

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ÉCOLE SUPÉRIEURE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE ET ÉNERGÉTIQUE D'ORAN



SUPPORT PÉDAGOGIQUE

Cours

Rédigé par :

Dr. BRAHAMI Youssef

Maitre de Conférences B

brahami.youss@gmail.com

Intitulé du Polycopié :

TECHNIQUE DE LA HAUTE TENSION

Niveau : 4ème Année Ingénieur en Electrotechnique Option : Réseaux Electriques

Année Universitaire : 2020/2021

Avant-Propos

*Ce manuscrit a été réalisé pour servir comme support de cours aux étudiants de la quatrième année Ingénieur, option : Réseaux Electriques du département Génie Électrique dans le cadre des programmes officiels. Il comporte la philosophie de la haute tension et ses applications. Il peut également être utile à toute personne appelée à l'étude des **techniques de la haute tension** en génie électrique.*

Son développement est le résultat d'un grand travail de collecte, de lecture et de synthèse de divers documents (livres et manuscrits de cours). L'auteur tient à souligner que la plupart des graphiques et illustrations de ce cours sont la propriété du détenteur des droits d'auteur et que leurs reproductions sont à des fins éducatives uniquement.

*Ce guide explique comment **maîtriser** la décharge et comment **comprendre** les sources haute tension et comment **comprendre** le comptage haute tension à travers des exemples industriels pour **acquérir** une compréhension approfondie de l'application et de la maintenance des équipements haute tension industriels ou les réseaux transport et de la distribution d'énergie, Et la bibliographie que les étudiants doivent suivre pour mener des recherches approfondies sur cette ligne de recherche. Il convient également aux personnes souhaitant se familiariser avec la technologie haute tension.*

TABLE DES MATIERES

Table des matières

INTRODUCTION GÉNÉRALE	01.
CHAPITRE 0 NOTIONS DE BASE SUR LA HAUTE TENSION	
1- L'Origine de la haute tension	03.
2- Niveau des tensions	04.
a- Qu'est-ce que haute tension ?	04.
b. Perturbations cause par la haute tension	04.
c. Risque de Haute Tension	.05.
3- Règles de base	05
a- Histoire des la charge électrique.	05.
b-Nature de la charge.	05.
c- Explication des forces	05.
d-Pouvoir de pointe	05.
e-La Cage Faraday	07.
f-Surface équipotentielle	07.
4- Champ électrique	08.
5- Réseaux HVDC	09.
6- COORDINATION DE L'ISOLEMENT	10.
7- Applications de la haute tension	10.

CHAPITRE I SOURCES DE HAUTE TENSION

I-1 Sources de tension sinusoïdale (alternative)	12
I-1-1 Transformateur pour élever la tension	12
I-1-2 Transformateur en cascade.	13
I-1-3 Circuit de résonance.	14
a- Circuit de résonance série.	14

b-	Circuit de résonance parallèle.	15
I-2	Sources de haute tension continue	15
I-2-1	Redressement.	16
a-	Redressement simple alternance.	16
b-	Redressement double alternance.	17
I-2-2	Multiplicateur de tension.	18
a-	Multiplicateur de Schenkel.	18
b-	Multiplicateur de Latour.	19
c-	Cascade de Greinasher	20
d-	Multiplicateur de tension.	21
I-2-3	Générateurs Van de Graff électrostatiques :	21
I-3	Sources de tension impulsionnel (choc)	22
I-3-1	Source impulsionnel à un étage.	23
I-3-2	Source impulsionnel à plusieurs étages (Générateur de Marx).	24
I-3-3	Source haute tension de Ruhmkorff.	25
I-3-4	Source haute tension de Tesla.	26

CHAPITRE II METROLOGIE EN HAUTE TENSION

II-1	Mesure de charge	28
II-1-1	Les voltmètres électrostatique.	28
II-2	Mesure des tensions	29
II-2-1	Éclateur à sphères.	29
II-2-2	Mesure galvanométrique.	30
II-2-3	Diviseurs de tension.	31
II-3	Diviseurs pour tension continue et alternative :	32
II-3-1	Diviseur de tension résistif :	32
II-3-2	Diviseur de tension capacitif	32
II-4	Diviseurs de tension de choc :	34
II-4-1	Diviseur résistif :	34

II-4-2 Diviseur capacitif :	34
II-5 Transformateur de tension	35
II-5-1 Transformateur des tensions capacitif.	35
II-6 Mesure des courants	36
II-6-1 Transformateurs de courant.	36
II-6-2 Transformateur de courant Haute Frequence.	36
II-6-3 Transformation magnéto-optique.	37
II-6-4 Bobine de Rogowski....	37
II-7 Mesure des rigidités diélectriques	38

CHAPITRE III COMPATIBILITE ELECTROMAGNETIQUE

III-1 Compatibilité électromagnétique (CEM) ou Electromagnétique compatibility (EMC)	39
III-2 Qui est concerné par la CEM ?	39
III-3 Sources de perturbations	40
III-4 Principaux acteurs de perturbation sont :	40
III-4-1 Harmoniques.	40
III-4-2 Fluctuations de tension rapides	41
III-4-3 Creux de tension.	41
III-4-4 Variations lentes de tension.	42
III-4-5 Surtensions.	42
III-4-6 Surtensions de chocs de foudre.	42
III-4-7 Décharges électrostatiques.	43
III-4-8 Champs électromagnétiques..	44
a- Champ magnétique (H en A/m)..	44
b- Champ électrique (E en V/m)..	44
III-5 Mode de transmission des perturbations (Couplage)	44
III-5-1 Types de couplages.	45
III-5-2 Couplage par conduction.	46

a-	Liaison directe ou perturbations directement conduites.	46
b-	Couplage par conduction Impédance commune.	47
III-5-3	Couplage par rayonnement.	47
a-	Couplage par rayonnement Champ lointain.	47
b-	Couplage par rayonnement Champ proche – Diaphonie inductif .	48
c-	Couplage par rayonnement Champ proche – Diaphonie capacitif.	49
III-5-4	Couplage par ionisation.	49
III-6	Réduction des perturbations (intervention de la CEM)	50
III-7	Réglementations et normes	51
Conclusion		52

CHAPITRE IV DECHARGE ELECTRIQUE

IV-1	Décharges électriques dans les gaz	53
IV-1-1	Avalanche électronique.	53
IV-1-2	MECANISME DE TOWNSEND (Basse Pression).	54
IV-1-3	Loi de paschen.	57
IV-1-4	Mécanisme de streamer (Haute pression).	59
IV-1-5	Décharge partielle	60
IV-1-6	Décharge luminescente	61
IV-1-7	Arc électrique	61
IV-1-8	Effet de couronne	61
IV-2	Claquage des isolants liquides	64
IV-2-1	Différences entre claquage des isolants liquides et gaz.	64
IV-2-2	Procedure de décharge des liquides..	64
IV-2-3	Type de laquage.	65
a-	Claquage avec les bulles.	65
b-	Claquage avec suspension des particules.	66
c-	Claquage avec streamer.	66
IV-3	Claquage des isolants solides.	66

IV-3-1 Claquage des isolants solide thermique	.66
IV-3-2 Claquage des isolants solide électromécanique.	66
IV-3-3 Claquage avec streamer.	67
IV-3-4 Claquage avec érosion.	67
IV-4 Le Coup de Foudre	68
IV-4-1 DEROULEMENT DU COUP DE Foudre	68
a- Classification des coups de foudre.	68
b- Déroulement du coup de foudre descendant.	69
c- Déroulement du coup de foudre ascendant	70
IV-4-2 PROTECTION CONTRE LA Foudre.	70
a- Paratonnerre.	70
b- Eclateur.	71
c- Parafoudre (Varistance).	72
d- Câbles de garde.	73
e- Cage maillée	74

CHAPITRE V Impact de la Haute Tension sur l'environnement

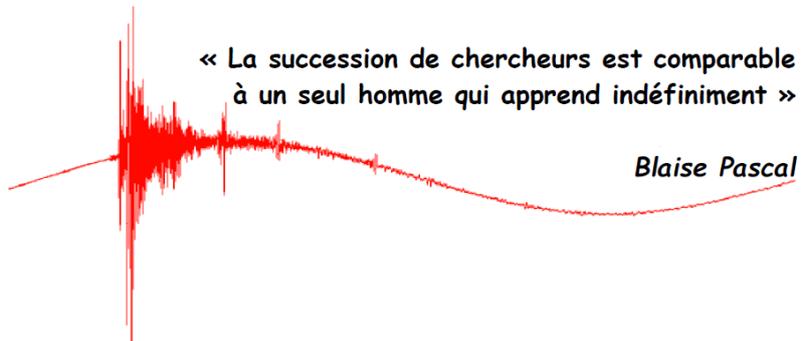
Introduction	76
V-1 Impact des champs électromagnétique dans les réseaux électriques sur l'environnement	76
V-1-1 Champ électrique	76
V-1-2 Méthode générale de calcul.	77
V-1-3 Champ magnétique.	78
V-2 Impact de l'effet de couronne dans les réseaux électriques sur l'environnement	79
V-2-1 Pertes:	79
V-2-2 Perturbations électromagnétiques.	79
V-2-3 Perturbations acoustiques produite par les lignes à HT et THT.	80
V-2-4 Production d'ozone.	80
V-2-5 Application de l'effet de couronne.	81

a-	Production d'ozone.	81
b-	Parafoudre.	81
c-	Neutralisation.	81
d-	Filtre électrostatique.	81
e-	Séparateur électrostatique.	82
V-3 Action biologique des lignes électriques		82
 BIBLIOGRAPHIE		 87

INTRODUCTION GÉNÉRALE

« La succession de chercheurs est comparable
à un seul homme qui apprend indéfiniment »

Blaise Pascal



INTRODUCTION GÉNÉRALE

A la fin du XIXe siècle que l'émergence de plusieurs applications d'électricité a produit une technologie à haute tension. L'objectif de ce cours d'enseigner aux futurs étudiants ingénieurs la technologie particulière de la très haute tension tout en tenant compte de la sécurité. Ce polycopié a été conçu dans le but d'être considéré comme étant un support pédagogique dans lequel, j'ai essayé de présenter plus au moins des notions qui s'adresseront aux étudiants de la quatrième année Ingénieur en électrotechnique, spécialité réseaux électriques ayant des acquis sur les notions de théories des champs. Par extension, ce cours s'adresse à toute personne, étudiants ou chercheurs concernés par le domaine de génie électrique et qui désire avoir un document de base ou approfondir ses connaissances en matière de technique de la haute tension. Pour cela j'ai préféré et selon mon expérience dans l'enseignement de cette matière, me baser simplement sur les notions simples.

Le cours débute par *un chapitre zéro* présentant des généralités sur la haute tension, qui normalement sont considérées comme étant la connaissance de base pour chaque étudiant qui entame le cours de la technique de haute tension. Dans *le premier chapitre*, je présente les différentes sources de haute tension conventionnelles « alternative, continue et impulsionnelle ». *Le deuxième chapitre* fournit les connaissances de base et les données techniques importantes sur les différents systèmes de mesure de trois tensions conventionnelles différentes, et il présente spécifiquement la mesure haute tension.

Dans *Le troisième chapitre* je présente la compatibilité électromagnétique, en débutant avec les notions de définition et notions de bases des sources de perturbation et mode de transmission des perturbations avec les normes fondamentales.

J'ai retenu le quatrième chapitre pour rappeler aux gens de prêter attention à la décharge dans les milieux gazeux, liquides et solides, ainsi que l'effet corona et son impact sur le réseau de transport d'énergie, et attacher quelques concepts de base sur le processus de coup de foudre et moyens de prévention.

Enfin, *Le cinquième chapitre* décrit l'impact de la haute tension sur l'environnement.

CHAPITRE 0
NOTIONS DE BASE SUR LA HAUTE
TENSION

« La science est une chose merveilleuse
... tant qu'il ne faut pas en vivre »

Albert Einstein



CHAPITRE 0 NOTIONS DE BASE SUR LA HAUTE TENSION

1- L'origine de la haute tension

- En général, l'électricité n'est pas produite à proximité immédiate des zones à fort trafic. Par conséquent, il doit être transporté par des lignes ou des câbles.
- Le réseau de transmission est en triphasé et n'a pas de fil neutre.
- La plage de tension dite extrêmement haute est de 60 à 800 kV (entre chaque phase). Il existe des projets jusqu'à 1200 kV. Le laboratoire d'essais THT peut rechercher et tester des structures et des équipements jusqu'à 12300 kV, il y a des projets en Russie qui atteignent les 1200 kV.
- Les fréquences conventionnelles existantes sont 50 ou 60 Hz.
- La plage de courant de transmission est de 400 à 3000A.

Exemple : le rôle des transformateurs

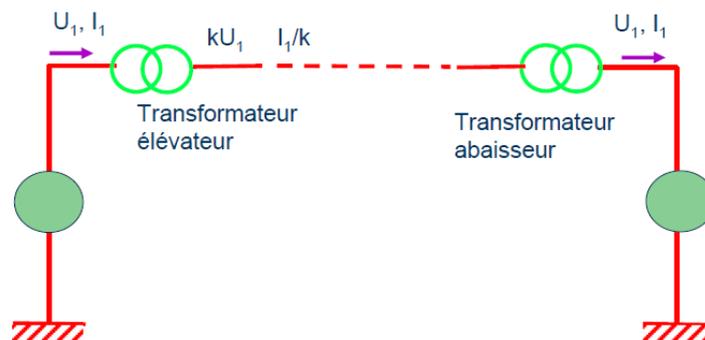


Figure 1 : Transformateur élévateur

Pour transporter l'énergie électrique, on a intérêt à réduire les intensités véhiculées. Par élévation de la tension de U à kU , on réduit I de I/k , d'où les pertes joules:

$$\text{Pertes joules} = RI^2 \implies \text{Pertes} = R(I/k)^2 = RI^2/k^2$$

Le **tableau I.1** englobe les différents niveaux de tension en fonction de la puissance et la longueur du réseau aérien.

Tableau I.1 Niveau de tension en fonction de la puissance

U_{L-L} (kV)	Capacité de transmission (MW)	Longueur maximale (km)
20	3-10	1-20
110	30-40	30-150
220	100-200	150-250
400	400-700	300-500
750	1800-2400	1200-2000
1150	4000-6000	2500-3000

2- Niveau des tensions

La nouvelle norme en vigueur définit les niveaux de tension alternative comme suit (**tableau I.2**) :

Tableau I.2 Domaines de tension

Domaines de Tension		Tension composée (V)	Tension du réseau algérien (V)
Très Basse Tension (TBT)		$U_n \leq 50$	-----
Basse Tension (BT)	BTA	$50 < U_n \leq 500$	380
	BTB	$500 < U_n \leq 1000$	----
Haute Tension (HT)	HTA ou MT	$1000 < U_n \leq 50000$	10000/30000
	HTB	$U_n > 50000$	600000-90000-220000-400000

a. Qu'est-ce que haute tension ?

C'est toute tension qui génère un champ électrique dans les composants du système qui est suffisant pour modifier considérablement les propriétés des substances (en particulier les matériaux isolants). Par conséquent, la recherche sur les hautes tensions a conduit à la conception et à la production de produits, d'équipements et de systèmes capables de générer et de supporter des champs électriques élevés. Les systèmes à haute tension sont généralement ceux où se produisent des phénomènes non linéaires et complexes, qui se produisent au-dessus d'un certain seuil. Par exemple: arc, effet corona, rupture de matériaux isolants (solide, liquide), etc...

b. Perturbations cause par haute tension:

Différents phénomènes d'interférence potentiels sont propres à la haute tension (fort champ électrique):

✓ **Claquage des diélectriques**

⇒ La spécification d'isolation se détériore temporairement ou définitivement. Si le matériau isolant retrouve plus ou moins ses propriétés isolantes après claquage, on peut dire qu'il est auto-régénérant. Pour les solides, ce n'est pas le cas, et les solides doivent être remplacés une fois qu'ils sont poinçonnés. Le matériau isolant en papier imprégné d'huile peut également se régénérer, car l'huile remplit les trous causés par la rupture du papier.

✓ **Effet couronne**

⇒ Interférence sonore, les rayons électromagnétique, perte d'énergie, Génération d'ozone

✓ **La décharge partielle**

⇒ l'isolation sera détérioré

✓ **Dangers liés aux tensions et aux champs électriques pour les personnes**

c- Risque de haute tension

Les installations Haute Tension à courant fort, comme les réseaux électriques aériens par exemple, génèrent des courants mortels. Certaines installations HT de laboratoire à courant faible ne provoquent pas de danger pour les personnes ($I < 10 \text{ mA}$). On peut recevoir une décharge électrique sans en mourir, comme le cas des décharges électrostatiques.

3- Règles de base

a- Histoire de la charge électrique

Jean Perrin (1870-1942) a établi l'existence de particule chargée en 1895. Il a prouvé que le faisceau de la cathode peut être dévié par un aimant et charger l'écran. En 1921, la tension nominale du réseau électrique avait atteint environ 100 kV, mais l'existence de l'électronique était encore controversée!

b- Nature de la charge

- ✓ La charge électrique existe en deux formes: charge positive et charge négative, la charge est mesurée en coulomb (C).
- ✓ La charge totale du corps est une multiplication de la charge de base: $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.
- ✓ La charge totale sera conservée, dans un système isolé.
- ✓ Les charges de signes opposés s'attirent et les charges de même signe se repoussent.

