde unidirectionnelle correcte.

Le condensateur  $C_1$  se charge par l'intermédiaire du transformateur haute tension THT associé à la diode D. La résistance d'amortissement  $R_a$  empêche une charge trop rapide. Constante de temps lors du processus de charge  $\tau = R_a \cdot C_1$ . ( $\tau$  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 de la résistance de front  $R_2$ . La résistance de queue d'onde  $R_1$  étant beaucoup plus grande que  $R_2$ , les capacités  $C_1$  et  $C_2$  vont se décharger ensuite plus lentement dans cette résistance  $R_1$  [4].

## V-5- Le générateur de Marx :

### V-5-1- Introduction :

Le générateur de Marx fait partie de la famille des générateurs qualifiés de « Multiplicateurs de tension » et capables de produire des impulsions haute tension (de quelques kilovolts à quelques mégavolts), de forme bi exponentielle, par addition de plusieurs moyennes tensions.

Son principe de fonctionnement a été décrit pour la première fois par Erwin Marx, en 1924. Le générateur de Marx trouve la plupart de ses applications lorsqu'une énergie importante doit être mise en œuvre sous une tension élevée en un temps court, généralement en régime d'impulsion unique. Mais aujourd'hui, le générateur de Marx commence à s'implanter de plus en plus dans des applications à caractère récurrent. Il est probablement une des solutions les plus simples et économiques pour produire des impulsions haute tension. En effet, les condensateurs de capacité significative capables de supporter des tensions supérieures à 200kV deviennent rapidement volumineux et coûteux ; il en est de même des alimentations susceptibles de les charger. Les avancées technologiques, surtout au niveau des condensateurs, ont permis de faire des progrès considérables dans l'intégration de ces générateurs impulsionsnels. Ces générateurs de Marx sont constitués d'un certain nombre d'étages dans lesquels il est possible de réaliser des associations en série des condensateurs pour résoudre des problèmes de tenue en tension et/ou en parallèle pour augmenter l'énergie stockée (à tension donnée) ou le courant délivré pendant la décharge.

Dans cette technologie Marx, les étages de condensateurs sont chargés en parallèle à une tension  $V_0$  ; ensuite, des commutateurs sont activés de telle sorte qu'ils connectent tous les étages en série. La tension théorique de sortie atteint une amplitude égale à  $N \times V_0$  où  $N$  est le nombre d'étages. Il n'y a pas de limitation dans le nombre d'étages à commuter, donc aucune limitation de principe dans l'amplitude de la tension de sortie.

Le générateur de Marx est conçu de telle sorte que la commutation de chaque commutateur produise un régime transitoire capable de provoquer celle du (ou des) commutateur(s) suivant(s). En général, la commutation complète de ces générateurs se fait en un temps compris entre quelques nanosecondes et quelques microsecondes, avec des jitters minimisés lorsque le système fonctionne en mode déclenché. Ils peuvent délivrer leur énergie pendant un temps dépendant de la valeur de leur capacité, donc de l'énergie stockée par étage, de l'inductance totale du générateur et enfin de résistances dites « de queue ». Cette durée peut varier de la centaine de nanosecondes à quelques millisecondes ; l'amplitude de la tension décroît de façon exponentielle durant cette phase.

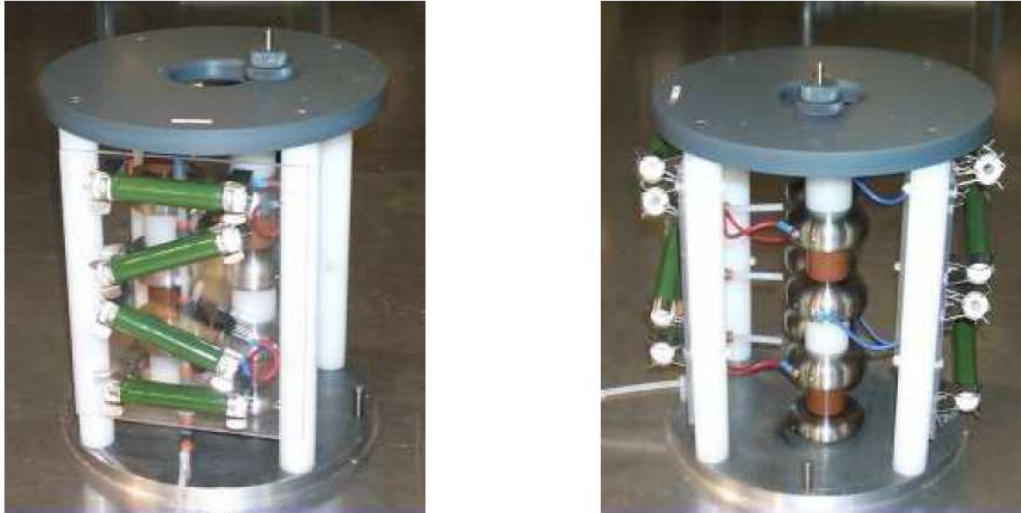
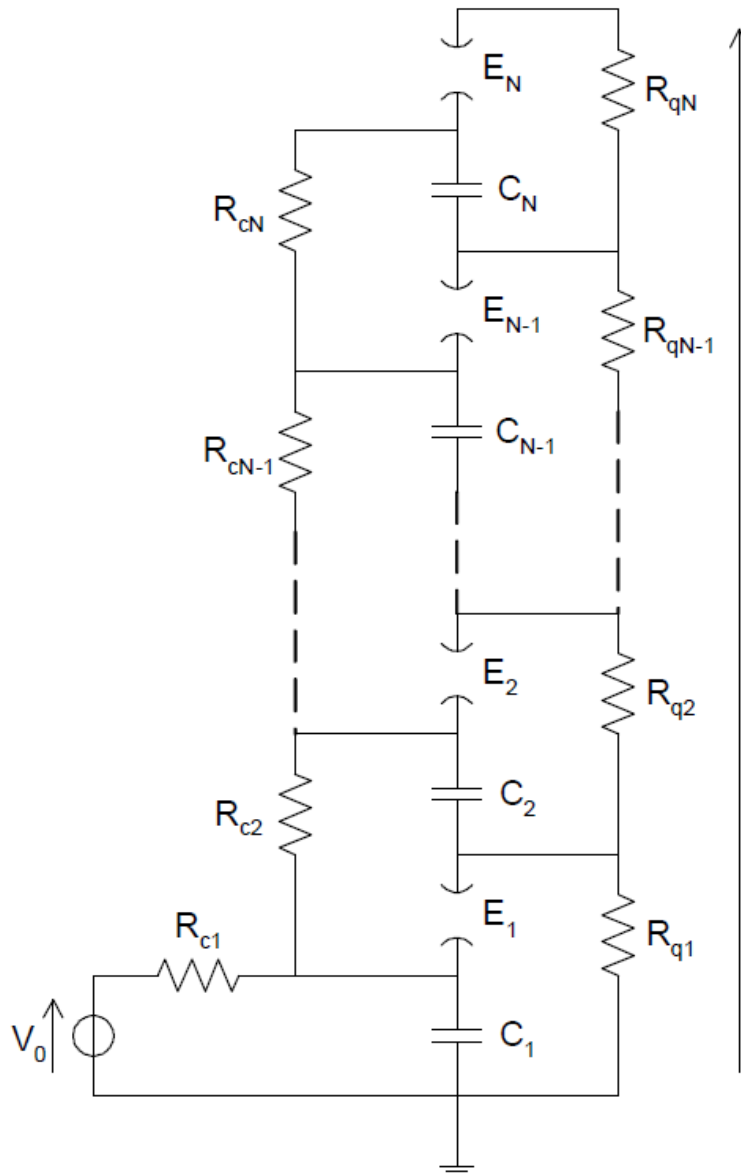


Fig. III-10: Générateur de Marx à 4étages-200kV

#### V-5-2- Principe de fonctionnement :

##### Principe :

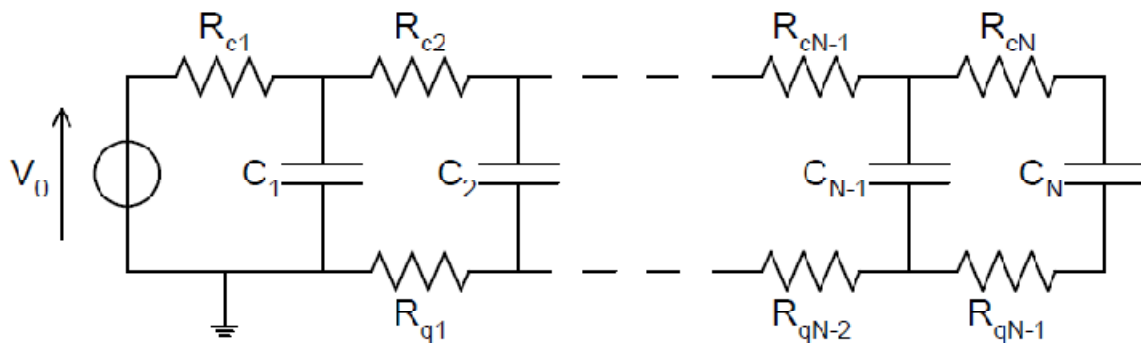
Le principe du générateur de Marx consiste à charger, à une même tension  $V_0$ ,  $N$  étages de condensateurs, ou de bancs de condensateurs, associés en parallèle puis à les associer en série pour les décharger dans la résistance d'utilisation. La tension aux bornes de celle-ci est, alors,  $N \times V_0$ . L'onde de tension alors générée est de forme bi-exponentielle et la mise en série des  $N$  étages est assurée par la fermeture des  $N$  commutateurs. Le circuit élémentaire d'un générateur de Marx  $N$  étages est représenté figure III-11. Chaque étage est, ici, composé d'un condensateur (C), d'une résistance de charge ( $R_c$ ), d'une résistance de queue ( $R_q$ ) et d'un commutateur (E) [15].