En fait, en génie électrique, les charges négatives sont des électrons légers et les charges positives sont des ions beaucoup plus lourds.

c- Explication des forces

- ✚ La charge rayonne du champ électrique.
- ✚ Le champ exerce une force sur la charge.

d- Pouvoir de pointe

On peut facilement démontrer à l'aide du théorème de Gauss qu'une surface plane portant une densité de charge ρ_s , produit un champ électrique $E = \rho_s / \epsilon_0$ (fig.2).

$$\text{densité surfacique de charge : } \rho_s = \frac{q}{S}$$

$$\text{Cas d'une surface pointue : } S \approx 0 \Rightarrow \rho_s = \frac{q}{S} \gg \Rightarrow E \gg$$

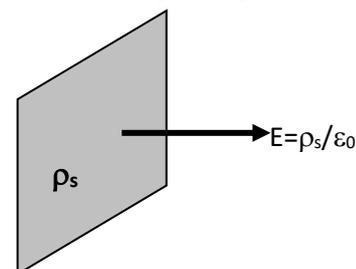


Figure 2 : Champ électrique généré avec un plan chargé

Exemples (fig.3) :

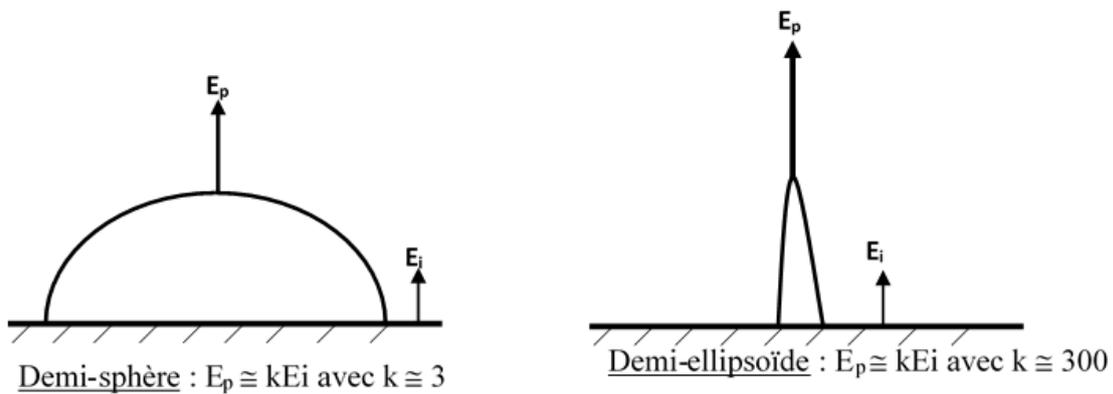


Figure 3 : Pouvoir de pointe

Résumé: Dans les zones où le rayon de courbure est petit ‘pointe’, le champ électrique devient très fort. Cela représente le danger de HT (claquage), mais cela présente aussi des avantages (paratonnerres, etc.). Le pouvoir de pointe indique qu'en « haute tension », tous les appareils ont une forme circulaire et sont équipés d'un anneau pour répartir uniformément le champ électrique.

Exemple d’applications du pouvoir de pointe

- 1- Parafoudre : la foudre est attirée par le champ élevé de la pointe pour faire écouler son courant vers la terre (fig.4).
- 2- Particules chargées: Les flèches sur les ailes de l'avion annulent la charge générée à la surface de l'avion en raison du frottement avec l'air (Figure 5).

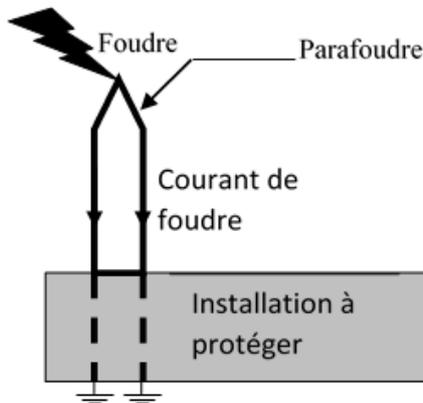


Figure 4 : Parafoudre

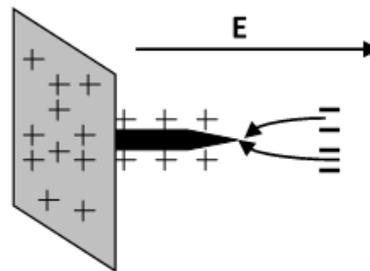


Figure 5 : Charger des particules

- 3- Précipitateurs électrostatique;
- 4- Séparateur électrostatique ;
- 5- Autres application...

e- La Cage Faraday

A l'intérieur d'un conducteur en équilibre ($I=0$), le champ électrique est nul.

On peut déduire à partir du théorème de Gauss : $\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = \frac{q_{int}}{\epsilon} = 0 \Rightarrow q_{int} = 0$,

que dans un conducteur en équilibre les charges se répartissent à l'extérieur.

Si des charges sont injectées dans le conducteur, elles « repousseront » vers la surface extérieure (Figure 6).

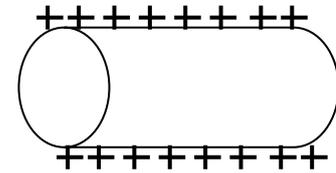


Figure 6 : conducteur en équilibre

Exemple 1 : La Cage Faraday

En cas d'accident interne (défaillance de l'isolation), étant donné que la charge se déplacera vers l'extérieur (Figure 7), le personnel et l'équipement se trouvant à l'intérieur seront également protégés.

Exemple 2 :

Ossature métallique des maisons (Protection contre la foudre) ; Laboratoire haute tension ; vêtements de travail sous tension ; voitures, avion...(voir figure 8).

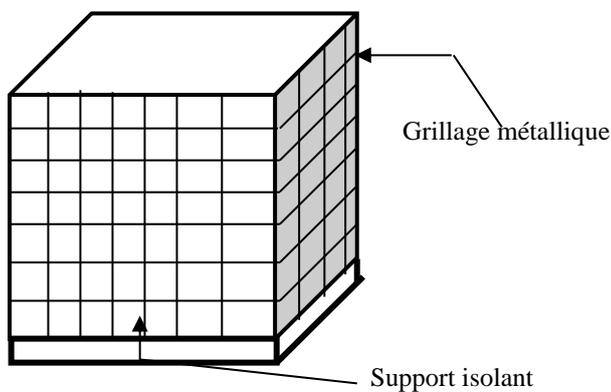


Figure 7 : Cage de Faraday



Figure 8 : Les personnes à l'intérieur ne ressentent rien, mais il est interdit de poser la main sur la surface de l'extérieur

f- Surface équipotentielle

Définition :

C'est une surface à potentiel constant, qui est le même partout.

Exemple: charge ponctuelle q

$$V = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}$$

Si nous posons $r = R = \text{constant}$, le potentiel est constant; par conséquent, chaque sphère (R_1, R_2, R_3) avec un rayon constant de R représente une surface équipotentielle (Figure 9).

Règle générale: le champ électrique est toujours perpendiculaire à la surface équipotentielle.

Démonstration :

Soit OPQR un plan uniformément chargé, c'est donc une surface équipotentielle située dans le plan XOY (figure 10).

$$E = -\text{grad}V = -\frac{\partial V}{\partial x}u_x - \frac{\partial V}{\partial y}u_y - \frac{\partial V}{\partial z}u_z$$

Comme $\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\partial V}{\partial y} = 0$ donc $E = -\frac{\partial V}{\partial z}u_z$

Le champ électrostatique est perpendiculaire à la surface équipotentielle.

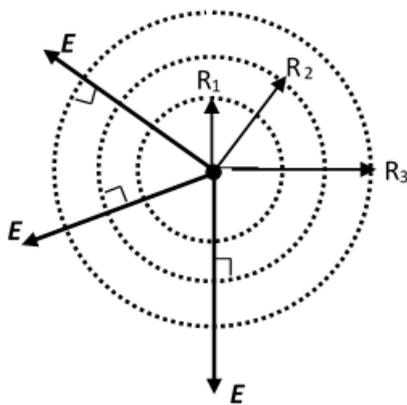


Figure 9 : Surface équipotentielle.

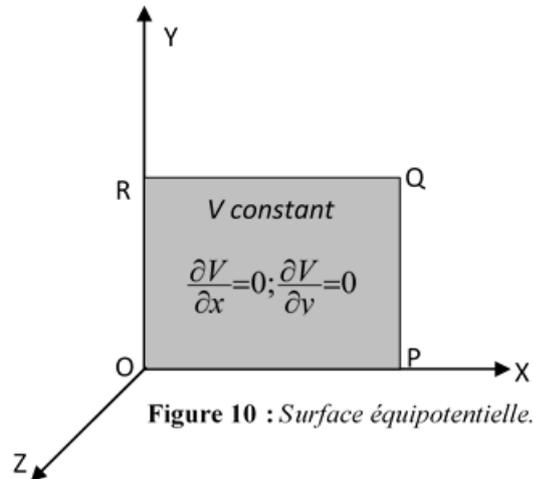


Figure 10 : Surface équipotentielle.

4- Champ électrique

Dans une sous-station haute tension ouverte de 220 kV, le champ électrique atteint 2 kV / m pour la distance de 6 m du conducteur situé au centre de la ligne en disposition nappe, ce qui est une valeur très élevée pour le CE. En revanche, le champ magnétique égale 0,007 kA / m, ce qui est une valeur faible pour le champ magnétique. À haute tension, par rapport aux champs magnétiques, les champs électriques dominant.

Champs	Distance verticale par rapport au conducteur central (en m)							
	0,5	1	2	3	4	5	6	7
H (kA/m)	0,096	0,049	0,025	0,017	0,012	0,009	0,007	0,005
E (kV/m)	62,7	29,9	12,6	6,7	4,5	2,8	2,0	1,8

Tableau: Le champ magnétique et le champ électrique sous le bus 220 kV en nappe triphasé. La distance inter-conducteur égale 4 m – le diamètre du conducteur de ligne égale 25 mm.

Comparaison de la ligne aérienne et le câble souterrain sous haute tension

Inconvénients des câbles souterrains:

- L'isolation des câbles est technologiquement difficile et ne permettent jamais d'atteindre des grandes tensions;
 - Problème de dissipation thermique;
 - Difficulté de la liaison entre les lignes aériennes et les câbles;
 - Limitation de puissance due à la grande capacité du câble;
 - Difficile à entretenir en cas de panne;
- Le coût relatif du câble est très élevé, environ 10 fois le coût de la ligne aérienne.

Remarque : Les câbles sont placés dans des conditions techniques et environnementales très particulières.

Par exemple, la connexion entre les côtes nord et sud de la Méditerranée ...

5- Réseau HVDC

HVDC: High Voltage Direct Current (courant continu haute tension)

La haute tension CC peut être utilisée dans le réseau dans les situations suivantes:

- La longue ligne (> 1000 km) du réseau UHT, où on peut gagner dans la distance d'isolement des valeurs efficace et crête ;
- Le câble souterrain plus longs (en mer ou en ville) pour surmonter le problème de la transmission de puissance réactive.

Cependant, comme la plupart des appareils de commutation utilisent une tension alternative, un convertisseur statique doit être fourni pour convertir l'énergie alternative en énergie continue, et vice versa.

Isolement dans le réseau électrique

Du point de vue diélectrique, les longueurs d'isolation à prendre en importance sont :

- d_m : distance d'air entre conducteurs et pylônes ;
- D_c : distance entre conducteurs ;
- D_g : distance entre conducteurs et câble de garde ;
- L_f : ligne de fuite des isolateurs.

D'autres distances « moins importantes » sont à considérer, il s'agit de :

- Hauteur des conducteurs par rapport au sol (garde au sol) ;
- Hauteur au-dessus des obstacles ;
- Proximité des constructions, habitations...

6- COORDINATION DE L'ISOLEMENT

Les appareillages des sous-stations électriques et des réseaux de distribution haute tension sont exposés en fonctionnement à des surtensions d'origine atmosphérique ou opérationnelle, résultant du fonctionnement, de la mise à la terre, des court-circuit ou d'autres événements conduisant à des phénomènes transitoires.

Par coordination d'isolement, on entend toutes les mesures prises pour empêcher les décharges destructrices dues aux perforations ou aux contournements dans l'équipement de l'installation. Ces conditions sont obtenues en respectant la tension minimale de tenue de chaque partie de l'équipement. Par conséquent, il est nécessaire de formuler des réglementations internationales et nationales (Commission électrotechnique internationale-CEI). Ces règles définissent la tension d'essai des équipements électriques d'une part et les conditions dans lesquelles ces essais doivent être effectués d'autre part. Le niveau de tension d'un appareil avec une coordination d'isolement correcte est illustré à la Figure 11.

- La tension de perforation U_p (isolation interne)
- La tension de contournement U_c (isolation externe)
- La tension d'essai est définie par la règle de coordination d'isolement U_e (règlement CEI).
- Tension de fonctionnement maximale U_m

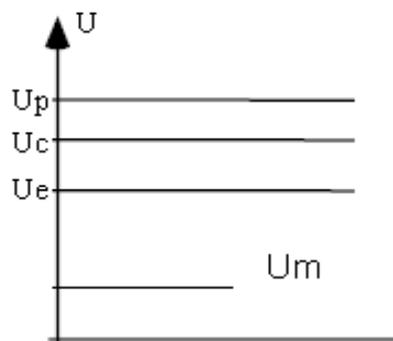


Figure 11 : Coordination de l'isolement

7- Applications de la haute tension

La haute tension est le plus couramment utilisée dans le grand transport d'électricité, mais l'ingénieur applique ces connaissances à de nombreux autres domaines:

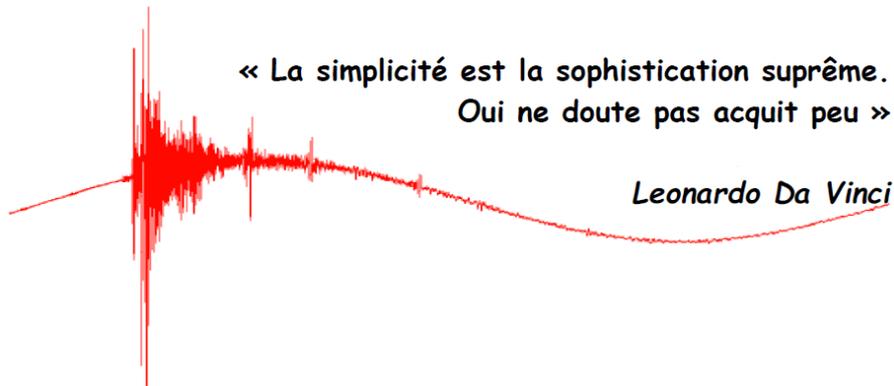
Les principaux domaines des applications haute tension:

Domaines	Applications
Réseaux électriques	<ul style="list-style-type: none"> - tension alternative - tension continue - lignes aériennes - câbles - isolateurs - transformateurs de mesure de tension - transformateurs de mesure de courant - sectionneurs - disjoncteurs - parafoudres - mises à la terre - condensateurs - transformateurs de puissance - alternateurs - appareillage SF6 - compatibilité électromagnétique (CEM)
Electrostatique	<ul style="list-style-type: none"> - générateurs électrostatiques - moteurs électrostatiques - filtres électrostatiques - xérocopie - imprimante électrostatique - peinture électrostatique à décharge - danger d'explosion et d'incendie - perturbations de l'électronique sensible
Physique	<ul style="list-style-type: none"> - microscope électronique - accélérateurs de particules
Médecine	<ul style="list-style-type: none"> - effets biologiques des champs électriques - diagnostique par rayons X - thérapie par rayons X - ozonothérapie - diélectrophorèse - chauffage
Electronique	<ul style="list-style-type: none"> - tube cathodique - générateurs piézo-électriques - allumage électrique - flash électronique - lampe à décharge - filtre bactériologique UV
Foudre	<ul style="list-style-type: none"> - captage de la foudre - protection contre la foudre (paratonnerre, éclateurs, parafoudre, câble de garde) - aviation
Impulsions électromagnétiques d'origines nucléaire (NEMP)	<ul style="list-style-type: none"> - protection des lignes de transmission - protection des antennes - protection des appareils électroniques - cages blindées

CHAPITRE I
SOURCES DE HAUTE TENSION

« La simplicité est la sophistication suprême.
Oui ne doute pas acquit peu »

Leonardo Da Vinci



CHAPITRE I SOURCES DE HAUTE TENSION

Dans la science et la technologie modernes, l'utilisation de la haute tension est cruciale, comme:

- Recherche basique et l'environnement,
 - Imagerie,
 - Concevoir et développer de nouveaux matériaux diélectriques et semi-conducteurs;
 - Production le transport et la distribution d'énergie électrique,
 - Le diagnostic
 - La compatibilité électromagnétique, ...
- ❖ Par conséquent, tout ingénieur en génie électrique et dans d'autres domaines doit avoir une connaissance des systèmes de production d'électricité à haute tension.
- ❖ Le but de ce chapitre est de fournir des connaissances de base et des données techniques importantes sur les systèmes de production haute tension et courant fort.

Il existe trois types de tension conventionnelle:

- La tension sinusoïdale (alternative)
- La tension direct (continue)
- La tension impulsionnelle (choc)

I-1 Sources de tension sinusoïdale (alternative)

I-1-1 Transformateur pour élever la tension

En fait, le transformateur qui fait élever la tension est l'alimentation haute tension la plus utilisée. Il s'agit de transformateurs à puissance faible (quelques VA à plusieurs KVA) pour but principal est de fournir des tensions élevées pour endommager le courant, généralement de l'ordre du milliampère. Ce type de transformateurs, est principalement utilisés dans les laboratoires de test, ils sont équipés d'une propriétés d'isolement très élevé puisqu'ils sont tenus de résister à de nombreuses pannes survenant lors de l'essai. La forme de la tension HT généré par le transformateur HT est différente de la forme sinusoïdale, mais ne dépasse pas la tolérance admissible. Ces transformateurs ont généralement une borne mise à la terre sur l'enroulement. Plusieurs transformateurs sont des transformateurs de point milieu (Figure 1).

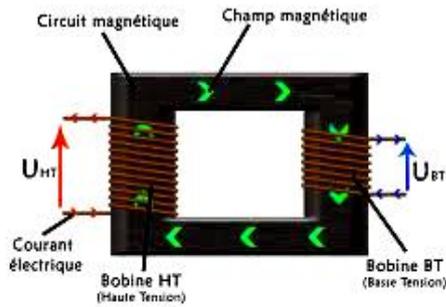


Fig.1 : Générateurs de haute tension (transformateur)

Si la tension est supérieure à 750 kV, le transport, le coût et le volume deviennent encombrant. Ensuite, nous préférons utiliser des transformateurs en cascade, ce qui est également dû au fait que si nous avons une tension très élevée, alors pour un seul transformateur, le problème d'isolation deviendra insoluble.

I-1-2 Transformateur en cascade

La partie e_1c_1 du transformateur I, qui vaut exactement la tension primaire a_1b_1 , est reliée au primaire a_2b_2 du transformateur II (voir figure 2 ci-dessous).

Comme l'extrémité d_1 est reliée à la carcasse du transformateur I laquelle est mise à la terre, et que l'extrémité d_2 est aussi reliée à la carcasse du transformateur II laquelle est isolée de la terre, la tension obtenue du point c_2 par rapport à la terre vaut pratiquement deux fois la tension secondaire c_2d_2 . En effet, les tensions c_1d_1 et c_2d_2 sont en série.

La haute tension est contrôlée en alimentant le primaire a_1b_1 par un auto-transformateur. Plusieurs transformateurs peuvent être montés en cascade pour obtenir une tension plus grande. De tels transformateurs permettent d'obtenir une tension de 2 MV.

Comme l'isolation en haute tension est importante vu les champs électriques intenses, les enroulements de tous les transformateurs sont plongés dans une huile isolante.

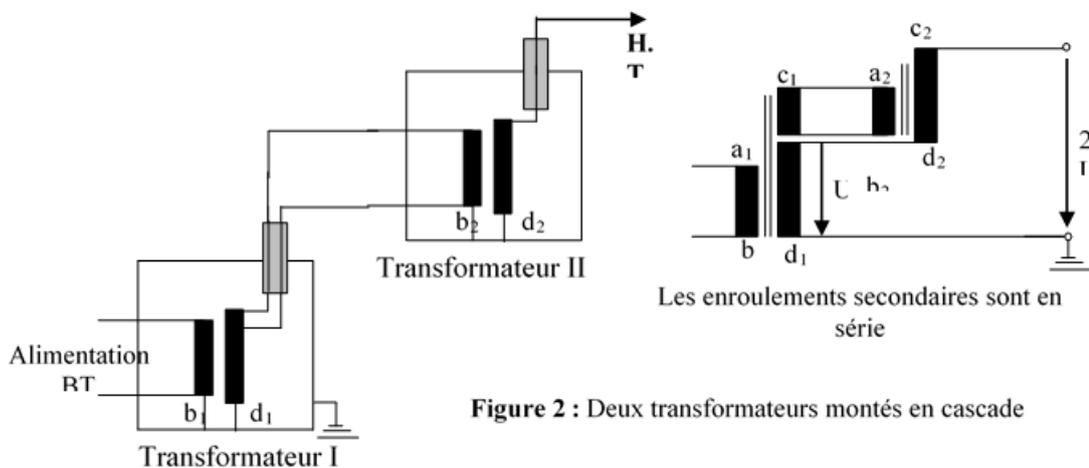


Figure 2 : Deux transformateurs montés en cascade

Comme le montre la figure 3, chaque étage comprend trois enroulements, excepté le 1^{er} étage

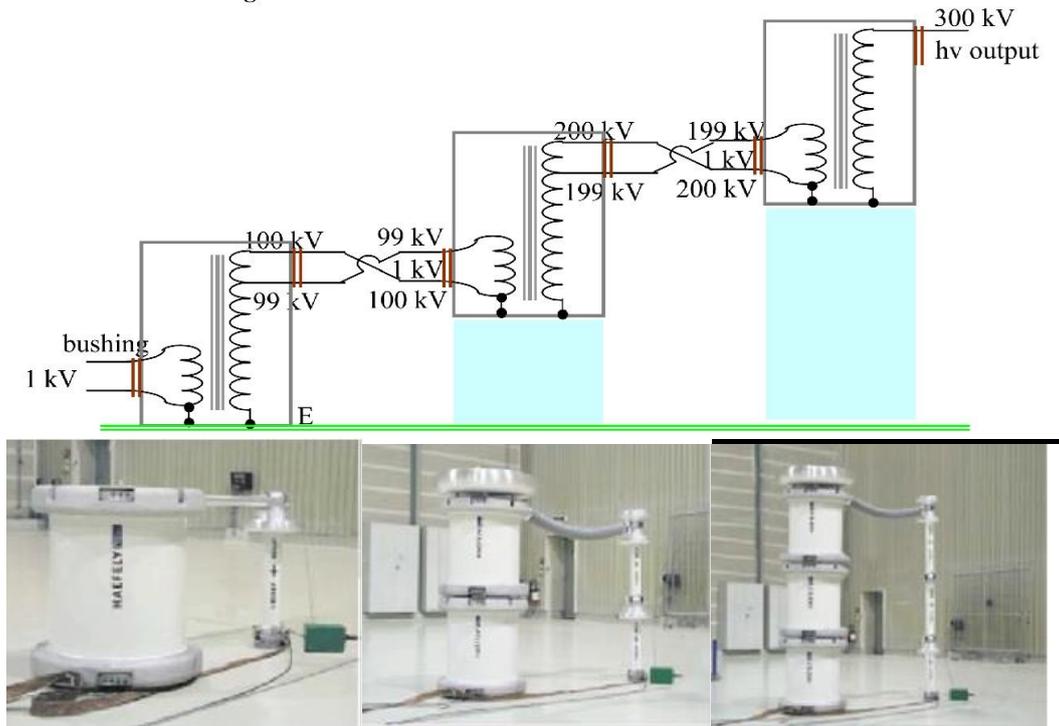


Fig.3 : Transformateurs montés en cascade

I-1-3 Circuit de résonance

Si une inductance est connectée en série ou parallèle avec un condensateur et qui ont la même impédance dans un circuit, le phénomène de résonance série ou parallèle apparaîtra. De plus, la consommation d'énergie de ce système est réduite de 10 à 15 fois par rapport à un système de test avec un transformateur conventionnel.

a- Circuit de résonance série

Le générateur de circuits résonants en série est principalement utilisé pour tester les câbles haute tension ou les appareillages isolés au SF₆. Une inductance série est ajoutée au secondaire du transformateur pour s'adapter à la charge.

Remarque : La tension de test U_{out} dépend de l'état de résonance du circuit de la figure 4.

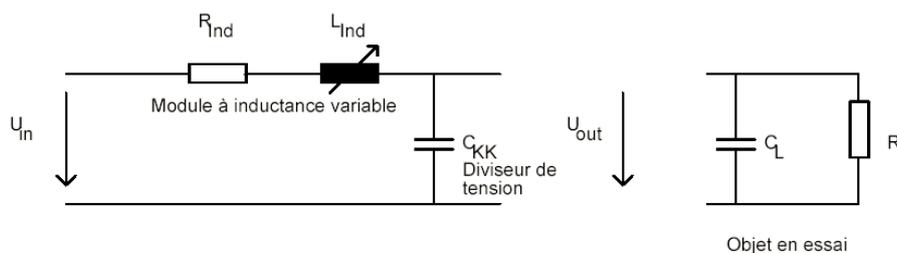


Figure 4 : Circuit de résonance série

Avantages et inconvénients de résonance série

Avantages :

- Faible consommation d'énergie, seulement environ 1/50 de la puissance de sortie
- Tension d'essai filtrée

Inconvénients:

- La tension de sortie dépend de l'état de résonance
- Seulement objets capacitifs
- Tension d'excitation requise

b- Circuit de résonance parallèle

La structure du générateur de circuit résonnant parallèle (ou le montage fonctionnel est schématisé sur la figure 5) est similaire à celle du circuit série car il s'agit d'un circuit double. Le condensateur C et l'inductance L sont connectée parallèlement, l'inductance est calculée pour être accordée avec la capacité à une fréquence de tension d'alimentation. Tout est connecté en série avec l'inductance de court-circuit "L_{cc}" ramenée dans le secondaire du transformateur haute tension.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L.C}}$$

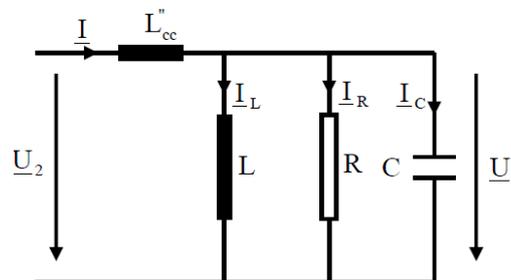


Figure 5 : Circuit de résonance parallèle

L'avantage de ce circuit est de réduire le courant du transformateur, car le transformateur haute tension ne fournit pas l'alimentation à l'objet C, mais assure les pertes actives de la bobine.

I-2 Sources de haute tension continue

La source en continu haute tension est utilisé dans plusieurs exemples, comme:

- Réseau de transport en courant continue (HVDC)
- Recherche de base: Sous une tension constante, il est plus facile de travailler et d'analyser des phénomènes que sous une tension variable.
- Plusieurs exemple exige l'utilisation d'une tension continue (radiologie, séparateur électrostatique, précipitateurs électrostatiques, etc.).

- Dans de nombreuses applications où des équipements de charge capacitive sont testés, pour des raisons économiques, la tension alternative est évitée.

I-2-1 Redressement

Utilisez des transformateurs et redresseurs haute tension pour les tests DC haute tension.

a- Redressement simple alternance

Le redresseur peut comprendre une pluralité de diodes connectées en série afin de limiter la tension inverse de chaque diode à une valeur acceptable, qui au total peut atteindre le double de la valeur crête de U_c .

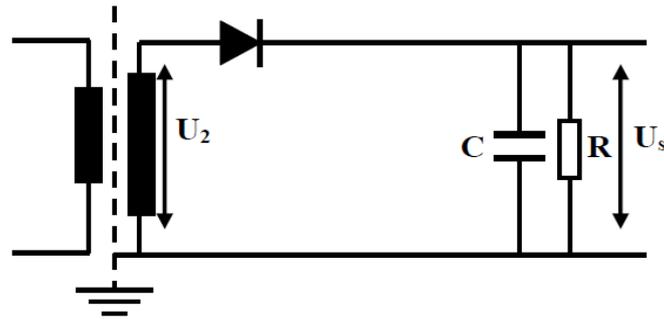


Figure 6 : Redresseur simple alternance en charge

On a : capacité du redresseur C pour lissage et capacité de l'équipement à tester et capacité parasite.

R : résistance de l'équipement en essai.

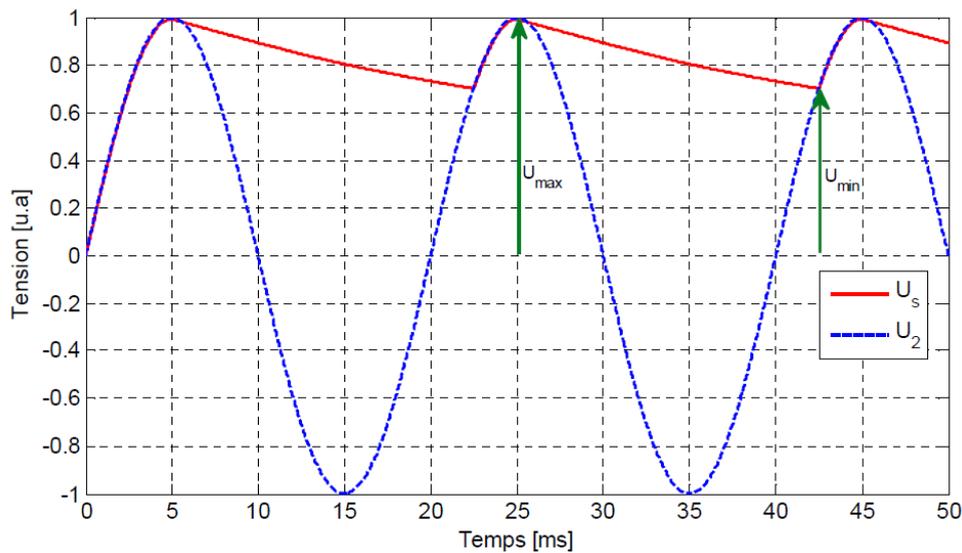


Figure 7 : Allure de la tension redressée délivrées par un redresseur mono-alternance

Le redressement fournit une tension lissée, et génère une ondulation:

Profondeur de l'ondulation : $\delta U_s = U_{\max} - U_{\min}$

Amplitude de l'ondulation : $\delta U_s / 2$

b- Redressement double alternance

Au contraire au redresseur demi-onde, la demi-onde négative est également redressée. Avec les capacités de lissage, il n'y a pas beaucoup de différence entre les composants de redresseur simple onde et les composants de redresseur pleine onde (Figure 8).

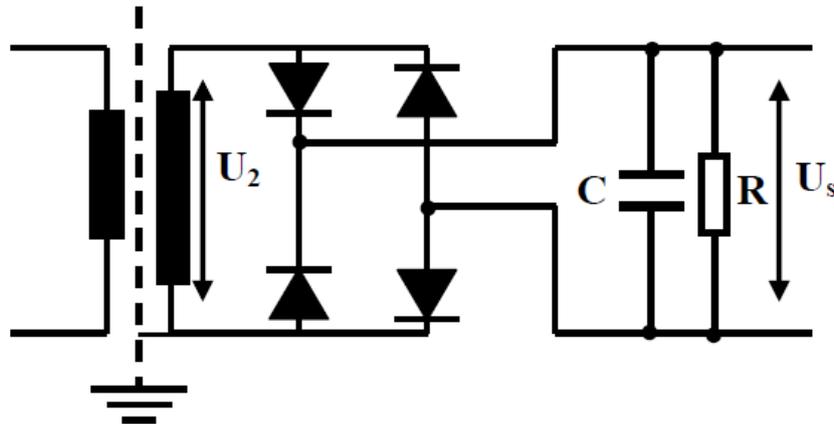


Figure 8 : Redressement à double alternance en charge (pont de Graëtz)

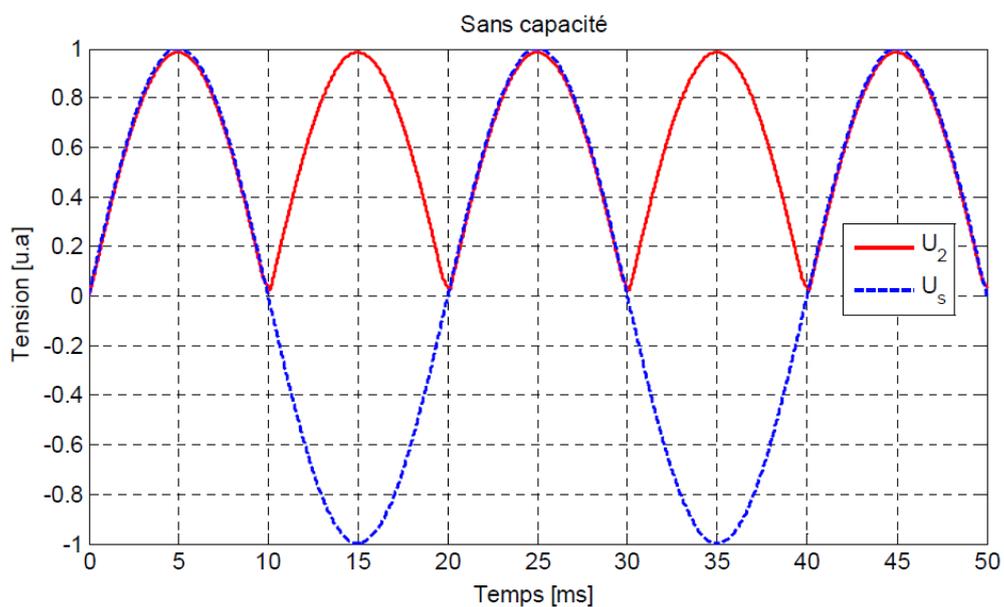


Figure 9 : Allure de la tension redressée délivrée par un pont de Graëtz.