**Fig. III.11 : Générateur de Marx à N étages**

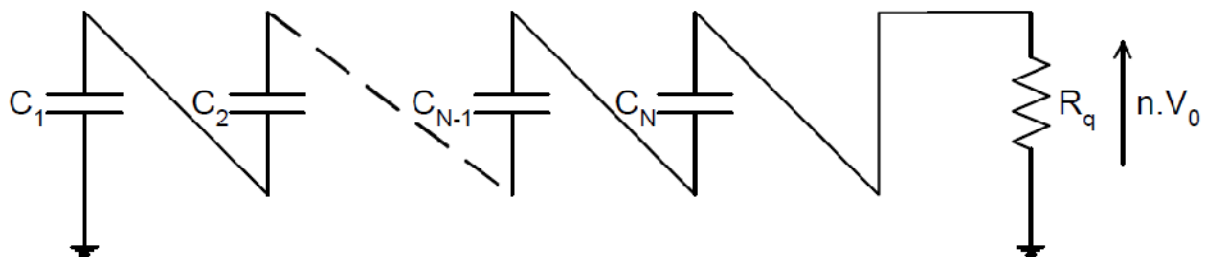
Chaque condensateur  $C_i$  de chacun des étages est chargé à la tension  $V_0$  à travers une impédance de charge  $Z_{c,i}$  (qui est souvent une résistance  $R_{c,i}$  dont la valeur est choisie en fonction de la puissance de l'alimentation délivrant la tension  $V_0$ ). A partir du second étage, la charge se fait aussi par l'intermédiaire de résistances  $R_{q,i}$ , qui ont un double rôle : référencer, par rapport à la masse, une des électrodes des condensateurs puis, permettre la décharge de ces derniers, notamment quand l'utilisation présente, au départ, une impédance infinie (tube, réacteur à plasma...). La valeur de ces résistances est ajustée en fonction de la forme de l'onde que l'on veut générer, notamment de son temps de décroissance.

Lors de la charge des condensateurs, le circuit équivalent aux générateurs de Marx peut être représenté par la figure III-12



**Fig. III-12 :** Circuit équivalent du générateur de Marx lors de la phase de charge des condensateurs

Et, lors de la décharge, toujours dans l'hypothèse d'une impédance d'utilisation de valeur infinie, par le schéma de la figure III-13 ( $R_q = \Sigma R_{q,i}$ ).



**Fig. III-13 :** Circuit équivalent du générateur de Marx lors de la phase de décharge des condensateurs

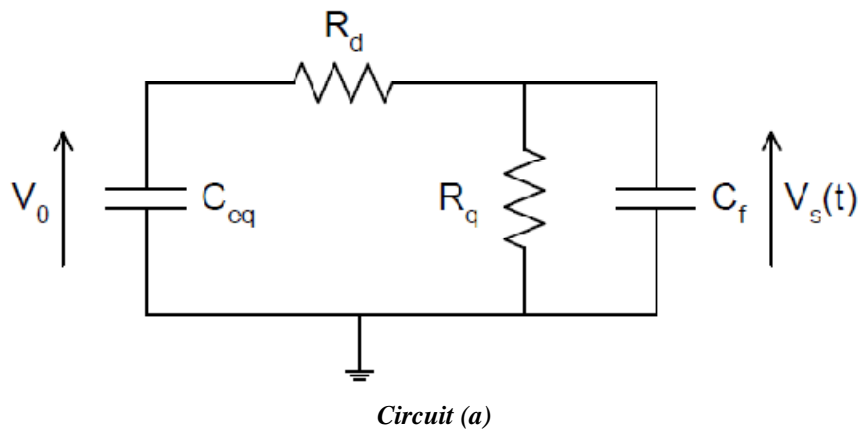
Ce circuit génère donc une impulsion de tension de temps de montée nul et dont la décroissance s'effectue de façon exponentielle, contrôlée par  $\tau = C_{eq} \cdot R_q$  ( $C_{eq} = C_i/n$ ). Dans la pratique, ce n'est pas le cas, tout d'abord parce que des éléments parasites interviennent toujours et modifient, notamment, la valeur du temps de front mais, également, parce que, dans la plupart des applications, on doit appliquer une onde dont le temps de front et la largeur à mi-hauteur ont des valeurs imposées et, enfin, parce que ces applications, via leurs impédances propres, modifient parfois le circuit de décharge du générateur. Dans tous les cas l'application présentera, au minimum, une capacité, notée  $C_f$  dans les circuits suivants,

et qui peut représenter la capacité du dispositif de mesure et/ou celle du réacteur ou du système sur lequel est appliquée l'onde de tension.

En fait, on peut classer les générateurs de Marx en deux grandes catégories liées à l'énergie qu'ils sont susceptibles de délivrer et qui conditionne leur architecture :

### V-5-3- Les générateurs délivrant de fortes énergies ( $> 10\text{kJ}$ ) :

Ils sont, généralement, de grandes dimensions et les arcs qui apparaissent entre les électrodes de leurs éclateurs sont très énergétiques. Des selfs parasites, de valeurs relativement importantes, apparaissent donc et conduisent à des oscillations de tension dont les amplitudes inverses peuvent être préjudiciables pour les condensateurs de puissance. Dans ce type de générateurs, on a donc l'habitude d'ajouter, en série avec les éclateurs, des résistances d'amortissement,  $R_{d,i}$ , de faibles valeurs, de telle sorte que le schéma équivalent du générateur de Marx, lors de sa décharge, est celui représenté figure III-14 ( $R_d = \sum R_{d,i}$  et selfs non représentées).



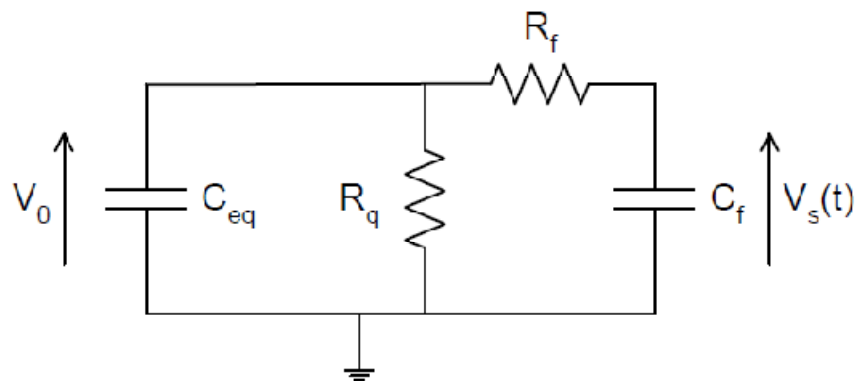
**Fig. III-14 : Circuit équivalent d'un générateur de Marx forte énergie lors de sa phase de décharge**

On note que les résistances  $R_d$  et  $R_q$  créent un pont diviseur qui joue défavorablement sur l'amplitude de la tension de sortie. De plus, la valeur du temps de front est commandée, en partie par celle de  $R_d$  et un changement de configuration de l'onde du générateur nécessite celui de toutes les résistances  $R_{d,i}$ .

### V-5-4- Les générateurs de Marx délivrant de moyennes ou faibles énergies :

Dans ce cas, les résistances  $R_{d,i}$  ne sont plus nécessaires. Pour régler simplement la valeur du front de l'onde de tension, on utilise, généralement, une « résistance de front »,  $R_f$ , et un « condensateur de front »  $C_f$ , qui peut être simplement constitué par la capacité du

diviseur utilisé pour mesurer la forme d'onde. Le schéma équivalent du montage est alors celui représenté figure III-15.



Circuit (b)

Fig. III-15 : Circuit équivalent d'un générateur de Marx faible énergie lors de sa phase de décharge

➤ **Remarque :**

Il existe, en fait, une troisième catégorie de générateurs de Marx : celle des générateurs rapides ( $T_f < \text{quelques dizaines de nanosecondes}$ ). Elle nécessite une approche très différente et n'est pas abordée ici [14].

**V-5-5- Equation de la forme d'onde :**

**V-5-5-1- Domaine de Laplace :**

Dans le but d'avoir un rendement élevé les générateurs de choc sont construits de façon prédominante dans la forme du circuit (b). La forme du choc est calculée de la façon suivante (se référer à la figure {III-15})

On a d'après la figure (III-15) :

$$V_0 - \frac{1}{C_{eq}} \int_0^t (i_q + i_f) dt = R_q i_q = R_f i_f + V_s(t) \longrightarrow A$$

$$\text{Tel que: } i_f = C_f \frac{dV_s(t)}{dt} \text{ avec } V(t=0) = 0$$

L'équation différentielle (A) se résout par application de la transformée de Laplace, donc on aura :

$$\frac{V_0}{P} - \frac{1}{PC_{eq}} (I_q + PC_f V_s) = R_q i_q = V_s (PR_f C_f + 1)$$

On résolvant pour  $V_S = V_S(p)$  on aura :

$$V_S(P) = \frac{V_0}{R_f C_f} \frac{1}{P^2 + bP + c}$$

Où :

$$b = \frac{1}{R_q C_{eq}} + \frac{1}{R_f C_{eq}} + \frac{1}{R_f C_f}$$

$$c = \frac{1}{R_f C_f R_q C_{eq}}$$

Les deux racines de l'équation suivante :

$$P^2 + bP + c = 0 \quad @$$

Seront donc :

$$P_{1,2} = \frac{b}{2} \left( -1 \pm \sqrt{1 - \frac{4c}{b^2}} \right)$$

Ces racines sont toujours réelles et négatives, et l'application de la transformée de Laplace inverse à l'équation  $\{V_S(p)\}$  nous donne :

$$V_S(P) = \frac{V_0}{R_f C_f} \frac{1}{P_1 + P_2} (e^{P_1 t} - e^{P_2 t})$$

Avec :

$$T_1 = -\frac{1}{P_1}, T_2 = -\frac{1}{P_2}$$

Avec toute les approximations  $R_q C_{eq} \gg R_f C_f$ , les solutions de l'équation @ seront donc :

$$P_1 \approx -\frac{1}{R_q(C_{eq} + C_f)}, \quad T_1 \approx R_q (C_{eq} + C_f)$$

$$P_2 \approx -\frac{1}{R_f} \left( \frac{C_{eq} + C_f}{C_{eq} C_f} \right), \quad T_2 \approx R_f \left( \frac{C_{eq} C_f}{C_{eq} + C_f} \right)$$

De même, pour le circuit de la figure (14.a) avec l'hypothèse  $R_q C_{eq} \gg R_d C_f$  :

$$T_1 \approx (R_d + R_q)(C_{eq} + C_f)$$

$$T_2 \approx \frac{R_d R_q}{R_d + R_q} \frac{C_{eq} C_f}{C_{eq} + C_f}$$

V-5-5-2- Domaine du temps :

En revenant au domaine du temps en appliquant la transformée de Laplace inverse on aura donc l'expression suivante :

$$V_S(t) = \frac{V_0}{R_f C_f} \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \left[ e\left(-\frac{t}{T_1}\right) - e\left(-\frac{t}{T_2}\right) \right] \quad (V.1)$$

Qui montre que l'impulsion de sortie résulte de la différence de deux exponentielles (d'où l'appellation d'onde bi-exponentielle) de constantes de temps  $T_1$  et  $T_2$  (figure III-16). Cette onde est caractérisée par son temps de front  $T_f$  et sa durée à mi-hauteur  $T_q$ . [1]