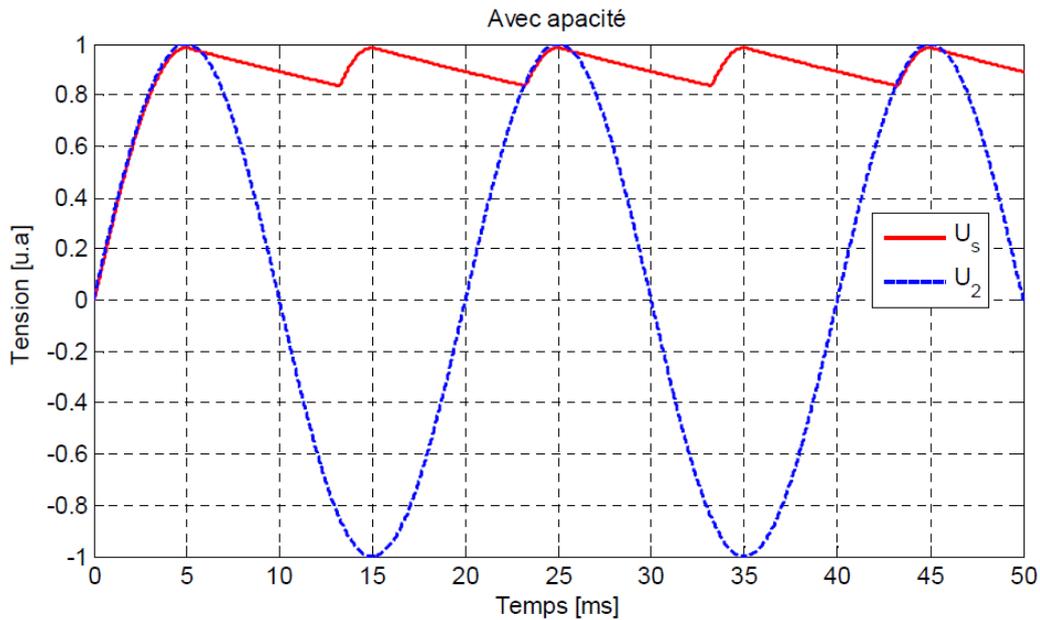


Figure 10 : Allure de la tension redressée délivrée par un pont de Graëtz avec Capacité de lissage.

I-2-2 Multiplicateur de tension

Il existe plusieurs types de multiplicateur de tension, sauf que le fonctionnement est le même. Le multiplicateur de Schenkel et le multiplicateur de Latour sont les plus courants.

a- Multiplicateur de Schenkel

Durant la période de demi-onde négative, C_1 est chargé à la tension maximal (V_{max}). Dans la demi-onde suivante, cette tension est ajoutée à la tension du transformateur de sorte que la tension de C soit égale au double de la tension maximal ($2 V_{max}$). (Figures 11 et 12).

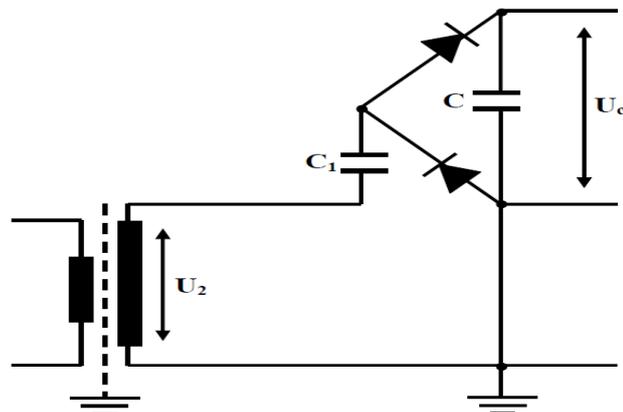


Figure 11 : Doubleur de Schenkel

Par conséquent, la tension à vide à la sortie égale: $U_c = 2\sqrt{2}U_2$ Comme premier avantage, le redresseur multiplicateur Schenkel offre la possibilité d'utiliser le transformateur haute tension avec un point de masse et une isolation entre le secondaire et le primaire comme demi-tension de sortie.

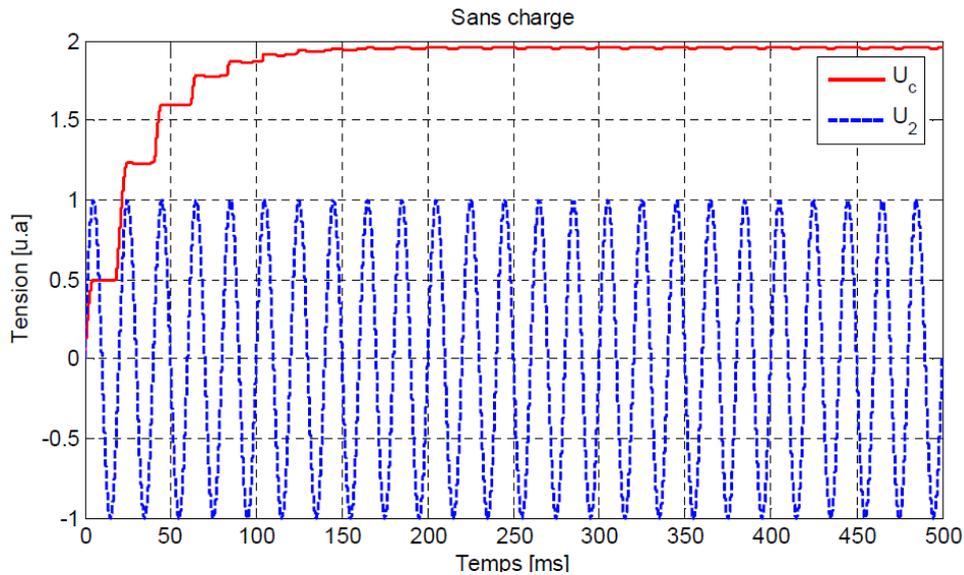


Figure 12 : Allure de la tension redressée délivrée par Doubleur de Schenkel

a- Multiplicateur de Latour

L'inverse du multiplicateur de Schenkel, ce dernier son inconvénient est de fournir une tension pleine pour un seul condensateur. Le multiplicateur Latour est composé de deux condensateurs en cascade, le premier est chargé au max à la demi-onde positive de la tension U_2 , et l'autre est chargé de la même manière pendant la période alternative négative. L'inconvénient du multiplicateur Latour est qu'il nécessite un transformateur haute tension, mais un transformateur haute tension est nécessaire et son secondaire a deux bornes isolées de la terre.

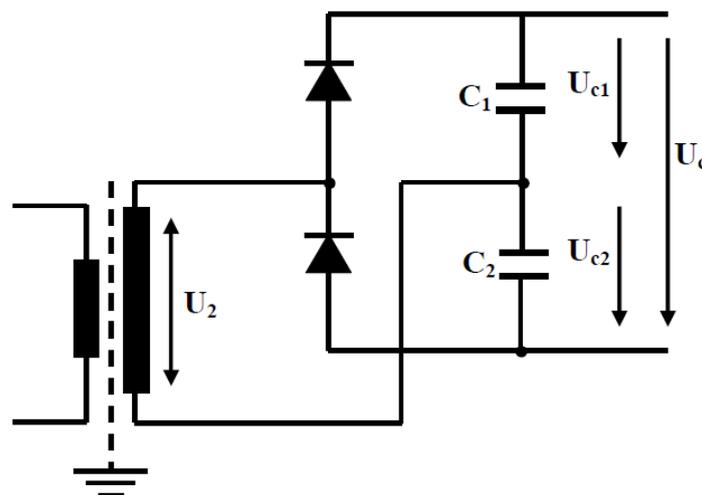


Figure 13 : Doubleur de Latour

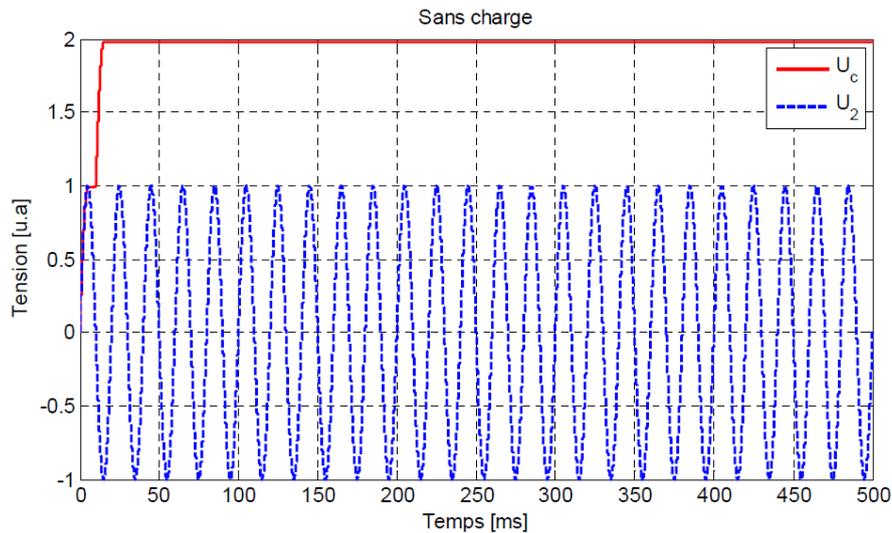


Figure 14 : Allure de la tension redressée délivrée par le doubleur de Lateur

b- Cascade de Greinasher

Cette cascade s'appelle Greinacher waterfall ou Cockcroft-walton waterfall et se compose d'un groupe de multiplicateurs de Schenkel. La cascade est composée d'un empilement de N multiplicateurs de Schenkel, de sorte que la tension de sortie à vide peut être obtenue: $U_{c,0} = 2 N\sqrt{2}U_2$ En faisant passer le courant I_R à travers la résistance R , la cascade peut fournir la tension maximale:

$$U_{c,R} = U_{c,0} - \Delta U,$$

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

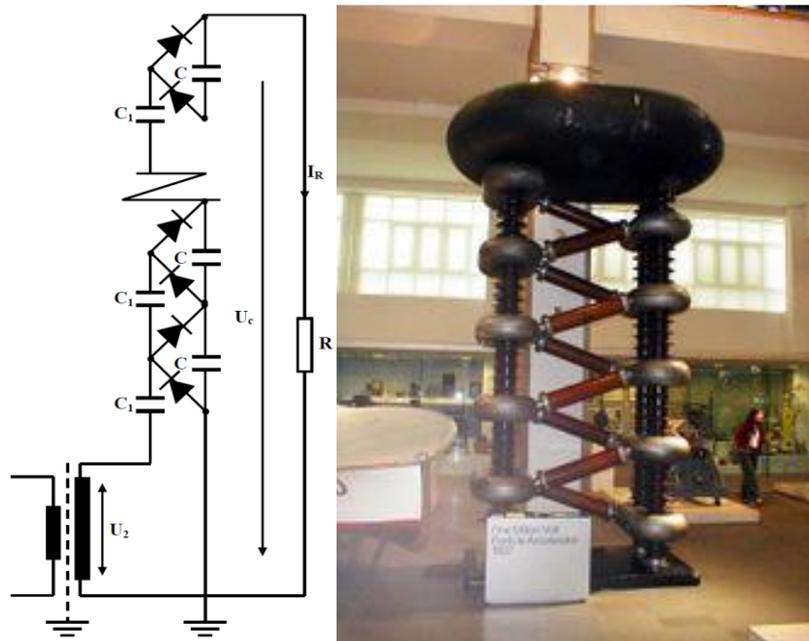


Figure 15 : Cascade de Greinacher ou de Cockcroft-walton

Remarque : Le nombre optimal de niveaux n'est généralement pas supérieur à 10, car la chute de tension deviendra trop importante si elle le dépasse. La tension fournie par ce type de générateur atteint 5 MV. Sauf que l'amplitude du courant (10 mA) est encore très faible.

c- Multiplicateur de tension

Après fermeture de l'interrupteur S_1 , les condensateurs C_i branché en parallèle vont être charger, puis on ouvre l'interrupteur S_1 et on ferme S_2 : addition de la tension des condensateurs C_i , puisqu'ils sont connectés en série pour obtenir la tension de sortie au borne de C. n : quantité de condensateur C_i .

Remarque: Le multiplicateur est seulement utilisé qu'après la charge du condensateur et a une durée de vie clairement définie (en fonction d'énergie stockée dans le condensateur), car lorsque le condensateur est déchargé, la tension chute. Passez à zéro.

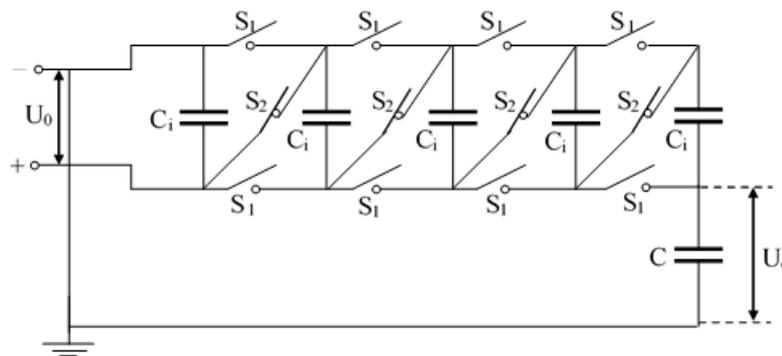


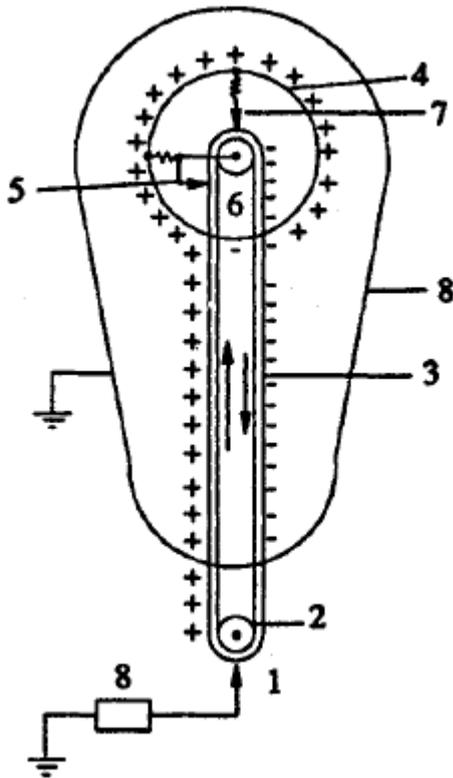
Figure 16 : Multiplicateur de tension

I-2-3 Générateurs Van de Graff électrostatiques :

Particulièrement utilisé au laboratoires de physique nucléaire.

Fonctionnement :

Une série de pointes d'électrode ou de lames très minces (électrodes en couronne) sont chargées par charge corona pour produire 17 motifs de rubans isolants. La courroie tourne à une vitesse réglable pour introduire la charge dans la partie supérieure du générateur (sphère), où elle se trouve. Recueilli par le collectionneur. En utilisant une aiguille connectée à la paroi interne de l'électrode haute tension, une petite quantité de charge sur le collecteur de courant peut être "échappée" par l'effet corona. Lorsqu'il atteindra son



maximum, ces charges négatives seront neutralisées par l'électrode couronne. L'électrode sphérique continue de stocker la charge jusqu'à ce qu'elle atteigne une tension de masse sphérique comparable (masse sphérique). Le générateur Van de Graff n'a pas été largement utilisé car son courant de sortie est très faible (environ μA), mais sa tension de sortie peut atteindre 100 MV.

1. Le point où la charge est générée avec frottement
2. Poulie entraînée par moteur
3. Ruban isolant utilisé pour transporter les charges
4. Electrode HT
5. Collecteur de charge
6. La poulie supérieure est isolée de HT
7. Pointe pour éliminer la charge excessive.
8. Boîtier métallique mis à la terre.

Figure 17 : Générateurs électrostatiques : (Van de Graff)

Remarques

- a) Le potentiel délivré est donc proportionnel à la vitesse de la courroie et au temps de charge ; par ce procédé la tension pourrait donc atteindre l'infini si ce n'était les pertes de charge qui commencent à partir d'une certaine valeur, à cause de la neutralisation produite par effet couronne.
- b) L'électrode haute tension a une forme ronde (sphère) pour justement éviter les pertes de charge générées par effet couronne.

I-3 Sources de tension impulsionnel (choc)

La source d'impulsion (choc) est la tension unidirectionnelle trop élevée, appliquée en un court laps de temps de l'ordre de microsecondes. La tension ou le courant augmente rapidement jusqu'à la valeur de crête puis diminue plus lentement à la valeur zéro.

La source impulsionnelle est nécessaire dans les situations suivantes:

- Simulez les surtensions de ligne, telles que les ondes de foudre, pour la recherche.
- Effectuer des essais sur des équipement haute tension (tels que les dispositifs de protection contre les surtensions) conçus pour fonctionner pendant les périodes de surtension.

L'impact de la foudre sur le réseau électrique génèrera des ondes de tension sur la ligne, ce qui produira une distribution de potentiel inégale dans les enroulements du transformateur et entraînera une diminution des performances d'isolation.

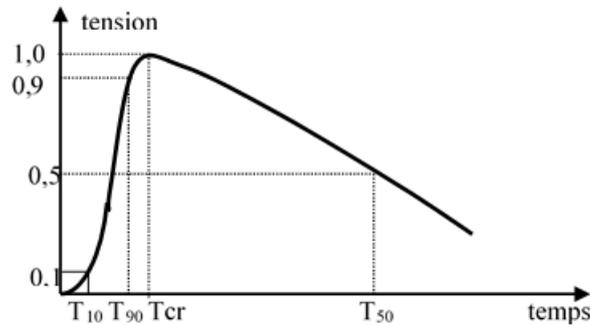


Figure 18 : Onde de choc conventionnelle

Les sources d'impulsion est caractérisé par la constante de temps t_1 et t_2 :

a) Pour les français :

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

Onde impulsionnel normalisée pour étudié :

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

b) Pour les anglais :

$$t_1 = 1,25 T_{10} T_{90} \text{ et } t_2 = T_{50}.$$

L'onde impulsionnel normalisée pour l'étude du coup de foudre est l'onde 1/50 μs , c'est à dire :

$$t_1 = 1 \mu s \text{ et } t_2 = 50 \mu s.$$

c) Pour les américains :

$$t_1 = 1,5 T_1 T_2 \text{ et } t_2 = T_{50}.$$

$$1,5/40 \mu s (t_1 = 1,5 \mu s \text{ et } t_2 = 40 \mu s).$$

L'onde de choc standard normalisée vaut :

I-3-1 Source impulsionnel à un étage

Typiquement, la connexion de la diode D avec le transformateur HT fait chargé condensateur c_1 , figure 19. Le temps de chargement est contrôlé via la résistance R_a (résistance d'amortissement). La valeur du temps de chargement $\tau = R_a c_1$ varie de 10 à 20 s. Si la tension de claquage U_0 est atteinte de l'éclateur E, implique la décharge rapide de c_1 vers c_2 via la résistance de front R_1 . La résistance de l'onde de queue R_2 étant bien supérieure à celle de R_1 , le condensateur c_1 et c_2 se déchargeront alors progressivement dans R_2 . Les deux résistances R_1 et R_2 est utilisées d'une manière à maîtriser la constante de temps court d'ondes de front qui nécessite une charge rapide du condensateur c_2 et la constante de temps long d'onde de queue qui nécessite une décharge plus lente, la résistance R_2 est très grande par rapport à R_1 .

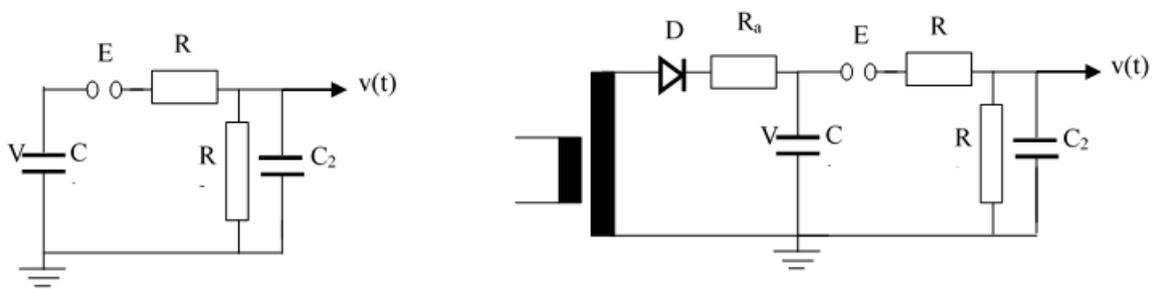


Figure 19 : Source de choc à un étage

C_1 : capacité d'impact (stockage de l'énergie)

C_2 : La capacité de l'équipement a mesuré;

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

R_1 : la résistance série du front d'onde;

R_2 : la résistance parallèle de la queue d'onde;

I-3-2 Source impulsionnel à plusieurs étages (Générateur de Marx)

La source de tension appelé Marx est un groupe de sources d'impulsions à un seul étage, installés en série, pouvant obtenir une tension continue plus élevée. La tension obtenue est d'environ MV (le maximum peut atteindre environ 6MV). Comme première étape, la fermeture de sectionneur I favorise le chargement de tous les condensateurs C placé en parallèle via une résistance R_{ch} qui est grande. La source de tension continue assure l'alimentation U_0 entre 50 et 200 kV. Puis, la deuxième étape, en ouvre le sectionneur et le contrôle de l'amorçage ce fait en même temps de tous les éclateurs E_i (le claquage de l'éclateur est ajusté pour être

légèrement supérieure à U_0); à cette phase, les n condensateurs sont connectés en série et constitue une source de tension égale à nU_0 (figure 20).

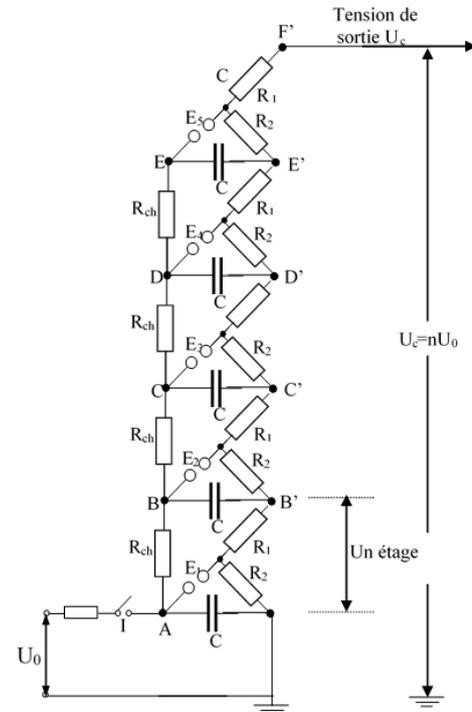


Figure 20 : Générateur de Marx à 5 étages

I-3-3 Source haute tension de Ruhmkorff

L'interruption du courant dans le circuit de détection génère une haute tension. La vibration du disjoncteur s'est fermée et a soudainement ouvert le circuit

$$L' \text{équation du circuit est : } u_p = R_p i_p + L_p \frac{di_p}{dt} + M \frac{di_s}{dt}$$

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

i_p courant primaire et i_s courant secondaire ;

M est l'inductance mutuelle entre le circuit primaire et le circuit secondaire.

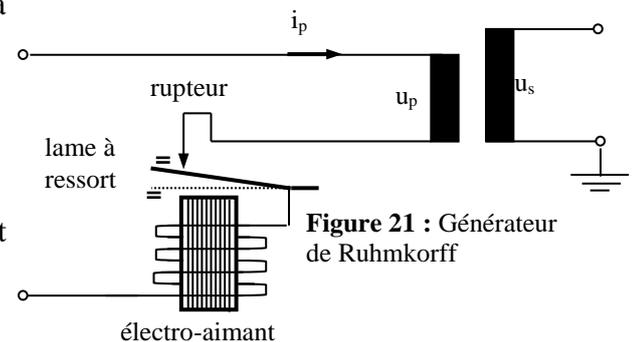


Figure 21 : Générateur de Ruhmkorff

L'interruption du courant est très courte ($dt \cong 0$), les paramètres $\frac{di_p}{dt}$ et $\frac{di_s}{dt}$ sont tellement élevés qu'ils généreront une haute tension en peu de temps. Ces générateurs peuvent être utilisés lorsqu'une haute tension est requise dans un court laps de temps (comme l'allumage). On les trouve dans les dispositifs des lampes à décharge et des moteurs à combustion interne (bobines haute tension des automobiles).

I-3-4 Source haute tension de Tesla

Fournit une tension d'oscillation élevée. Le condensateur C1 est chargé via le transformateur HT associé à la diode D, comme illustré à la figure 21. Le condensateur C1 se charge via le transformateur à la tension d'alimentation U1. Lorsque la tension est élevée, l'éclateur E va claquer et provoquera une décharge d'énergie stockée dans la capacité C1 dans les deux circuits RLC couplés du système, ce qui se traduira par une tension de sortie U2 augmentée de manière oscillante (voir Figure 22).

- Entre t_0 et t_1 : charge du condensateur ;
- Entre t_1 et t_2 : l'amorçage de l'éclateur, crée par couplage électromagnétique une tension oscillante.
- Après l'instant t , l'arc dans l'éclateur s'éteint par soufflage d'air, et la tension s'amortit.

L'amortissement d'oscillation est garanti par les résistances R_1 et R_2 .

Éliminez l'arc à la borne de l'éclateur en soufflant de l'air pour arrêter la tension oscillante.

La tension obtenue avec une fréquence HF de 10^4 à 10^5 Hz peut atteindre une valeur de 1 MV.

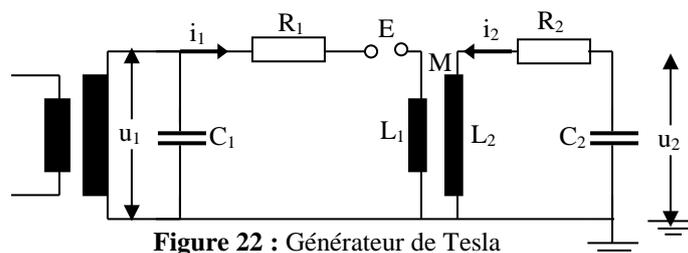


Figure 22 : Générateur de Tesla

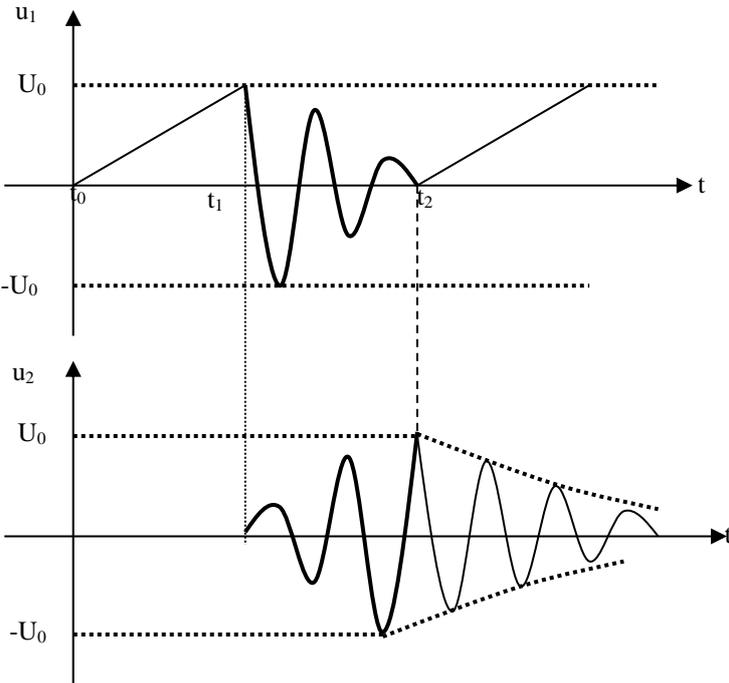
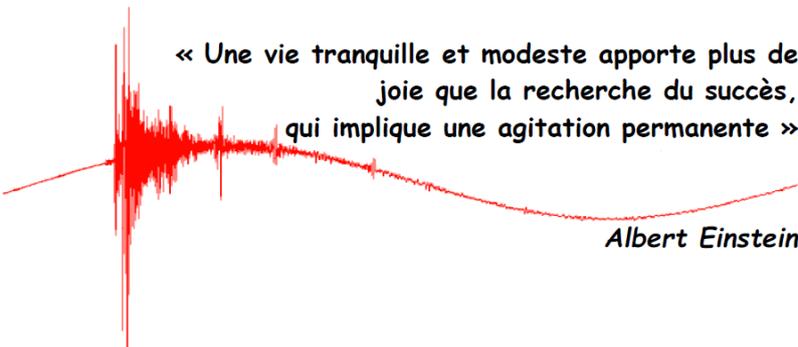


Figure 23 : Allures de la tension u_1 et u_2 du transformateur Tesla

CHAPITRE II

METROLOGIE EN HAUTE TENSION



« Une vie tranquille et modeste apporte plus de
joie que la recherche du succès,
qui implique une agitation permanente »

Albert Einstein

CHAPITRE II METROLOGIE EN HAUTE TENSION

Dans la science et la technologie modernes (recherche fondamentale, environnement, imagerie, conception et développement de nouveaux matériaux diélectriques et semi-conducteurs; production, transport et distribution d'énergie électrique, diagnostic, compatibilité électromagnétique), l'utilisation de la haute tension est d'une importance capitale.

- ❖ Par conséquent, pour tout ingénieur en génie électrique et bien au-delà, il est nécessaire d'avoir la connaissance des systèmes de génération et de mesure haute tension.
- ❖ Le but de ce chapitre est de fournir des connaissances de base sur les méthodes de mesure et les données techniques importantes.

II-1 Mesure de charge

II-1-1 Les voltmètres électrostatique

Le voltmètre électrostatique favorise la mesure des potentiels élevés pour des charges faibles. Le dispositif est constitué de deux électrodes plates et parallèles A et B, de sorte que le champ électrique E_h est uniforme au niveau de la surface plane de l'électrode. La pression électrostatique sur l'électrode de mesure b située au centre de l'électrode B dévie l'aiguille I, et l'échelle de déviation peut être directement calibrée en kilovolts. La plage de mesure de l'appareil peut être ajustée directement en modifiant d. Les voltmètres électrostatiques peuvent faire des mesurer de tension entre 50 V à 1 MV, et les voltmètres électrostatiques peuvent également être utilisés dans des courants alternatifs jusqu'à plusieurs mégahertz.

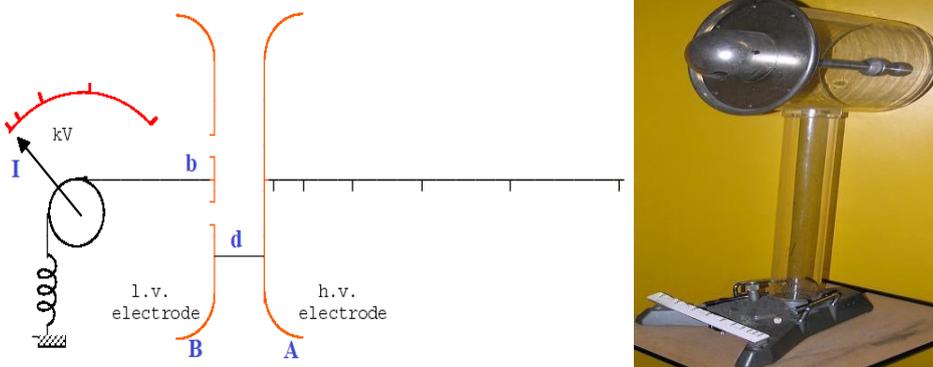


Figure 1 : Voltmètre électrostatique

II-2 Mesure des tensions

II-2-1 Éclateur à sphères

L'éclateur est une référence standard pour mesurer la haute tension. L'éclateur sphérique ou spintermètre est composé de deux sphères à diamètre D , isolées du sol, et la distance entre elles peut être ajustée. En mesurant la distance entre les sphères et en utilisant un abaque qui relie la tension de claquage à la séparation à l'aide d'un abaque, la tension est mesurée au seuil de décharge destructive selon les conditions suivantes:

- ❖ Le type de liaison (par exemple, sphère relié la terre)
- ❖ Le diamètre de la sphère;
- ❖ Conditions atmosphériques.

Cet appareil est une référence régulière pour l'étalonnage de tous les voltmètres utilisés dans les laboratoires d'essais haute tension (Figure 2).

Il mesure la valeur de crête de la tension de claquage et peut être utilisé pour les mesures de tension alternative; les coups de foudre et les chocs de manœuvre (différentes valeurs dépendent de la polarité); et la tension continue à deux polarité (la CEI recommande l'utilisation de éclateurs pointe-pointe dans DC.).



Horizontal sphere gap 250 mm

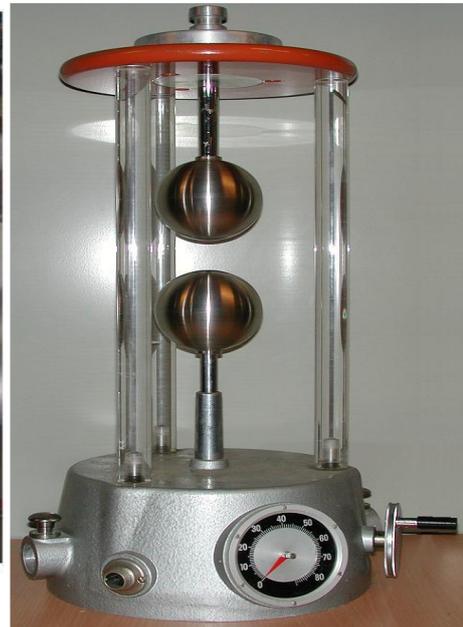


Figure 2 : Eclateur à sphères position horizontale et verticale.