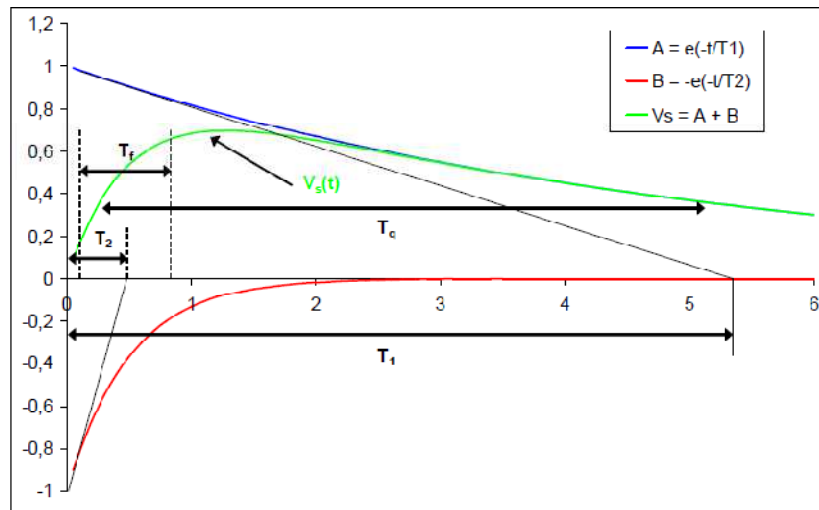


Figure III-16 : Allure de la tension de choc « bi-exponentielle »

En résumé, et pour le circuit (b) et toujours en tenant compte de l'approximation  $R_q C_{eq} \gg R_f C_f$  on aura :

Constante de temps de l'exponentielle supérieure :

$$T_1 \approx R_q (C_{eq} + C_f)$$

Constante de temps de l'exponentielle inférieure :

$$T_2 \approx R_f \left( \frac{C_{eq} C_f}{C_{eq} + C_f} \right)$$

**V-5-6- facteur de proportionnalité :**

La forme de choc est décrite uniquement par  $T_1$  et  $T_2$ , par conséquent les caractéristiques de la figure (III-16) peuvent aussi s'exprimer en fonction de  $T_1$  et  $T_2$ .

Les constantes de temps  $T_1$  et  $T_2$  sont liées aux caractéristiques de l'onde de choc par des facteurs qui dépendent seulement de  $T_f$  et  $T_q$ .

Les valeurs de ces facteurs de proportionnalité pour formes standards les plus importantes sont données sur le tableau ci-dessous [1].

$T_1/T_2$	1.2/5	1.2/50	1.2/200
$k_1$	1.44	0.73	0.70
$k_2$	1.49	2.96	3.15

**Tableau III- : Valeurs des facteurs de proportionnalité pour différentes formes des ondes de choc**

Les expressions analytiques de  $T_q$  et de  $T_f$  en fonction de  $T_1$  et de  $T_2$  n'ont pas de solution générale et doivent être traitées au cas par cas. Ainsi par exemple, pour une onde de choc (1.2 /50 $\mu$ s) :

$$T_f = 2.96 T_2, \quad T_q = 0.73 T_1$$

**V-5-7- Rendement d'un générateur d'onde de choc :**

A partir de l'équation de la tension de sortie  $V_s(t)$  (équation V.1), on peut calculer les coordonnées,  $T_M$  et  $V_M$ , du maximum de tension, soit, en posant  $X = T_1 / T_2$  :

$$T_M = \frac{T_1}{X-1} \ln X \qquad V_M = V_0 \left[ X \left( \frac{1}{1-X} \right) - X \left( \frac{X}{1-X} \right) \right]$$

On peut alors tracer la courbe du rendement en tension donné par  $\rho = V_M/V_0$  en fonction du rapport  $X = T_1 / T_2$  (figure III-17).

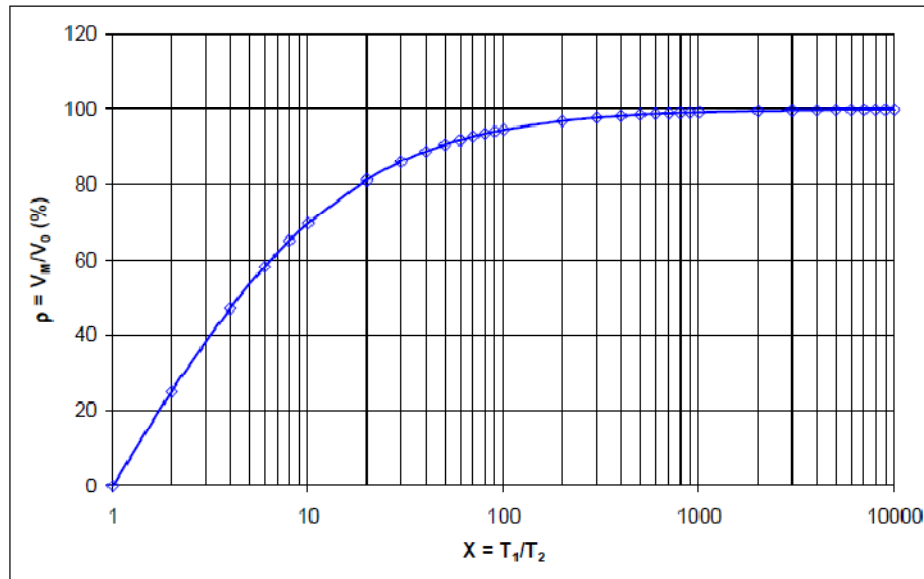


Figure III-17 : Courbe du rendement en fonction du rapport  $T_1/T_2$ .

Plus la valeur de  $X = T_1 / T_2$  est importante, meilleure est celle du rendement en tension du générateur. On peut considérer que ce rendement atteint 100% lorsque  $T_1 / T_2 > 1000$ .

**V-5-8- Bilan énergétique et charge disponible :**

Il est également intéressant d'effectuer un bilan de l'énergie et des charges mises en jeu lors de la transition série/parallèle des condensateurs du générateur. En effet, l'association en série des condensateurs provoque une annulation des charges stockées de polarités opposées dans les condensateurs intermédiaires : seules les deux plaques extérieures du montage en série conservent leurs charges.

Dans la phase de charge, les n condensateurs sont associés en parallèle et la charge stockée dans le montage s'écrit :

$$Q = n CV_0 \tag{2.3}$$

Ce qui correspond à une énergie emmagasinée de :

$$W = \frac{1}{2} nCV_0^2 \tag{2.4}$$

Dans la phase de décharge, la tension de sortie  $V_s$  vaut, au rendement près :

$$V_s = nV_0 \tag{2.5}$$

Et la charge restituée à la commutation:

$$Q = \frac{C}{n} nV_0 = CV_0 \quad (2.6)$$

Soit une énergie restituée à la commutation :

$$W = \frac{1}{2} \frac{C}{n} n^2 V_0^2 = \frac{1}{2} nCV_0^2 \quad (2.7)$$

L'énergie emmagasinée est, en théorie, totalement restituée (au rendement du montage près), alors que la charge fournie en sortie du générateur n'équivaut qu'à celle d'un seul condensateur [14].

### V-5-9- La commutation des éclateurs :

Le fonctionnement d'un générateur de Marx à éclateurs à gaz, suivant le schéma classique de la figure II-2, est très sensible au déclenchement de ces derniers. Dans ce type de configuration, chaque étage est référencé à l'étage inférieur par l'intermédiaire d'une résistance. Le déclenchement des éclateurs est directement lié à la différence de potentiel qui apparaît instantanément à leurs bornes. Prenons l'exemple du générateur de Marx trois étages schématisé sur la figure III-17 [15] :

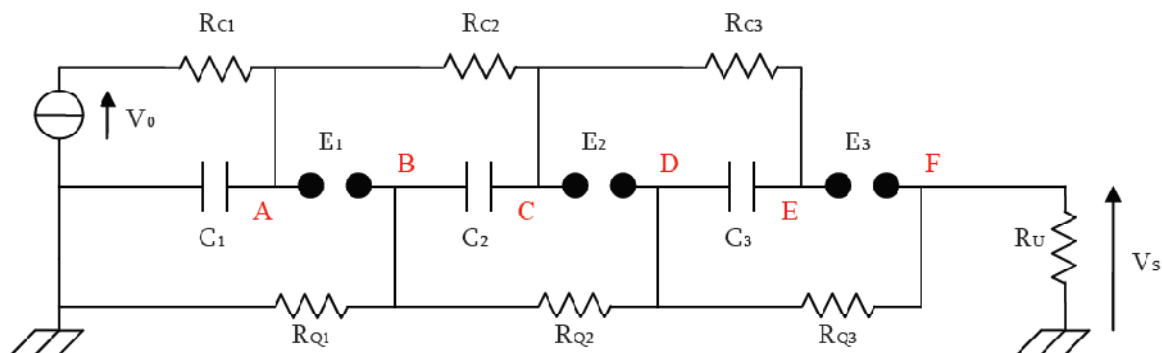


Figure III-17 : Générateur de Marx 3 étages à structure classique

De façon idéale, le principe de fonctionnement d'un tel générateur est le suivant : Les trois condensateurs  $C_1$ ,  $C_2$  et  $C_3$  sont chargés simultanément à la même tension  $V_0$ . Les points A, C et E sont portés au potentiel  $V_0$ . Les points B, D et F restent au potentiel nul. Le premier éclateur commute (son déclenchement est réalisé par un apport d'énergie externe ou un réglage de la distance entre électrodes inférieure à celle des autres éclateurs) : le potentiel du point B passe de 0 à  $V_0$  et celui du point C de  $V_0$  à  $2V_0$ . Le second éclateur commute à son tour car la différence de potentiel à ses bornes dépasse alors  $V_0$ . Le potentiel du point D atteint  $2V_0$  et le potentiel du point E atteint  $3V_0$ . L'amplitude de la tension aux bornes de  $R_u$  atteint  $3V_0$ .

***VI-Conclusion :***

Ce troisième chapitre a été consacré à l'étude de principe de fonctionnement de générateur d'ondes de choc, qui est basé sur le stockage de l'énergie sous forme capacitive (source) suivi de sa commutation brutale sur une charge (utilisation), et les différentes méthodes utilisées pour la génération des ondes de choc.