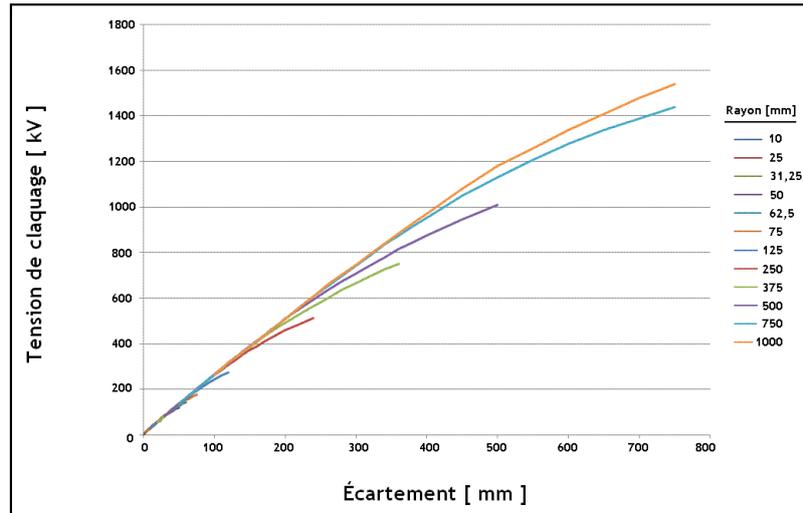
Tensions de claquages :

Figure 3 : Tensions de claquage dans des conditions atmosphériques standard, applicables à CA 50 Hz, CC, ainsi qu'aux coups de foudre en polarité négative.

Corrections atmosphériques

La tension de claquage indiquée dans le document CEI est valable dans les conditions atmosphériques comme suit :

- Température standard T_0 : 293K (= 20°C)
- Pression standard P_0 : 101,3kPa
- Humidité absolue standard H_{abs} : 8,7 g/m³ ($H_{rel} = 50\%$ à P_0 et T_0)

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

La tension réelle U_r est donnée par : $U_r = U_d \cdot K$, avec $K = d \cdot \delta$

$$\delta = \frac{P}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T} \quad (\text{densité}) \quad k = 1 + \left[0,002 \left(\frac{H_{abs}}{\delta} - 8,5 \right) \right] \quad (\text{humidité})$$

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

II-2-2 Mesure galvanométrique

La tension est mesurée en dérivant le courant I circulant à travers la plus grande résistance R ($R \geq 1M\Omega$). La valeur mesurée du courant I est utilisée pour calculer la tension $U = RI$.

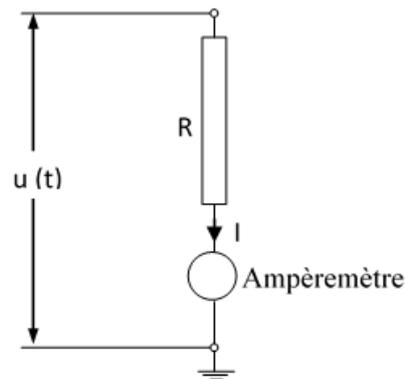


Figure 4 : Mesure galvanométrique

Avantages:

-Même en présence d'un champ électrique parasite, le courant de mesure extrait est suffisant (plusieurs mA) pour fiabiliser la mesure.

Inconvénients:

- $R = f$ (dissipation thermique, humidité, vieillissement, température, ...).
- Par conséquent, il est difficile de garantir la précision de la mesure.

Cette méthode de mesure implique la mise en place d'une connexion électrique directe (liaison Galvanique) entre la HT et l'équipement de mesure, ce qui exige le placement d'un système de limitation de surtension.

II-2-3 Diviseurs de tension

Le diviseur de tension est une connexion en série de composants passifs, comprenant généralement une borne haute tension B1, une borne basse tension B2 et une borne de masse commune (figure 5).

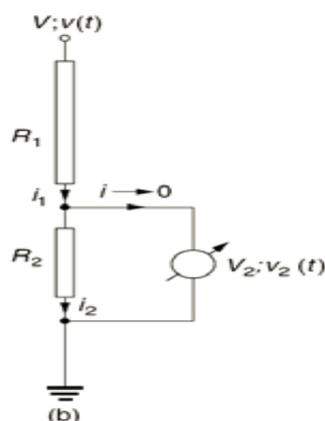


Figure 5: Diviseur de tension

II-3 Diviseurs pour tension continue et alternative :

II-3-1 Diviseur de tension résistif:

Le diviseur est constitué d'une résistance grande R_1 et une résistance petite R_2 connectées en série.

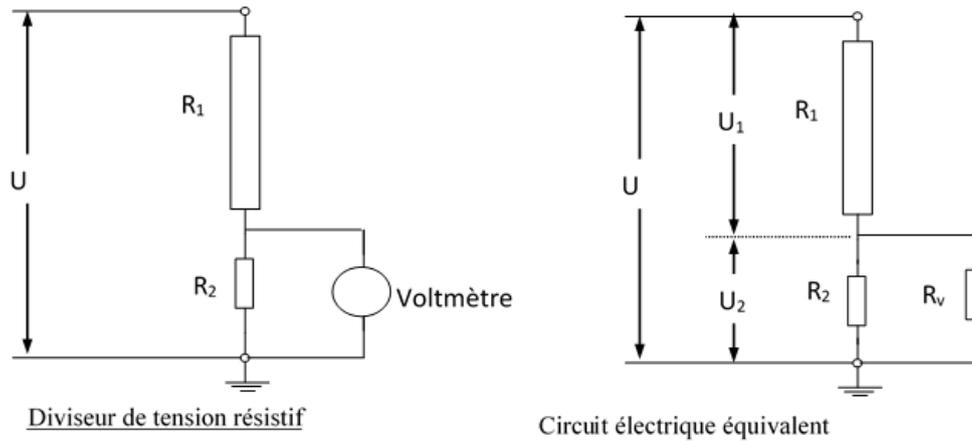


Figure 6 : Diviseur de tension résistif

L'appareil de mesure est bien entendu protégé par un limiteur de surtension placé en parallèle (omis dans tous les schémas).

Rapport de division g:

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

Avec $\frac{1}{R_2'} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_v}$ où R_v résistance du voltmètre.

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

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

Le résultat de la mesure de ddP U_2 aux bornes de R_2 nous fournit la valeur de la tension totale U .

Puisqu'il s'agit d'un rapport (R_1 / R_2), les changements de température, d'humidité et de vieillissement se produisent généralement dans la même direction, de sorte que la précision de la mesure n'est guère affectée (généralement inférieure à 1%).

II-3-2 Diviseur de tension capacitif :

Concernant la tension alternative, le diviseur de tension capacitif est utilisé pour minimiser la perte d'énergie. Le condensateur C_1 est un condensateur supporte la haute tension, et sa valeur de capacité est bien inférieure à la valeur du condensateur C_2 de la partie basse tension. En revanche, on ignore l'impédance grande du voltmètre devant l'impédance de C_2 .

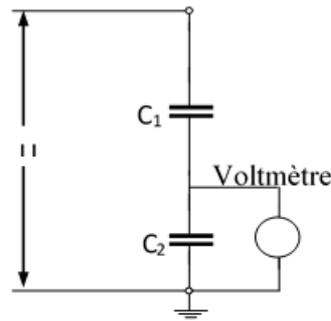


Figure 7 : Diviseur de tension capacitif

Rapport de division :

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

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

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

Capacités parasites :

On doit tenir compte, bien entendu, des capacités parasites de la ligne HT par rapport à la terre (ordre de grandeur : $20 - 40 \text{ pF/m}$).

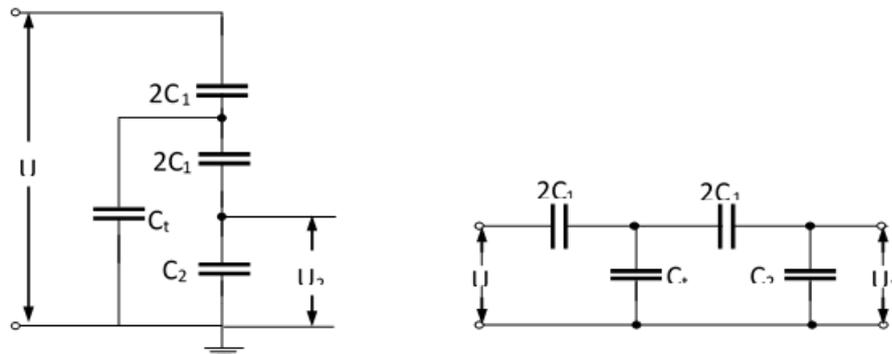


Figure 8 : Diviseur de tension capacitif

Circuit électrique équivalent Avec la capacité parasite contre terre C_t .

Le rapport de division, en tenant compte de la capacité parasite C_t devient :

$$g = \left| \frac{U}{U_2} \right| = \frac{C_2 + C_1}{C_1} \left[1 + \frac{C_t}{4C_1} \left(\frac{2C_1 + C_2}{C_1 + C_2} \right) \right]$$

Remarque : Les résistances et les capacités HT sont spécialement conçues pour leur utilisation en haute tension (pertes minimisées, éviter le claquage et l'effet couronne surtout).

II-4 Diviseurs de tension de choc :

La propagation des ondes de choc dans les conducteurs du circuit de mesure affectera la mesure elle-même.

II-4-1 Diviseur résistif :

Capacités parasites non considérées

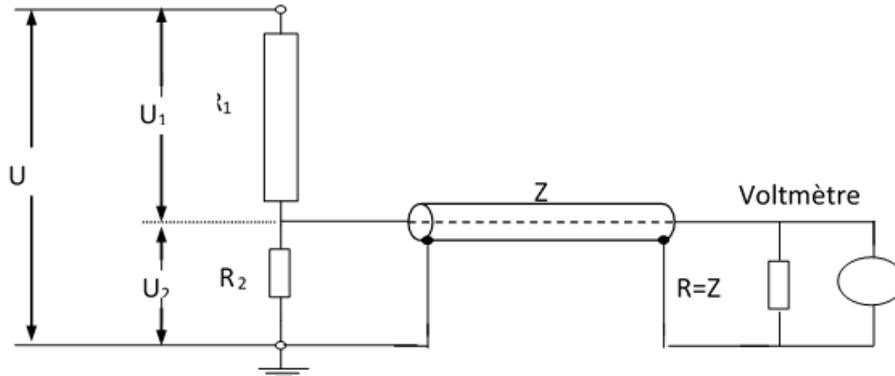


Figure 9 : Diviseur de tension résistif pour la mesure de la tension de choc

En cas de propagation des phénomènes de choc, utiliser un câble coaxial (impédance Z) en sortie, la résistance R du câble est égale à Z pour éviter les réflexions parasites. De même, si possible, R2 doit être mis en correspondance avec Z ($R_2 = Z$), pour éviter les réflexions parasites qui peuvent doubler la tension.

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

En règle générale, le câblage et les adaptateurs font partie du système de mesure de tension d'impulsion.

II-4-2 Diviseur capacitif :

Capacités parasites non considérées

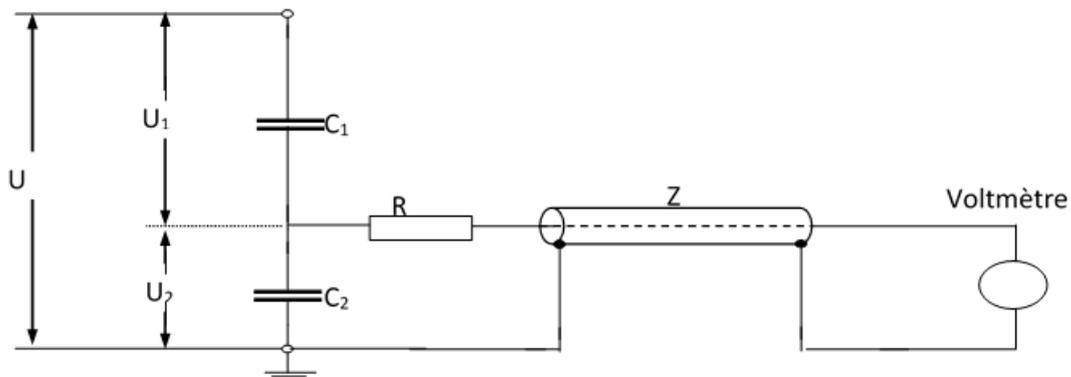


Figure 10 : Diviseur de tension capacitif pour la mesure de la tension de choc

Pour éviter la réflexion de l'onde et donc le doublement de la tension, on insère une résistance d'entrée destinée à adapter le câble coaxial.

Remarque : les écrans d'équilibrage du potentiel (sphère et anneaux) permettent de rétablir une répartition égale de la tension (cas des diviseurs capacitifs de choc, isolateurs...).

II-5 Transformateur de tension

Dans les réseaux électriques, la tension est surveillée par des transformateurs de mesure.

Le transformateur de potentiel est un appareil de mesure où la tension de son circuit secondaire est proportionnelle à la tension du circuit primaire et déphasée par rapport à cette dernière. Les transformateurs de tension sont également appelés transformateurs de potentiel (TP).



Figure 11 : transformateur de tension

II-5-1 Transformateur des tensions capacitives

Un transformateur capacitif est employé pour le réseau électrique contient un diviseur de tension capacitif avec un transformateur de potentiel.

La branche basse tension du diviseur de tension et l'enroulement primaire du transformateur forment un circuit résonnant.

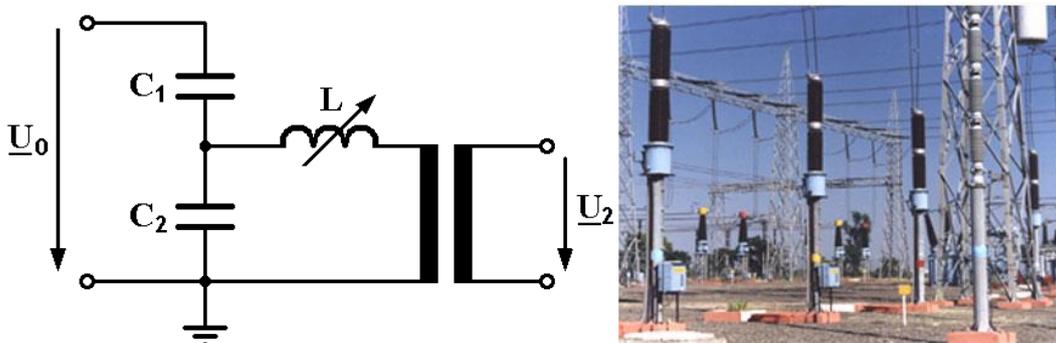


Figure 12 : transformateur capacitif

Avantages du transformateur des tensions capacitives

- La résonance favorise d'obtenir plus de courant à la sortie, ce qui peut mieux résister aux interférences de la transmission longue distance.
- Le circuit résonnant est utilisé comme filtre pour éliminer la tension transitoire.
- Structure économique, jusqu'à niveau de tension le plus élevé (MV)

II-6 Mesure des courants

II-6-1 Transformateurs de courant

Dans les réseaux électriques, le courant est mesuré par des transformateurs de mesure.

Le **transformateur dite de courant** est un appareil de mesure où le courant du circuit secondaire est proportionnel au courant primaire et est approximativement déphasé par rapport au courant primaire.

Les transformateurs de courant sont appelés *pince ampèremétrique*.



Figure 13 : transformateur de courant

II-6-2 Transformateur de courant Haute Fréquence

Le courant d'impulsion (foudre, etc.) peut être mesuré par un transformateur de courant conçu pour la haute fréquence.

Le transformateur haute fréquence de courant est également appelé **sondes de courant**.



Figure 14 : transformateur de courant HF

II-6-3 Transformation magnéto-optique

Le transformateur de courant magnéto-optique (*MOCT : Magneto-Optic Current Transformer*) fonctionne selon l'effet Faraday.

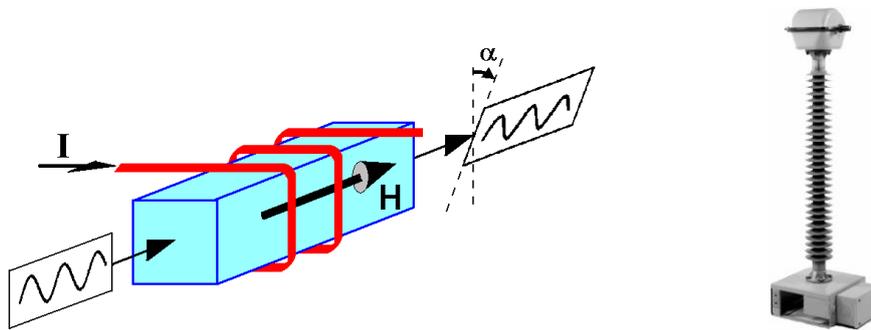


Figure 15 : transducteurs magnéto-optiques

Ce transformateur utilise l'effet opto-électrique de Faraday. Cet effet fait tourner le plan de polarisation du faisceau de lumière polarisée traversant la cellule de verre. Cette rotation est liée à la force du champ magnétique produit via le courant à mesurer: $\Phi = K_v l H$

où Φ est un angle de rotation du plan de polarisation, K_v la constante du Verre (A-1), l la longueur de la cellule (m) et H le champ magnétique (A/m).

La rotation du plan de polarisation modifie l'intensité de la lumière, qui est détectée par la photodiode et convertie en un signal électrique mesurable.

II-6-4 Bobine de Rogowski

La bobine de Rogowski mesure le courant alternatif ou pulsé. La bobine est formée d'un fil enroulé en forme de spirale, lequel fil revient par le centre de la forme en spirale.

Avantages

Système ouvert, permettant de mesurer un courant sans contact galvanique. Possibilité de bobine de très grandes dimensions.

Utilisation

- Courants dans les transformateurs de puissance
- Courants de foudre

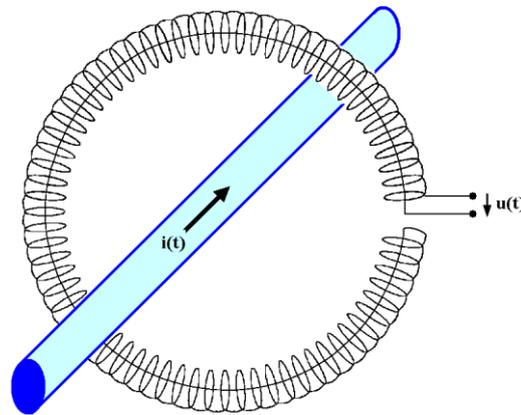
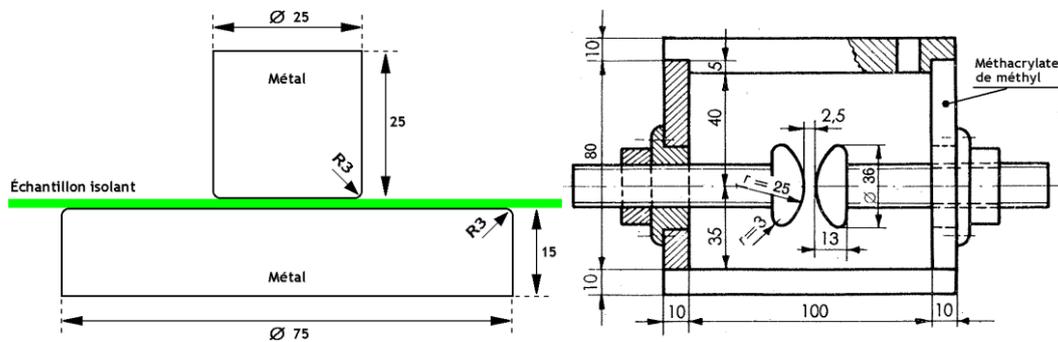


Figure 16 : Bobine de Rogowski

II-7 Mesure des rigidités diélectriques

La rigidité diélectrique des isolants liquides ou solides peut être mesurée en continue, en courant alternatif ou en tension d'impulsion.

Le principe est très simple, c'est-à-dire qu'une tension croissante est appliquée à l'objet mesuré jusqu'à ce qu'un claquage d'isolement se produise.



Électrodes destinées à la mesure de la rigidité diélectrique des échantillons solides en forme de feuilles ou de plaques.

Cellule d'essai destinées à la mesure de la rigidité diélectrique des échantillons liquides

Figure 17 : Mesure de rigidité diélectrique

CHAPITRE III
COMPATIBILITE
ELECTROMAGNETIQUE

« En tant qu'êtres humains, nous avons été dotés
de ce qu'il faut d'intelligence pour nous
rendre compte à quel point celle-ci est
inappropriée face à l'existence »

Bertrand Russell

CHAPITRE III COMPATIBILITE ELECTROMAGNETIQUE

Introduction

Tous les systèmes électriques et électroniques sont soumis aux interférences d'énergie parasite, qui peuvent traverser les frontières par inadvertance. Cette énergie parasite est appelée *interférence électromagnétique*.

Il existe différentes sources d'interférences: les interférences provenant de sources naturelles et les interférences provenant d'activités humaines (artificielles).

Pollution électromagnétique: la majorité des équipements électriques et électroniques généreront des champs électromagnétiques perceptibles dans leur environnement. Toutes ces zones provoquent une réelle pollution et perturbent parfois le fonctionnement d'autres équipements.

Exemple : Il est interdit d'utiliser les téléphones portables sur les avions car ils émettent des champs électromagnétiques et les systèmes d'assistance aux pilotes radio (navigation, décollage / atterrissage) peuvent y être sensibles.

III-1 Compatibilité électromagnétique (CEM) ou Electromagnétique compatibility (EMC) :

La CEM est la capacité d'un appareil ou d'un système électronique à fonctionner de manière satisfaisante dans son environnement (électromagnétique) sans provoquer d'interférences électromagnétiques intolérables avec quoi que ce soit dans l'environnement.

Il est à noter que le système électromagnétique compatible est conforme aux trois normes suivantes:

- Il n'interférera pas avec le fonctionnement d'autres systèmes,
- Il n'est pas dérangé par les interférences provenant d'autres systèmes en fonctionnement,
- Il n'interférera pas avec lui-même.

III-2 Qui est concerné par la CEM ?

Tous les appareils, équipements ou systèmes électroniques: par exemple dans un PC, cela signifie que chaque composant doit être compatible au niveau CEM, le PC lui-même doit être compatible, et dans un réseau composé de plusieurs PC et de plusieurs appareils électroniques, les composants doivent conforme aux **normes** CEM. Ensuite, CEM couvre tous les domaines de l'électronique et de l'électricité. Il concerne toutes les fréquences du courant continu au GHz.



Figure 1 : Eléments concernés par la CEM

III-3 Sources de perturbations

La source de rayonnement électromagnétique peut être :

- Naturelle : atmosphériques, galactiques, solaires, bruit thermique terrestre, ...
- Artificielle : Certaines de ces sources sont:

Intentionnelles : émetteurs radio, téléphone portable, fours micro-ondes, fours à induction, fours à arc électrique, soudage à l'arc, lampes à décharge, ...

Non intentionnelles : Système d'allumage de moteur à combustion interne, tous les systèmes utilisés pour allumer et éteindre les signaux électriques, les lampes à décharge, l'électronique de commande et l'électronique de puissance, électronique de protection, appareillage de puissance, moteur puissant à collecteur, démarrage de tout type de moteur puissant.

III-4 Principaux acteurs de perturbation sont :

Les interférences électromagnétiques provoquent l'apparition d'un signal électrique indésirable, qui s'ajoute au signal utile.

III-4-1 Harmoniques

Causes

- Ils sont générés par des appareils qui consomment des courants non sinusoïdaux, tels que des lampes fluorescentes ou des alimentations à découpage (appareils équipés de composants de commutation non linéaires (appareils équipés de composants non linéaires tels que diodes, thyristors, etc.)).

Conséquences

- Échauffement des câbles (neutre triphasé).
- Vieillesse prématurée des composants électroniques.

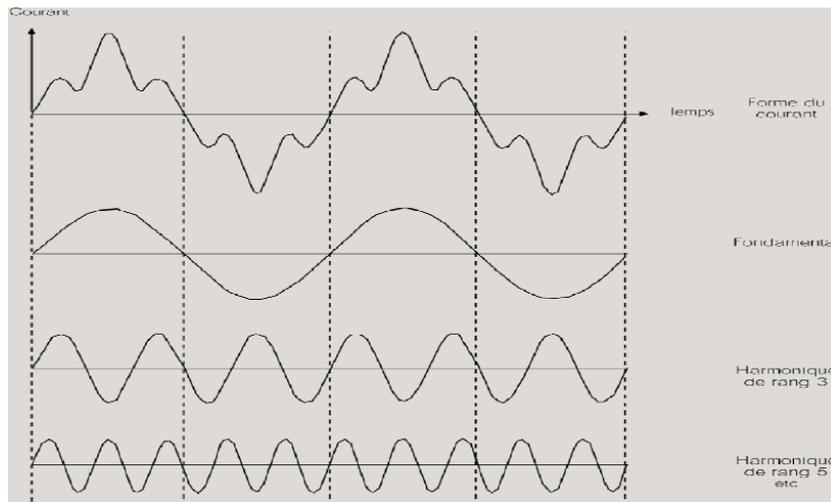


Figure 2 : Forme d'harmoniques

III-4-2 Fluctuations de tension rapides

Légères fluctuations de la tension secteur

Causes

- Initiation des grands consommateurs d'énergie

Exemple : Démarrage du moteur

Conséquences

- **Exemple :** Changement de luminosité de l'éclairage (flicker)

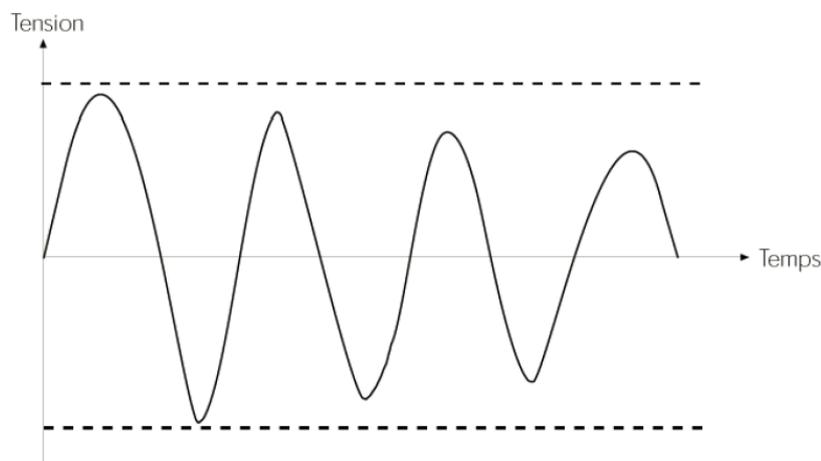


Figure 3 : Tension secteur peut varier de quelques (Flicker)

III-4-3 Creux de tension

Chute de tension et microcoupure: la chute de tension peut être terminée en quelques millisecondes à 1s. (Figure 4a et 4b)

Causes

- Défaut dans les lignes d'alimentation
- Orage, vent (contact fil à fil)

Conséquences

Particulièrement sensible aux petits matériels, réinitialisation (Reset) des systèmes numériques.



Figure 4a : Creux de tension

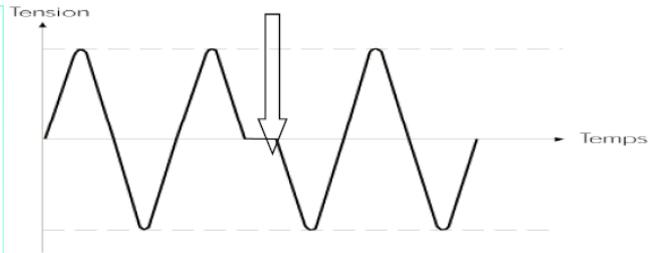


Figure 4b : Microcoupure

III-4-4 Variations lentes de tension

Causes

Ils résultent de modifications de la charge sur le réseau de distribution.

Conséquences

- Chute de tension pour les utilisateurs proches des gros consommateurs d'énergie.
- Surconsommation ou surintensité à puissance constante.

III-4-5 Surtensions

Ce sont des ondes d'origine humaine, elles sont générées localement, et leur énergie peut être calculée en centaines de joules.

Causes

- Résonance des circuits d'inductance et de capacité.
- Réduisez la charge du réseau (Délestage).

Fonction de protection (ouverture du disjoncteur, etc.).

Conséquences

Une surtension endommagera les circuits adjacents.

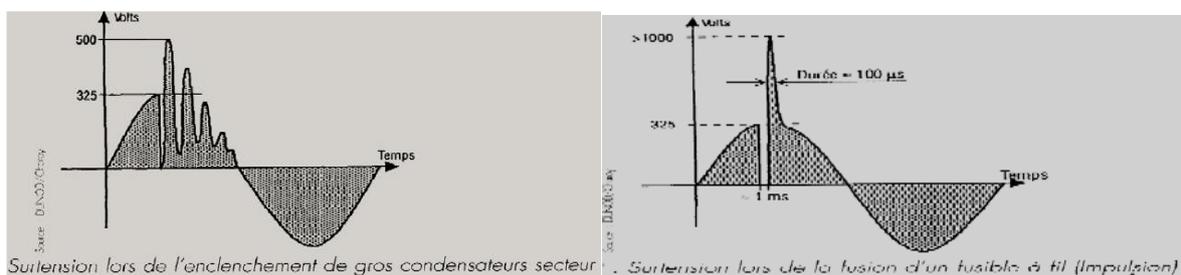


Figure 5 : Surtension lors de l'enclenchement de gros condensateurs secteur.

III-4-6 Surtensions de chocs de foudre

Surtensions d'origine atmosphérique (foudre)

Causes

- Coup de foudre
- Surtension induite

Conséquences

- Les coups de foudre détruisent directement le système
- L'effet d'induction détruit l'alimentation et les composants

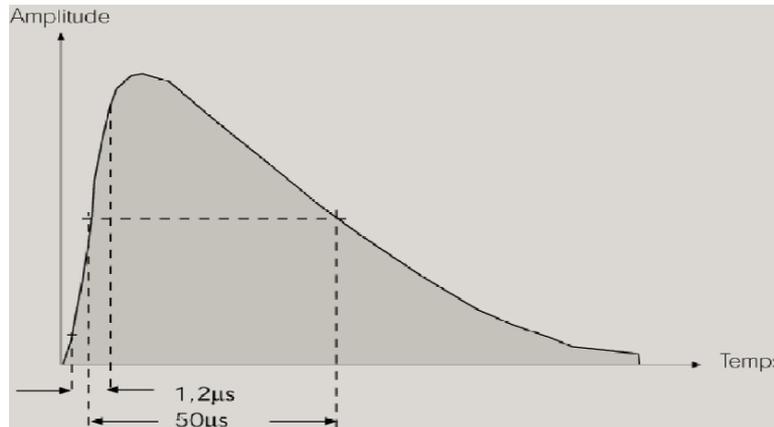


Figure 6 : Onde de choc conventionnelle (foudre)

III-4-7 Décharges électrostatiques

Causes

- Transfert de charge entre les personnes et le système (la capacité au sol est d'environ 200 pF).
- Tension de plusieurs volts kV.

Conséquences

- Risque d'endommagement des composants.
- Vieillessement prématuré des composants.
- Arrêtez ou réinitialisez le système.

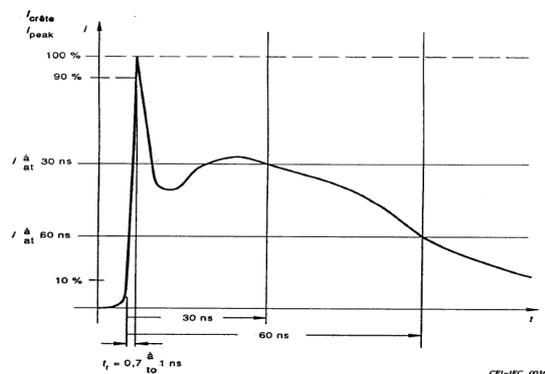


Figure 7 : Forme d'onde typique du courant

III-4-8 Champs électromagnétiques

Il n'y a pas une liaison galvanique entre la source d'interférence et la victime. L'interférence se propage par ondes électromagnétiques et sa composition est la suivante:

- Champ magnétique, noté H
- Champ électrique, noté E
- Ces champs sont couplés en haute fréquence.

a- Champ magnétique (H en A/m)

Origine

- Généré par un courant variable

Conséquences

- Distorsion de l'image du tube cathodique
- Bruit de circuit électronique analogique de bas niveau
- Bruit dans le circuit de câblage
- Interférence avec certains capteurs, tels que les capteurs à effet Hall

b- Champ électrique (E en V/m)

Origine

- Produit par différences de potentiel variable
- Exemple de source : Téléphones portable

Conséquences

- Particulièrement sensible aux hautes fréquences
- Interférences de la carte électronique & analogique

III-5 Mode de transmission des perturbations (Couplage)

La CEM implique la génération, la transmission et la réception d'énergie électromagnétique. La source génère une émission et le canal de transmission ou de couplage transfère l'énergie au récepteur.

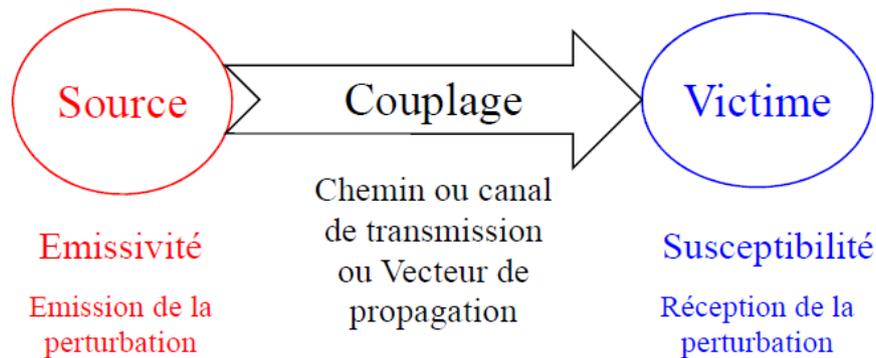


Figure 8 : Mode de transmission des perturbations.

On ne peut parler de CEM que lorsqu'il y a 03 acteurs (Source, couplage et victime).