*CHAPITRE IV*

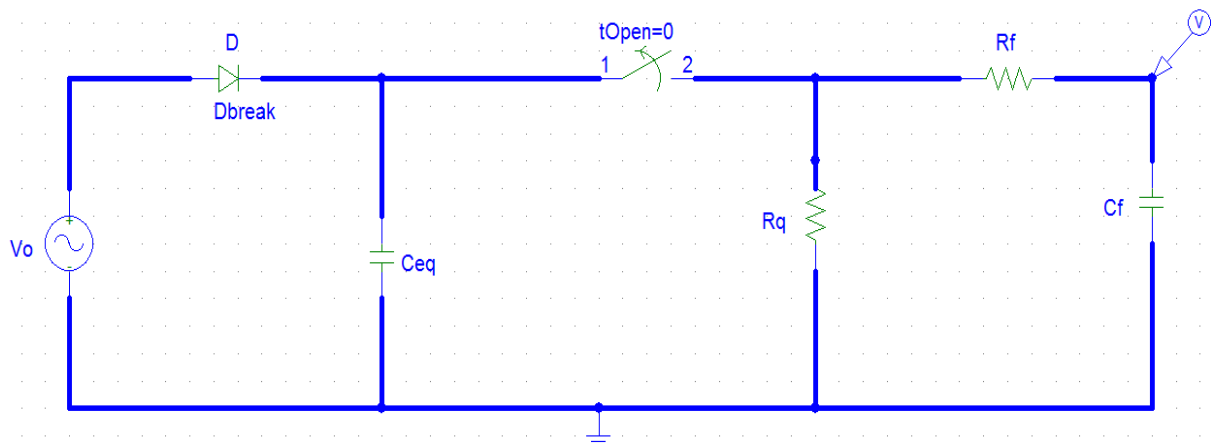
*SIMULATION*  
*ET RÉALISATION*  
*PRACTIQUE*

## I- Introduction :

Afin de valider les calculs théoriques, nous avons effectué une simulation à l'aide du logiciel *PSpice*. Lors de cette simulation, la source utilisée est une source de tension alternative. En réalité, le générateur est alimenté à l'aide du transformateur, haute tension THT associé à la diode D, et l'éclateur est remplacé par un interrupteur (Sw\_tOpen) disponible dans la bibliothèque de *PSpice* mais lorsque l'on simulait à l'aide de la source réelle, des pertes à la sortie du transformateur étaient visibles et ne reflétaient pas la réalité. De plus, nous ne connaissons pas les paramètres du transformateur. En insérant une source de tension alternative comme alimentation lors de nos résultats, on s'assure que notre condensateur soit alimenté sans aucune perte.

## II- Simulation du schéma de base :

Le circuit simulé est illustré par la figure IV-1



**Fig. IV-1 : Schéma du montage simulé.**

Si l'on simule, figures IV-1, à l'aide du logiciel *PSpice*, le montage de la figure VI-1, on met en évidence le rôle du circuit de mise en forme, constitué de  $C_f$  et de  $R_f$ , par la modification des caractéristiques de l'impulsion délivrée en sortie du commutateur E ; ainsi, l'onde délivrée présente un temps de front  $T_f$  et une durée à mi-hauteur  $T_q$ .

Les valeurs des composants utilisés dans le premier essai sont les suivants :

- Capacité de choc :  $C_{eq}=14\text{nF}$ .
- Capacité de charge :  $C_f=35\text{nF}$ .
- Résistance de front :  $R_f=120\Omega$
- Résistance de queue :  $R_q=1000\Omega$

Nous avons par la suite fait varier  $R_f$  pour mettre en évidence son influence sur  $T_f$  en gardant  $R_q$  constante, et on fait varier  $R_q$  en gardant  $R_f$  constante pour montrer son influence sur  $T_q$ .

**II-1- Calcul du temps de queue :**

D'après la formule :

$$T_1 \approx R_q(C_{eq} + C_f) = 1000(14 \cdot 10^{-9} + 35 \cdot 10^{-9}) = 49\mu s$$

$T_1$  : Constante de temps de l'exponentielle supérieure.

D'après le tableau (III) et étant donné que cette valeur est proche de  $50\mu s$  on utilise les coefficients de normalisation de l'onde  $1,2/50\mu s$ , on aura donc :

$$T_q = k_1 T_1 \text{ tel que } k_1 = 0,73.$$

$$\text{D'où : } T_q = 0,73 \cdot 49 = 35,77\mu s.$$

Donc le temps de queue :

$$T_q = 35,77\mu s$$

**II-2- Calcul du temps de front :**

D'après la formule (III) on a :

$$T_2 = R_f \left( \frac{C_{eq} \cdot C_f}{C_{eq} + C_f} \right) = 120 \left( \frac{14 \cdot 10^{-9} \cdot 35 \cdot 10^{-9}}{14 \cdot 10^{-9} + 35 \cdot 10^{-9}} \right) = 1,2\mu s$$

$T_2$  : Constante de temps de l'exponentielle inférieure.

Du tableau (III) on a :

$$T_f = k_2 \cdot T_2 \text{ et on tire : } k_2 = 2,96.$$

$$\text{D'où : } T_f = 2,96 \cdot 1,2 = 3,55\mu s.$$

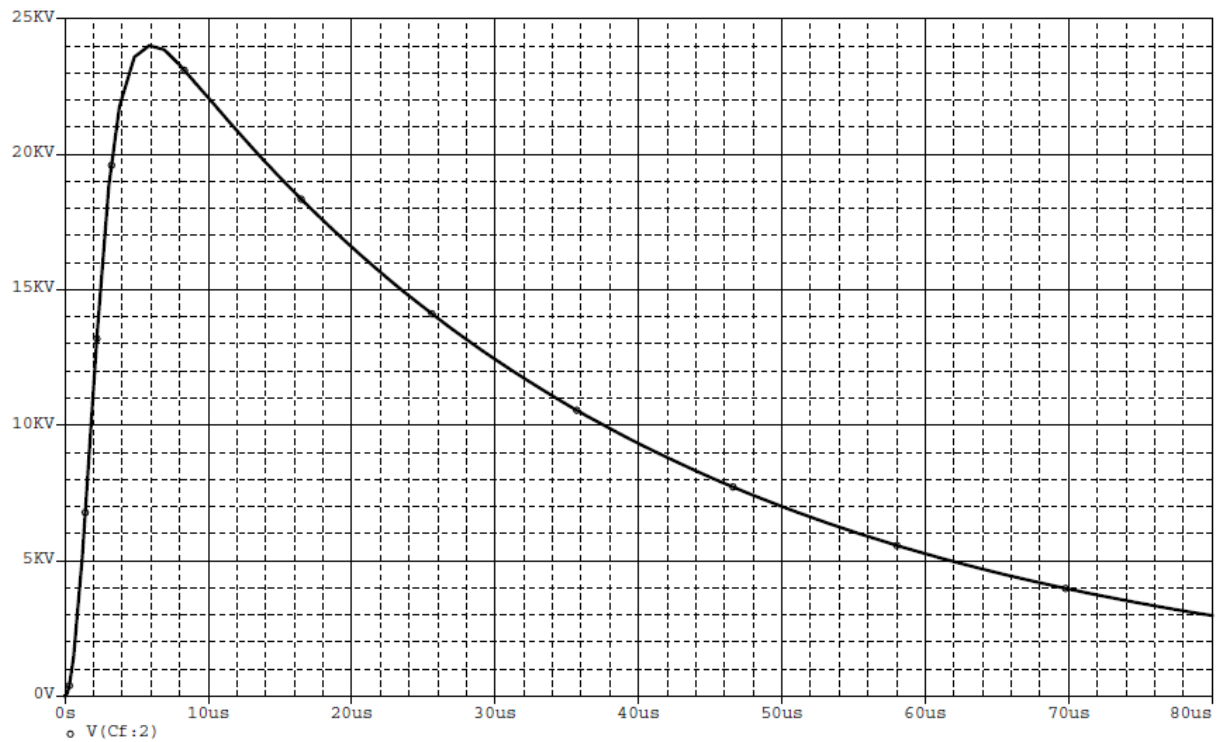
Donc le temps de front est :  $T_f = 3,55\mu s$ .

La forme de l'onde obtenu et ainsi les temps  $T_f$  et  $T_q$  relevés sont donnés sur la figure IV-2.

**II-3- Mise en évidence de la variation de la durée de la queue :**

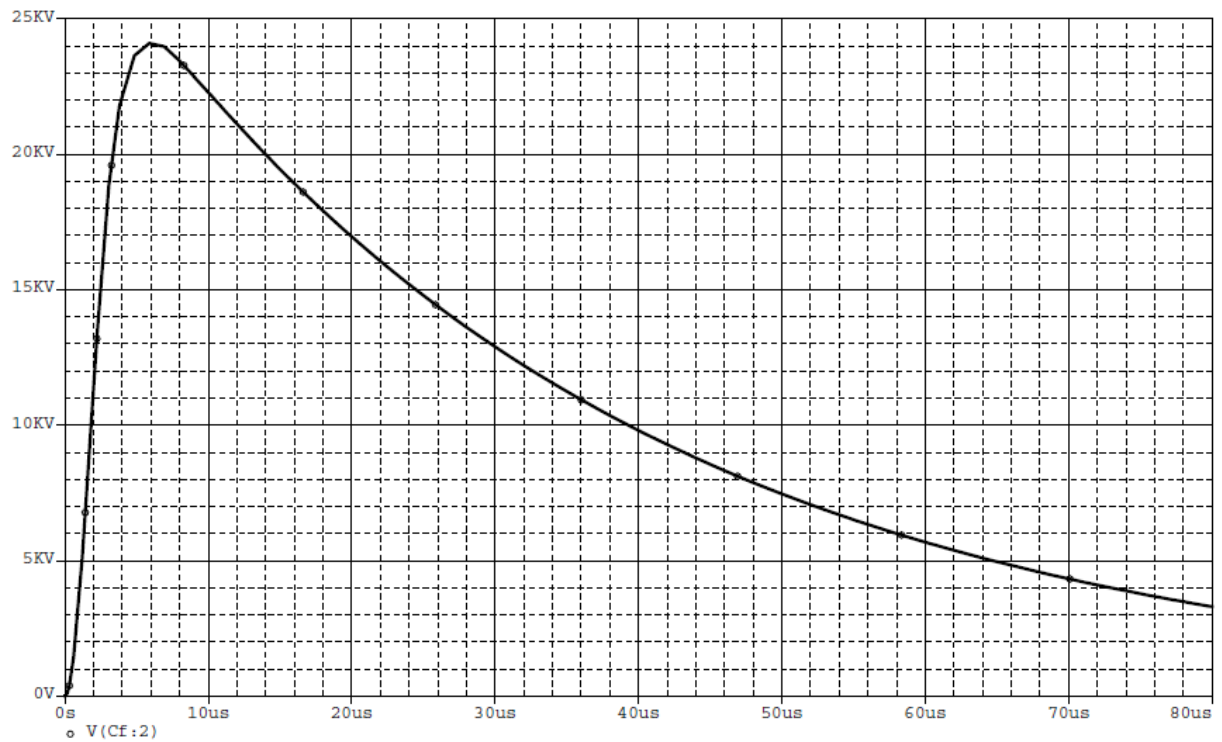
En faisant varier  $R_q$  et en laissant  $R_f$  fixe, on relève les différentes formes des ondes obtenues.

Les figures sont à chaque fois données avec la valeur de la résistance utilisée, les temps calculés et les temps simulés.



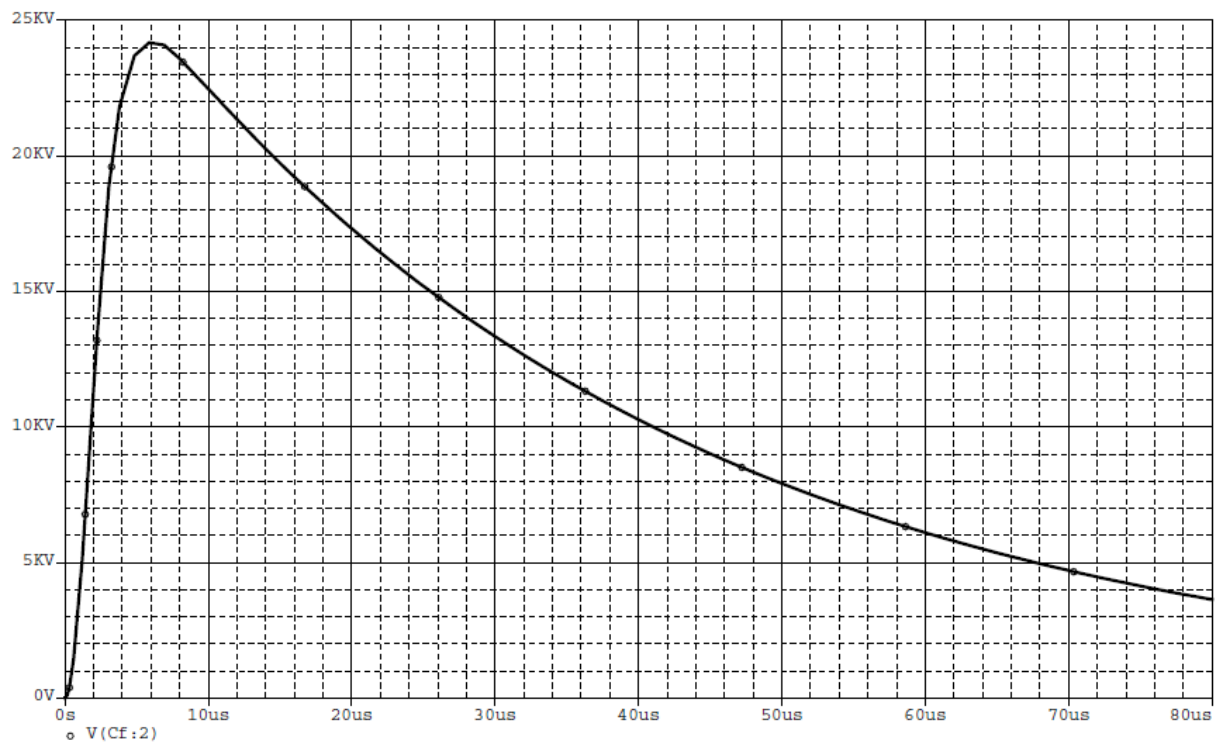
$R_f (\Omega)$	$R_q (\Omega)$	$T_f$ calculé ( $\mu s$ )	$T_f$ simulé ( $\mu s$ )	$T_q$ calculé ( $\mu s$ )	$T_q$ simulé ( $\mu s$ )
140	850	4,14	3,82	30,40	31,23

Figure-IV-2



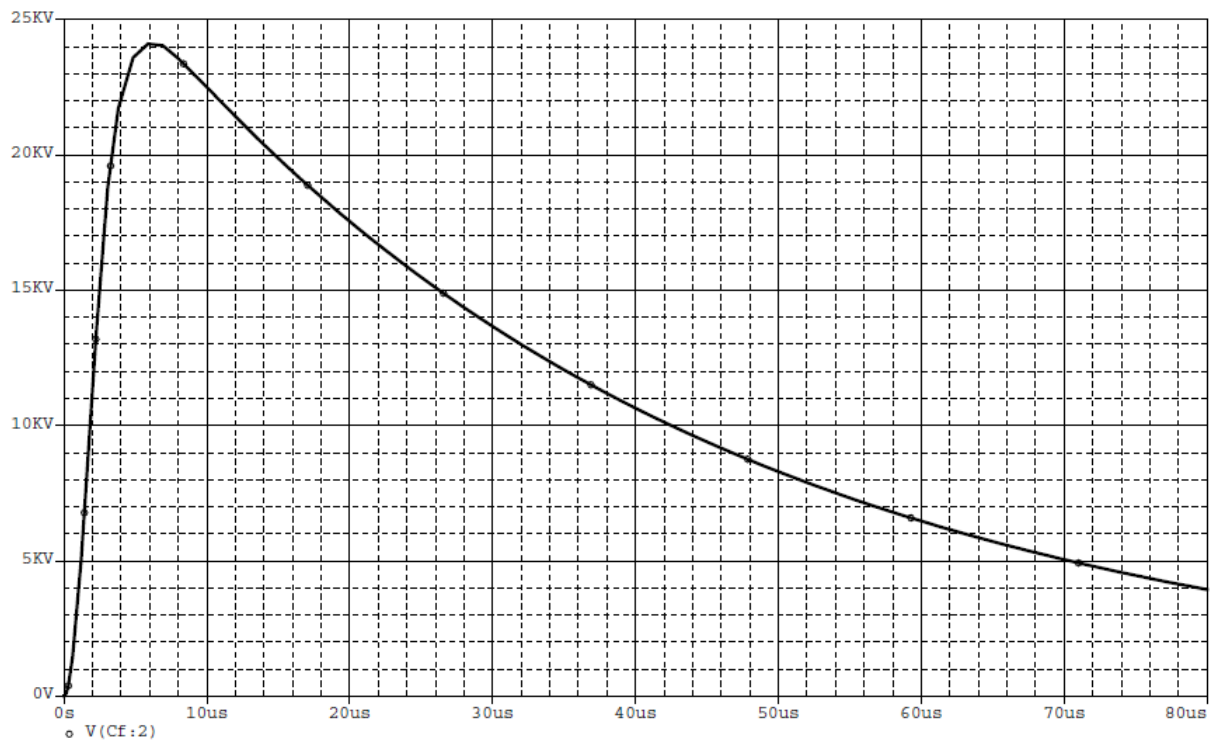
$R_f (\Omega)$	$R_q (\Omega)$	$T_f$ calculé ( $\mu s$ )	$T_f$ simulé ( $\mu s$ )	$T_q$ calculé ( $\mu s$ )	$T_q$ simulé ( $\mu s$ )
140	900	4,14	3,84	32,19	32,46

Figure-IV-3



$R_f (\Omega)$	$R_q (\Omega)$	$T_f$ calculé ( $\mu s$ )	$T_f$ simulé ( $\mu s$ )	$T_q$ calculé ( $\mu s$ )	$T_q$ simulé ( $\mu s$ )
140	950	4,14	3,84	33,98	33,76

Figure-IV-4



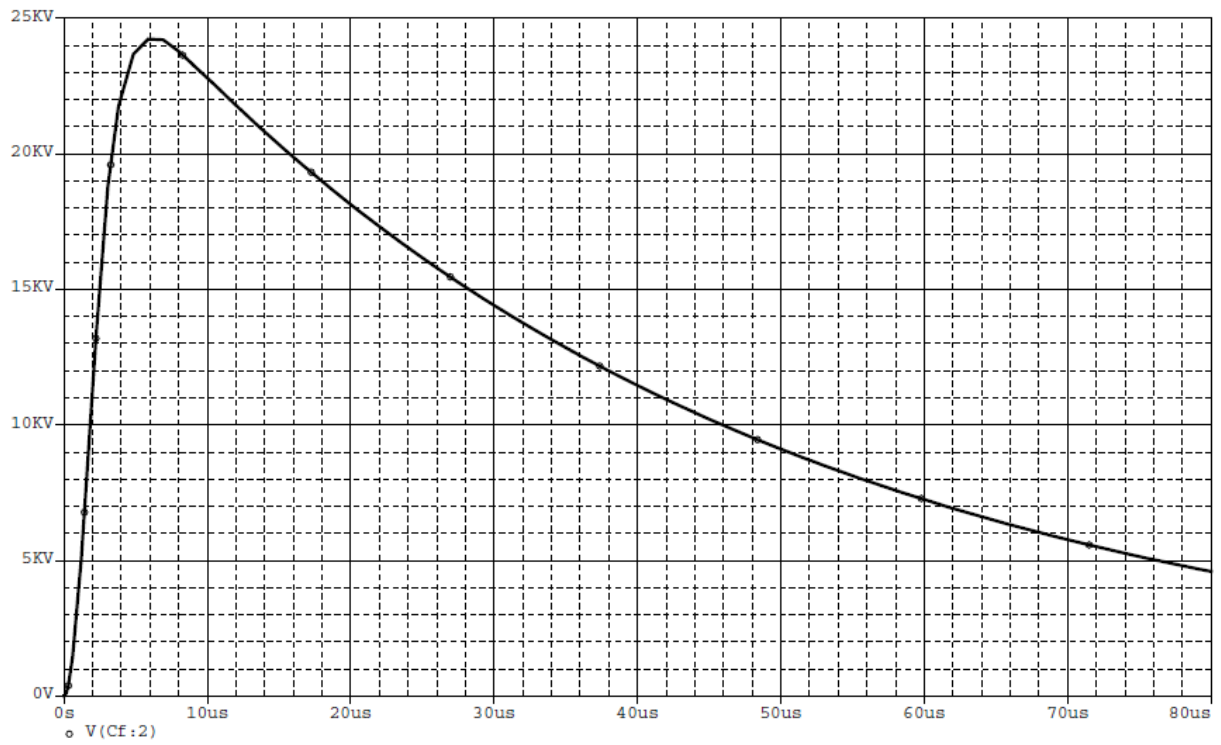
$R_f (\Omega)$	$R_q (\Omega)$	$T_f$ calculé ( $\mu s$ )	$T_f$ simulé ( $\mu s$ )	$T_q$ calculé ( $\mu s$ )	$T_q$ simulé ( $\mu s$ )
140	1000	4,14	3,85	35,77	35,00

Figure-IV-5



$R_f (\Omega)$	$R_q (\Omega)$	$T_f$ calculé ( $\mu s$ )	$T_f$ simulé ( $\mu s$ )	$T_q$ calculé ( $\mu s$ )	$T_q$ simulé ( $\mu s$ )
140	1050	4,14	3,85	37,55	36,29

Figure-IV-6



$R_f (\Omega)$	$R_q (\Omega)$	$T_f$ calculé ( $\mu s$ )	$T_f$ simulé ( $\mu s$ )	$T_q$ calculé ( $\mu s$ )	$T_q$ simulé ( $\mu s$ )
140	1100	4,14	3,90	39,34	37,12

Figure-IV-7



$R_f (\Omega)$	$R_q (\Omega)$	$T_f$ calculé ( $\mu s$ )	$T_f$ simulé ( $\mu s$ )	$T_q$ calculé ( $\mu s$ )	$T_q$ simulé ( $\mu s$ )
140	1150	4,14	3,92	41,13	38,83

Figure-IV-8



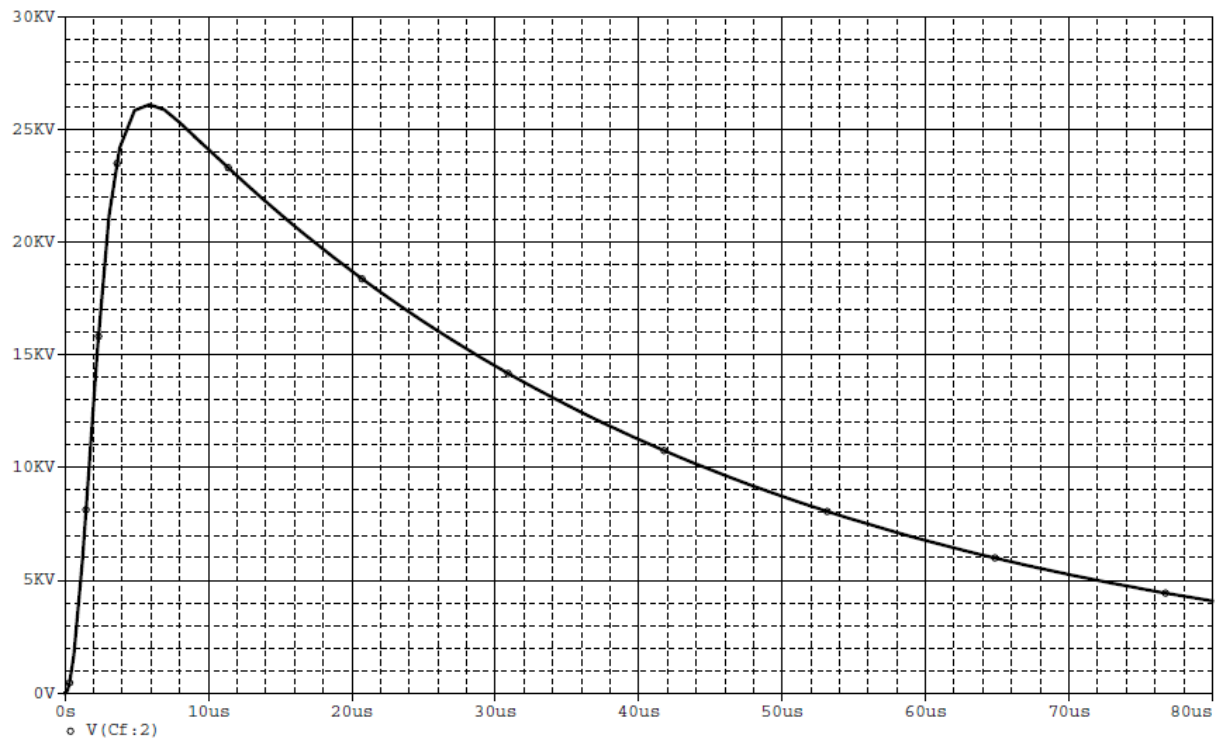
$R_f (\Omega)$	$R_q (\Omega)$	$T_f$ calculé ( $\mu s$ )	$T_f$ simulé ( $\mu s$ )	$T_q$ calculé ( $\mu s$ )	$T_q$ simulé ( $\mu s$ )
140	800	4,14	3,79	28,61	29,93

Figure-IV-9

#### ***II-4- Mise en évidence de la variation du front :***

En faisant varier  $R_f$  et en laissant  $R_q$  fixe on relève les différentes formes des ondes obtenues.

Les figures sont données avec la valeur de la résistance utilisée, les temps calculés et les temps simulés sont aussi mentionnés pour chaque courbe.



$R_f (\Omega)$	$R_q (\Omega)$	$T_f$ calculé ( $\mu s$ )	$T_f$ simulé ( $\mu s$ )	$T_q$ calculé ( $\mu s$ )	$T_q$ simulé ( $\mu s$ )
120	1000	3,55	3,65	35,77	34,28

Figure-IV-10



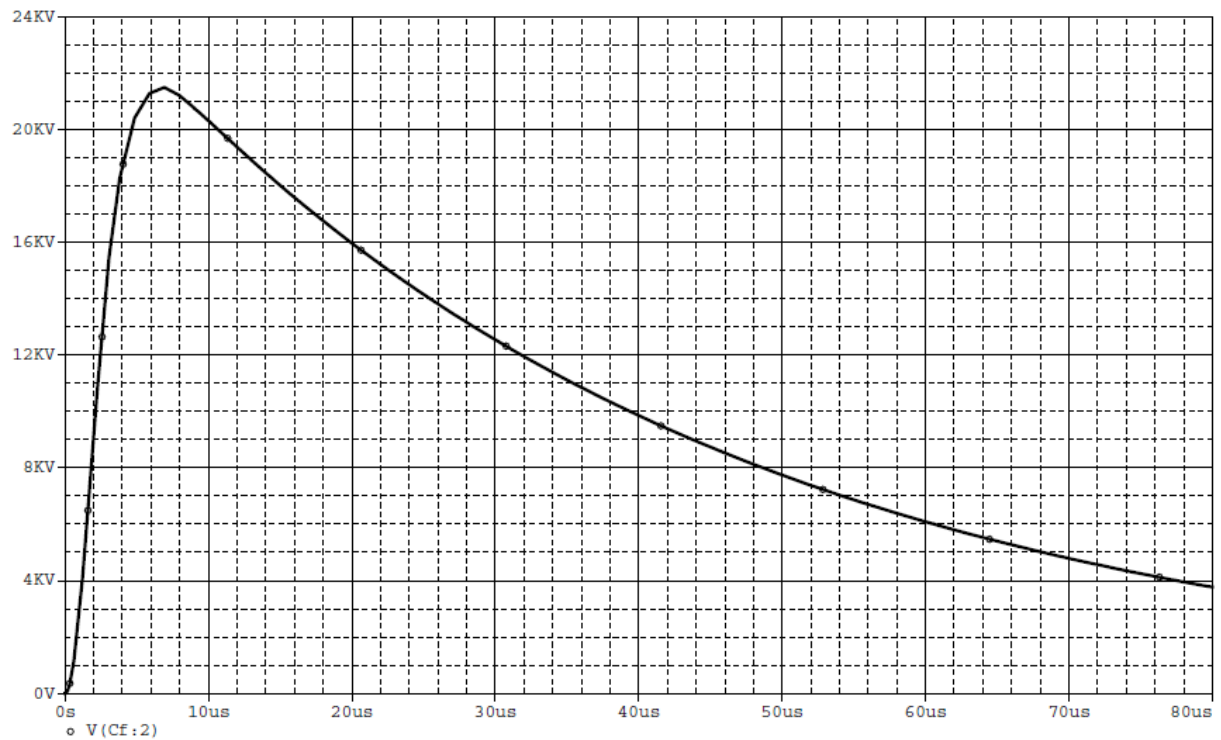
$R_f (\Omega)$	$R_q (\Omega)$	$T_f$ calculé ( $\mu s$ )	$T_f$ simulé ( $\mu s$ )	$T_q$ calculé ( $\mu s$ )	$T_q$ simulé ( $\mu s$ )
140	1000	4,14	3,85	35,77	35,00

Figure-IV-11



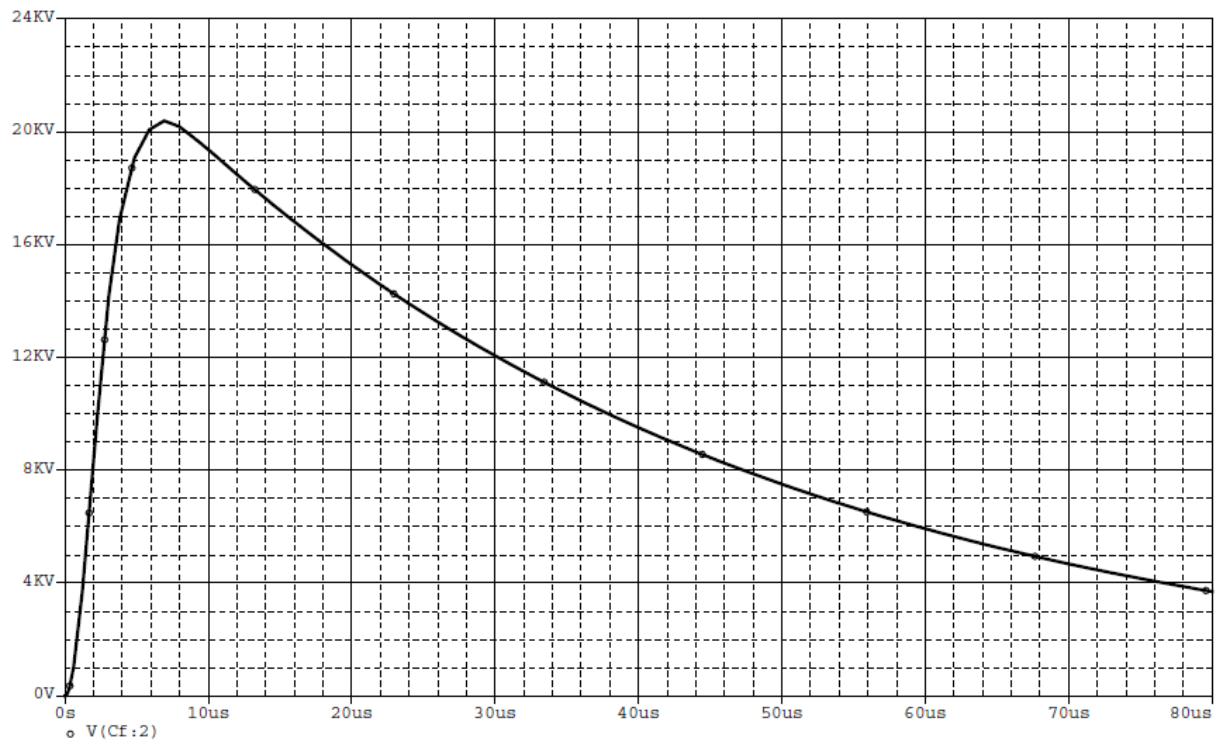
$R_f (\Omega)$	$R_q (\Omega)$	$T_f$ calculé ( $\mu s$ )	$T_f$ simulé ( $\mu s$ )	$T_q$ calculé ( $\mu s$ )	$T_q$ simulé ( $\mu s$ )
160	1000	4,73	4,25	35,77	35,77

Figure-IV-12



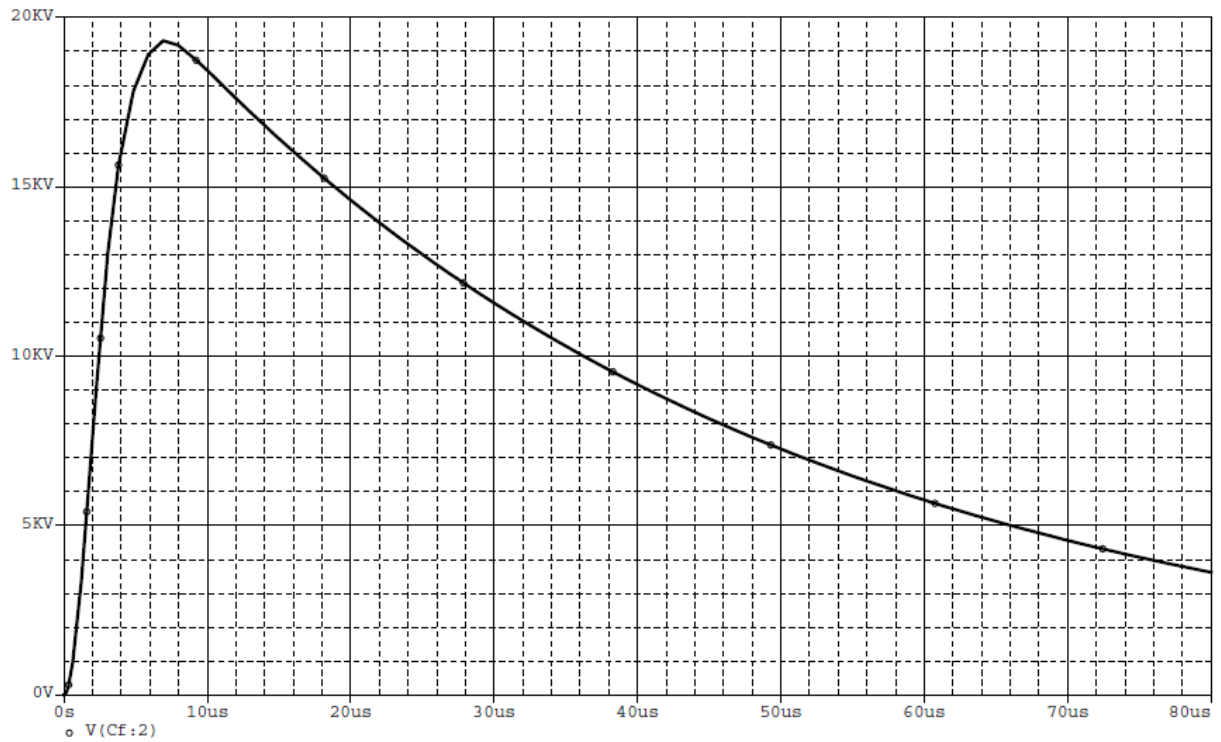
$R_f (\Omega)$	$R_q (\Omega)$	$T_f$ calculé ( $\mu s$ )	$T_f$ simulé ( $\mu s$ )	$T_q$ calculé ( $\mu s$ )	$T_q$ simulé ( $\mu s$ )
180	1000	5,32	4,57	35,77	36,68

Figure-IV-13



$R_f (\Omega)$	$R_q (\Omega)$	$T_f$ calculé ( $\mu s$ )	$T_f$ simulé ( $\mu s$ )	$T_q$ calculé ( $\mu s$ )	$T_q$ simulé ( $\mu s$ )
200	1000	5,92	4,80	35,77	37,20

Figure-IV-14



$R_f (\Omega)$	$R_q (\Omega)$	$T_f$ calculé ( $\mu s$ )	$T_f$ simulé ( $\mu s$ )	$T_q$ calculé ( $\mu s$ )	$T_q$ simulé ( $\mu s$ )
220	1000	6,51	4,94	35,77	37,79

Figure-IV-15



$R_f (\Omega)$	$R_q (\Omega)$	$T_f$ calculé ( $\mu s$ )	$T_f$ simulé ( $\mu s$ )	$T_q$ calculé ( $\mu s$ )	$T_q$ simulé ( $\mu s$ )
100	1000	2,96	3,42	35,77	33,37

Figure-IV-16

### **II-5- Discussion et interprétation des résultats :**

Comme nous l'avons déjà étudié dans la partie théorique, les résistances  $R_f$  et  $R_q$  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  $C_f$ , et un temps de queue long nécessite une décharge plus lente ; ceci est réalisé en choisissant une résistance  $R_q$  très grande par rapport à  $R_f$ .

Les figures IV-2 à IV-9 montrent qu'en augmentant la valeur de  $R_q$ , la durée de queue ( $T_q$ ) augmente, et lorsque en diminuant la valeur de  $R_q$ , la durée de queue ( $T_q$ ) diminue.

Les figures IV-10 à IV-16 montrent qu'à chaque fois en augmentant la valeur de  $R_f$ , la durée de front ( $T_f$ ) augmente mais la tension de crête diminue, et quand en diminuant la valeur de  $R_f$ , la durée de front ( $T_f$ ) diminue mais la tension de crête augmente.

Nous avons constaté une différence plus ou moins grande entre les valeurs simulées et celles calculées de temps de front  $T_f$  et de temps de queue  $T_q$ .

Cette différence serait due entre autre aux approximations faites dans l'établissement des formules donnant  $T_f$  et  $T_q$  et aussi aux erreurs de lecture.

### **II-6- Conclusion :**

Au niveau de la conception des générateurs de haute tension, plus on va de la basse fréquence (fréquence industrielle) vers la haute fréquence (phénomènes transitoires dans les générateur de choc).

Dans cette partie, nous avons mis évidence le principe de fonctionnement du générateur d'onde de choc, et la méthode utilisée pour la mesure de ces ondes. Et nous avons pu relever plusieurs courbes pour différentes valeurs de  $R_f$  et de  $R_q$  qui nous ont permis de comprendre le rôle de chaque élément du circuit.

Le but de cette partie et de simuler le générateur d'onde de choc sous *PSpice Schématics* pour bien comprendre le principe de fonctionnement qui est basé sur la charge et la décharge de condensateur, et aussi bien maîtriser le logiciel.

Les condensateurs, les résistances et tous les composants nécessaires pour la simulation sont disponible dans la librairie de PSpice sauf l'éclateur, la solution est de le remplacer par un interrupteur (Sw\_tOpen).

### III- Réalisation pratique :

#### III-1-Introduction :

La réalisation étant en basse tension, nous avons remplacé l'éclateur à sphères par un bouton poussoir (sur lequel il faut appuyer pour déclencher le fonctionnement de circuit). Le but de cette réalisation est de visualiser la forme d'onde aux bornes de la capacité de l'objet testé.

Le générateur a donc été conçu de façon à être modulable, c'est-à-dire que ces résistances peuvent être changées facilement, par contre, les condensateurs sont fixes.

#### III-2-Le circuit réalisé :

La figure ci-dessous montre le circuit réalisé :

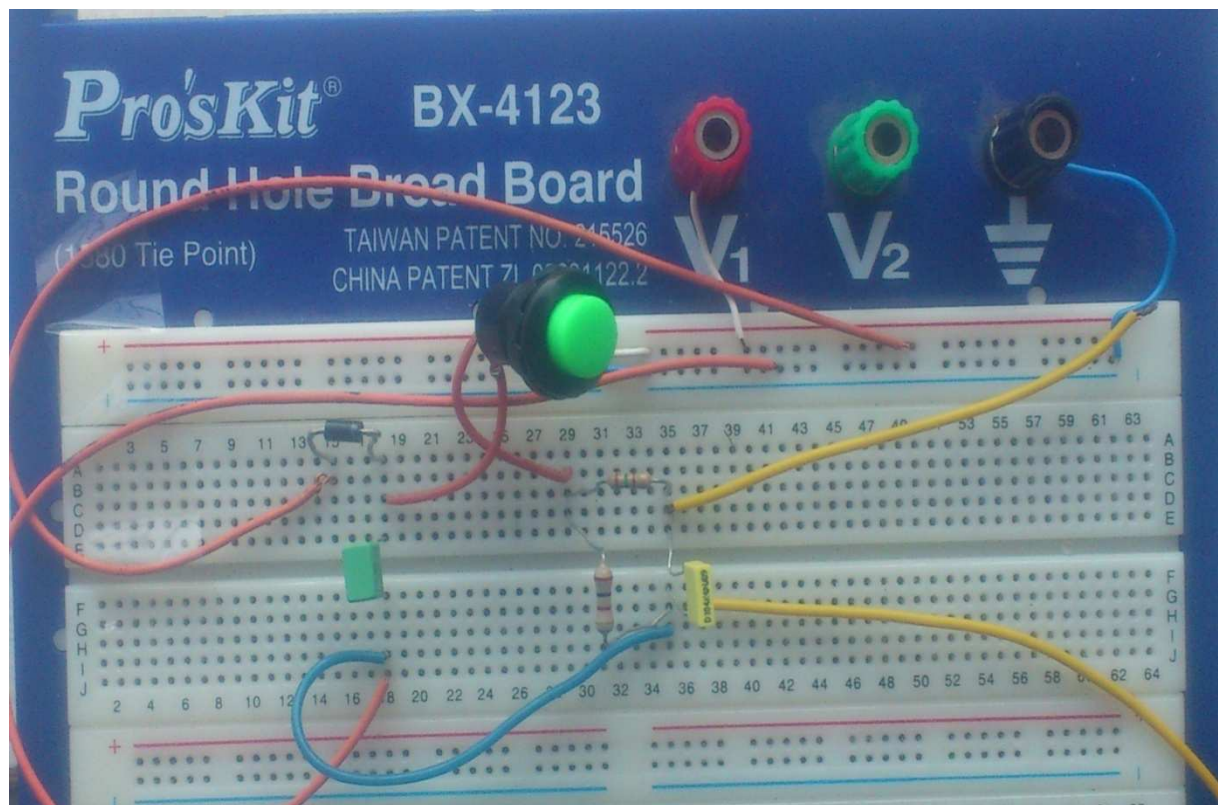


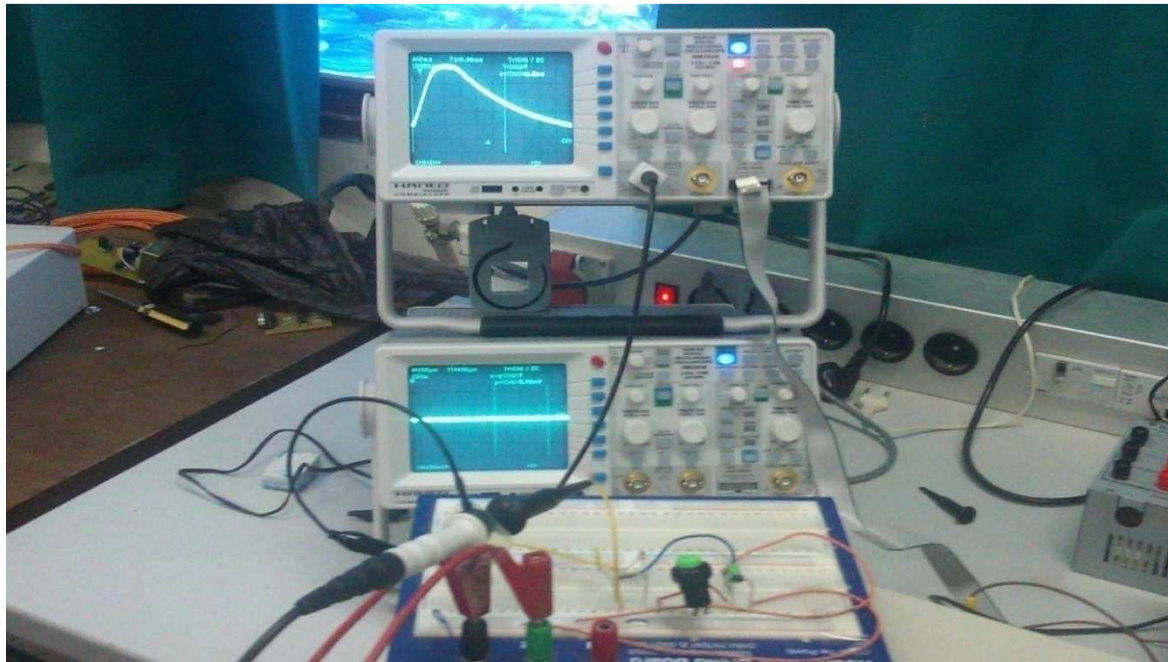
Fig. IV-17-le circuit réalisé.

Les valeurs des composants utilisés dans cet essai sont les suivants :

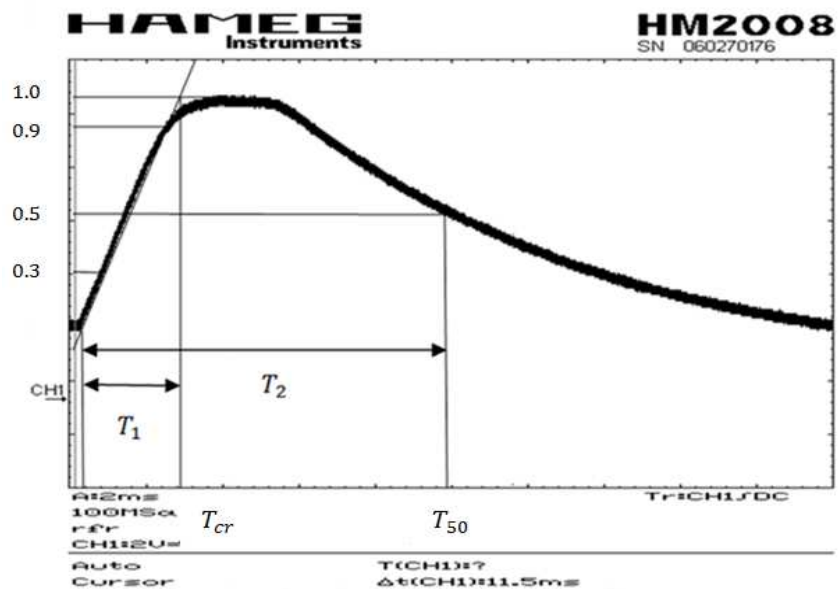
- Capacité de choc :  $C_{eq} = 0.1\mu F$
- Capacité de charge :  $C_f = 1nF$
- Résistance de front :  $R_f = 146\Omega$
- Résistance de queue :  $R_q = 2000\Omega$

**III-3-Fonctionnement :**

Après avoir alimenté le circuit par une tension alternative de 10 Volts, le condensateur se charge au bout d'un temps très bref, ensuite on va appuyer sur le bouton poussoir, et pour relever la tension  $V_{C_f}(t)$  on a utilisé un oscilloscope HAMEG HM2008 comme outils de visualisation. Puisque l'onde propagée à la sortie est ultra rapide, il fallait calibrer correctement l'oscilloscope dans le but de capturer seulement l'image voulue. La forme de l'onde relevée est donnée par les figures suivantes :



**Fig. IV- le montage réalisé.**



**Fig. IV- l'onde relevée.**

Afin de vérifier que les temps de montée et de descente respectaient ceux d'un choc, on a utilisé un oscilloscope HAMEG HM2008 comme outils de visualisation.

La marche à suivre pour capturer cette image est d'appuyer sur le bouton RUN/STOP, ensuite on va ajuster notre image, Puis, il faut régler au niveau approprié les boutons Volts/Div et Time/Div. Une fois ceci fait, l'oscilloscope sera fin prêt à se déclencher. Une fois l'impulsion envoyée, celle-ci est captée par l'appareil de mesure et toutes les informations nécessaires de cette onde se retrouvent dans les mesures tel que le temps de montée et la valeur maximale.

$T_1$  : Le temps de montée à la valeur crête  $T_{cr}$  est appelé temps de front.

$T_2$  : Le temps de diminution  $T_{50}$  est appelé temps de queue.

La tension de crête égale à  $\hat{U} \approx 8.6V$ .

### **III-4-Conclusion :**

Dans cette partie, nous avons constaté la difficulté de maîtriser les phénomènes transitoires et de fait, la nécessité de disposer d'un matériel de haute précision et de procéder minutieusement aux essais.

Un autre problème auquel nous nous sommes confrontés dans la réalisation pratique est l'indisponibilité des composants HT, ce qui nous a contraints à réaliser seulement un circuit d'essai en basse tension.

A decorative border resembling a scroll, with rounded corners and a vertical strip on the left side. The scroll is outlined in black, and the corners are filled with a light gray color.

***CONCLUSION***

***GÉNÉRALE***

## ***CONCLUSION GÉNÉRALE***

Afin de nous faciliter la tâche dans ce travail, nous avons passé alternativement d'aspects théoriques à des aspects expérimentaux pour atteindre le sommet de la pyramide qui est la réalisation d'un circuit générateur d'ondes de choc.

Dans la première partie nous avons exposé et traité le problème en haute tension, dans la deuxième partie (pratique) et faute de moyens (composants haute tension) nous avons été contraints de réaliser un circuit en basse tension, illustrant le fonctionnement du générateur d'ondes de choc.

Certes, ce circuit ne pourra pas servir aux tests d'objets et voir leur réaction à une onde de choc, mais il nous a permis de constater et de mettre en évidence le principe de fonctionnement du générateur d'ondes de choc et la difficulté de maîtriser les phénomènes transitoires. Et de ce fait, la nécessité de disposer de tels appareils dans un laboratoire à haute tension.

Enfin, nous espérons que notre travail constituera le précurseur de travaux et d'études qui aboutiront à la réalisation d'une vraie station à ondes de choc au laboratoire haute tension de notre département.

# BIBLIOGRAPHIE

- [1]. D.YATALIT ; M .DERRADJ, « Etude du générateur d'ondes de choc et réalisation d'un circuit d'essai ». Mémoire d'ingénieur, université de Tizi-ouzou 2002.
- [2]. François Girard-ADEE« Généralités sur la foudre et les surtensions», Edition octobre 2008.
- [3]. Schneider Electric-guide de l'installation. Edition mars 2010.
- [4]. AFFOLTER Jean-François «Haute tension».Yverdon-les-Bains, octobre 2000.
- [5]. «La protection contre les surtensions des installations à haute et très haute tension (63 à 400 KV). Electricité de France /centre de normalisation, 1980-EDF.
- [6]. D. Fulchiron «surtension et coordination de l'isolement» CT 151 Edition Décembre 1992.
- [7]. Cours de A. Tilmatine «La foudre» Chapitre V.
- [8]. Cours de A. Tilmatine «générateur de haute tension»Chapitre VII.
- [9]. Fascicule de Heafely, constructeur de matériel haute tension (générateur d'impulsions). Heafely, 1981.
- [10]. Cours de A. Tilmatine «Technique de mesure en haute tension, chapitre VIII ».
- [11]. «Condensateurs et diélectriques, chapitre 5».
- [12]. Bouwers P.G.cath. Revue technique Philips tome 6, n°9 Sept 1941.
- [13]. [WWW.surprises.ch/HT/annexes/35-pdf](http://WWW.surprises.ch/HT/annexes/35-pdf).
- [14]. Jérôme BAC«contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires» , Thèse Doctorat 2005.
- [15]. Baptiste CDILHON « Etude et réalisation d'un ensemble autonome démission d'onde électromagnétiques de fortes puissances». Thèse doctorat 2008.
- [16]. M. BELHITECHE EL HADI «Etude de la dégradation d'un solide isolant soumis aux décharges électriques de surface», Mémoire de Majester 2012.
- [17]. Antoine BELINGER « Alimentations électriques d'un générateur de jets synthétique à plasma»thèse doctorat 2011.

[18]. RAYNALD Richer « Etude de l'interaction des ondes de choc avec la glace à l'interface air-glace 2003.

[19]. ALLARD. PATRICK. Bouchard, Maxime, st-pierre, Alexandre « Conception d'un générateur d'impulsion » projet : 2010-161

## ***RÉSUMÉ***

Dans la technologie des isolants (des câbles, diélectriques des condensateurs...) ou des systèmes d'isolation (pylônes, isolateurs, éclateurs et parafoudres des lignes aériennes), les valeurs des champs électriques sont déterminantes pour la fiabilité et la durée de vie du matériel considéré.

Aux contraintes dues aux champs électriques locaux (engendrés par ces hautes tensions) s'ajoutent celles dues à d'autres phénomènes ; naturel comme la foudre, techniques comme les surtensions de manœuvre, ou encore les surtensions dues aux explosions d'origine nucléaires (NEMP).

Nous sommes intéressés dans notre travail à l'étude d'un générateur d'ondes de choc de tension, et à la réalisation d'un circuit générateur de ces ondes. Pour faire cette étude, nous avons divisé notre travail en deux parties : partie théorique, et partie simulation et réalisation.

### **Mots clés :**

- pylônes
- isolateurs
- éclateurs
- parafoudres
- diélectriques
- surtensions
- onde de choc
- générateurs