III-5-1 Types de couplages

Il existe trois types de couplage :

- ❖ **Couplage par Conduction** provoquera le flux de courant d'interférence, qui se propagera à travers les câbles et les composants qui relient la source de signal à la victime.
- ❖ **Couplage par Rayonnement** transmis par champ électrique E ou champ magnétique B ou champ électromagnétique (E, B).
 - Rayonnement dans le champ proche
 - Rayonnement dans la zone de champ lointain
- ❖ **Couplage par Ionisation** se transmet à travers une décharge électrique :
 - Ionisation du milieu diélectrique (souvent de l'air) sous l'influence de la chaleur,
 - L'humidité provoque une ionisation de l'air (foudre)

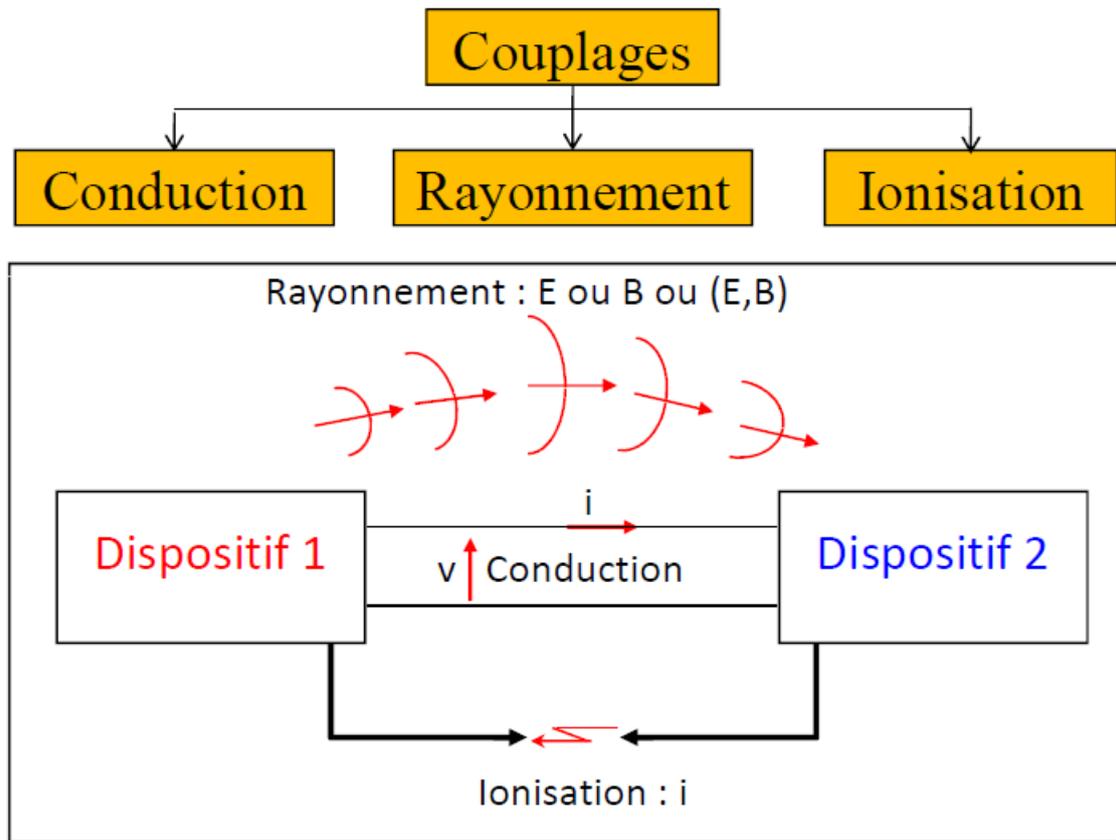


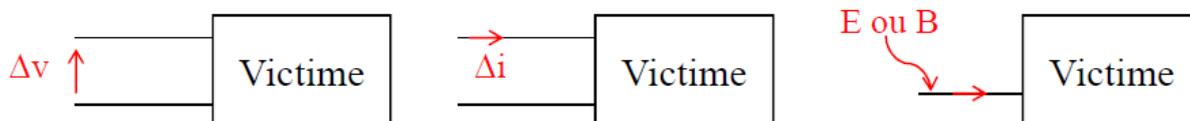
Figure 9 : Types de couplages

III-5-2 Couplage par conduction

Il existe deux possibilités de couplage par conduction: par couplage de liaison directe (contact) ou par interférence de conduction directe, par couplage d'impédance commune; via des câbles et des composants

a- Liaison directe ou perturbations directement conduites

L'interférence qui en résulte sera transmise directement (telle quelle) à la victime et ne sera pas modifiée pendant le parcours.



- **Variation rapide de tension** : elles sont principalement causées par des défauts, la tension peut augmenter ou diminuer de quelques% et la durée est de plusieurs millisecondes.
- **Variation lente de tension** : principalement causés par des changements de charge sur le réseau de distribution, et sa durée peut atteindre plusieurs secondes.
- **Creux ou microcoupures de tension** : causée par un défaut de la ligne d'alimentation, un orage, un vent (contact de courte durée entre les lignes), la durée est comprise entre 1ms et 1s.

• **Surtension** : généré localement par le changement rapide du courant circulant dans le circuit d'enroulement ou la résonance du circuit LC, délestage du réseau, ...)

b- Couplage par conduction Impédance commune

Lorsque le courant circule entre les deux sous-systèmes du système électrique à travers l'impédance commune formée par la liaison entre les deux sous-systèmes, cela prouvera qu'il existe un couplage d'impédance commun.

La perturbation est causée par la chute de tension ΔV dans l'impédance commune, qui peut perturber un ou deux sous-systèmes. Dans le circuit, lorsque l'impédance dans la section de conducteur des deux mailles n'est pas négligeable, le couplage par l'impédance commune peut être prouvé.

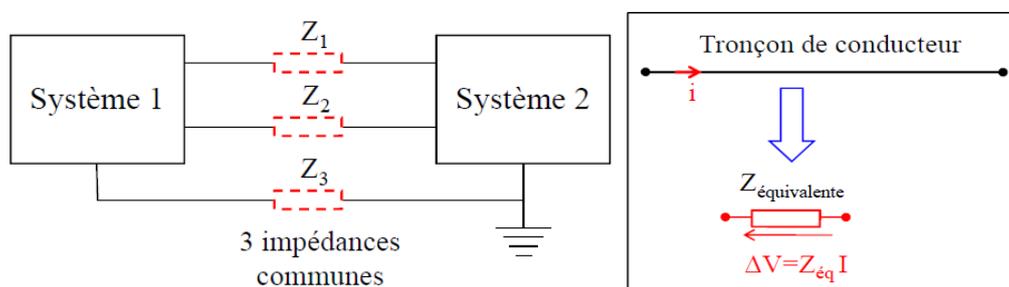
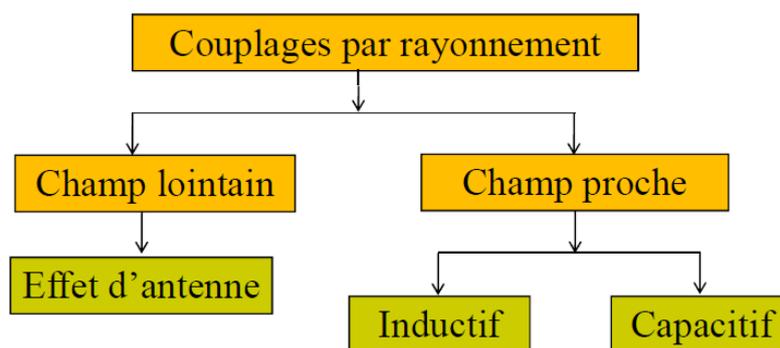


Figure 10 : Couplage par conduction (impédance commune)

III-5-3 Couplage par rayonnement

Plusieurs possibilités de couplage par rayonnement :

- Couplage par diaphonie inductive
- Couplage par diaphonie capacitif
- Effet d'antenne



a- Couplage par rayonnement Champ lointain

Le champ électrique émis par une antenne à grande distance de celle-ci est :

$$E(V/m) = \frac{\sqrt{60 P G}}{d}$$

E est l'intensité du champ électrique (en V/m),

P est la puissance transmise à l'antenne,

d est la distance séparant l'observateur de l'antenne,

G est le gain directif de l'antenne (1 pour une antenne isotrope 1/8 d'onde, 1.3 pour une antenne fouet, 4 à 10 pour une antenne log périodique, 300 à 2000 pour une antenne parabolique)

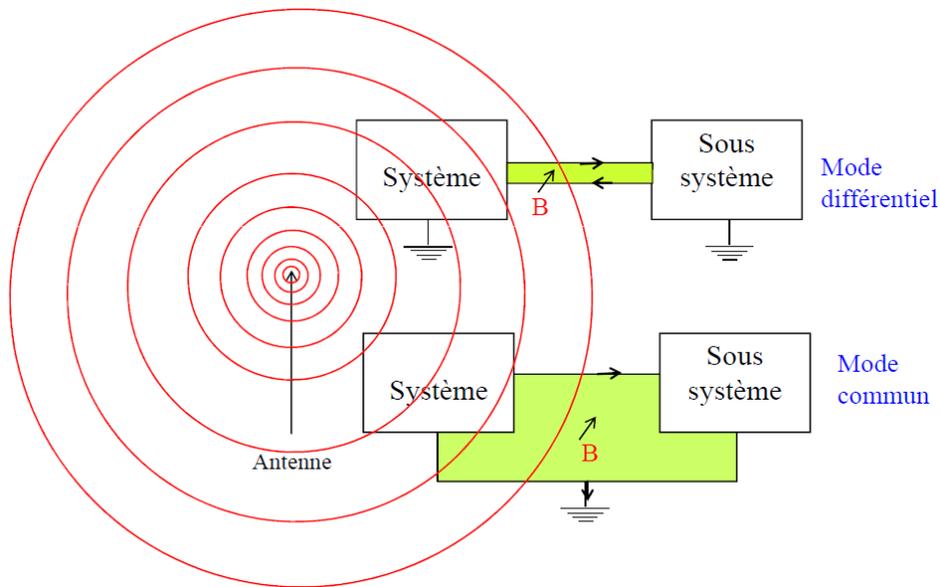


Figure 11 : Couplage par rayonnement champ lointain

b- Couplage par rayonnement Champ proche – Diaphonie inductif –

Dans ce cas, il y a un courant capable de provoquer des interférences dans le circuit perturbateur, et il y a un circuit victime près du circuit perturbateur. -Les courants qui interfèrent avec les conducteurs du circuit génèrent des champs magnétiques autour d'eux. Ce champ magnétique induit un courant dans le circuit victime. Il s'agit du phénomène de diaphonie inductive: le conducteur du circuit d'interférence • le changement de courant dans le conducteur produira un champ magnétique variable H. Il génèrera une force contre-électromotrice qui génèrera des tensions d'interférence dans le câblage victime où il y a une boucle de surface (S).

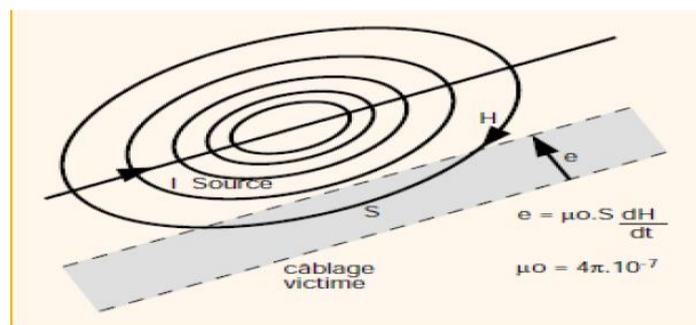


Figure 12 : Couplage par diaphonie inductive

c- Couplage par rayonnement Champ proche – Diaphonie capacitif –

Un changement brusque de la tension V_1 entre le fil et un plan de masse ou entre deux conducteurs, génère un champ électrique, qui induit un courant i sur les conducteurs adjacents par effet capacitif. Par conséquent, la tension V_2 est rétablie sur le câble victime.

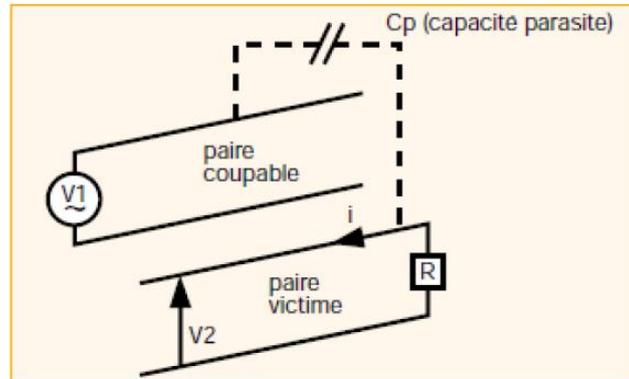
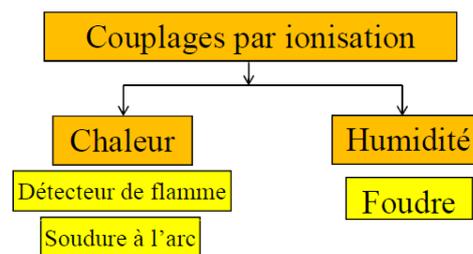


Figure 13 : Couplage par diaphonie capacitif

III-5-4 Couplage par ionisation



On assimile le canal de foudre à un conducteur vertical qui engendre à une distance d'un champ, sur les réseaux de distribution électriques, un coup de foudre. Ce dernier engendre une onde de choc (surtension) qui se propage sur la ligne.

- Le courant de foudre traversant la prise de terre, fait monter le potentiel du conducteur de protection.
- Si le courant de foudre circule dans des structures métalliques, il provoque une élévation du potentiel des masses métalliques.
- Ceci entraîne des circulations de courant dans les câbles, des dysfonctionnements, voir des défauts d'isolement.

III-6 Réduction des perturbations (intervention de la CEM)

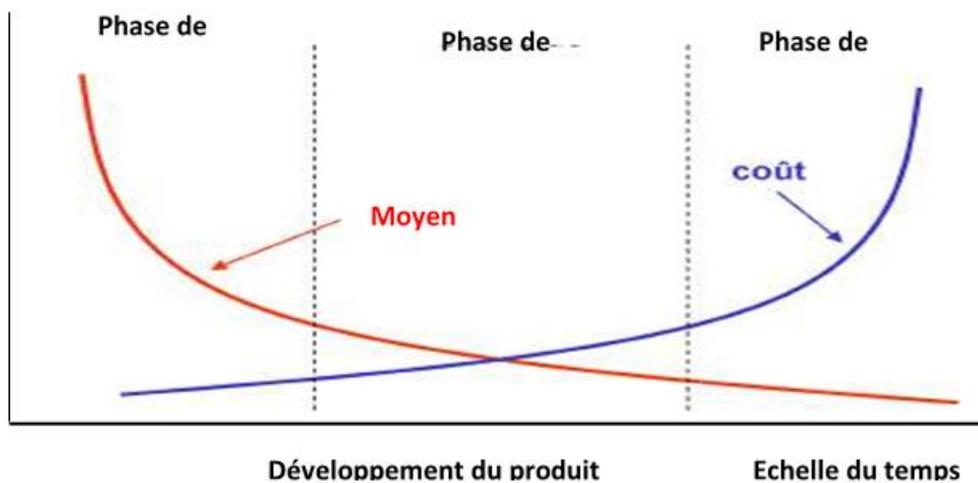
Tout produit prend en compte les problèmes de compatibilité

- Qui peut être dans un environnement perturbé.
- Qui est particulièrement sensible.
- Au moment de la conception du produit.

Considérant que si la CEM est prise en compte, alors:

- Au moment de la conception => Coût augmenté de 5%.
- Après avoir construit le prototype => le coût a augmenté de 50%.

Lors de la mise sur le marché du produit => le coût a augmenté de 100%.



Exemple : Test d'immunité en salle semi-anéchoïque



Moyens de gérer les problèmes d'interférence

Blindage, mise à la terre, filtrage, isolation, conception de câblage, etc.

III-7 Réglementations et normes

L'objectif principal des normes est de caractériser le plus précisément possible l'environnement de mesure rayonné et en conduit (mesure en espace libre, en chambre anéchoïque, support d'appareil), les conditions de mesure (longueur de câble, distance aux antennes, hauteur, angle, etc. .), l'étalonnage et le réglage des appareils de mesure utilisés pour des mesures reproductibles et fiables.

Dans les normes existantes, il convient de distinguer trois catégories :

- Normes dite fondamentales
- Normes dite génériques
- Normes dite de familles de produits

La **norme fondamentale** contient des informations, des règles et des conditions globales relatives aux phénomènes d'interférence applicables à tous les produits, systèmes et installations électriques.

Elles servent (*normes fondamentales*) de références pour les différents comités lors de l'établissement des *normes génériques ou spécifiques* à un produit.

Ces normes servent à l'évaluation de la CEM de tous les produits destinés à un environnement particulier (milieu industriel ou commercial)

Les **normes génériques** sont fixées en l'absence de normes spécifiques, par exemple pour les nouveaux produits.

Le domaine d'application de ces normes cesse lorsqu'il existe une norme couvrant les exigences essentielles de perturbation et d'immunité.

Ces normes évoquent des exigences et méthodes de test précise à un certain produit ou à une certaine famille de produits.

En fonction du matériau considéré et des conditions de fonctionnement et d'installation correctes, des critères d'acceptation précis sont donnés les **normes de la famille de produits**.

Ils doivent utiliser les normes de base référencées comme méthodes d'essai et méthodes de mesure détaillées, et se coordonner avec les normes génériques.

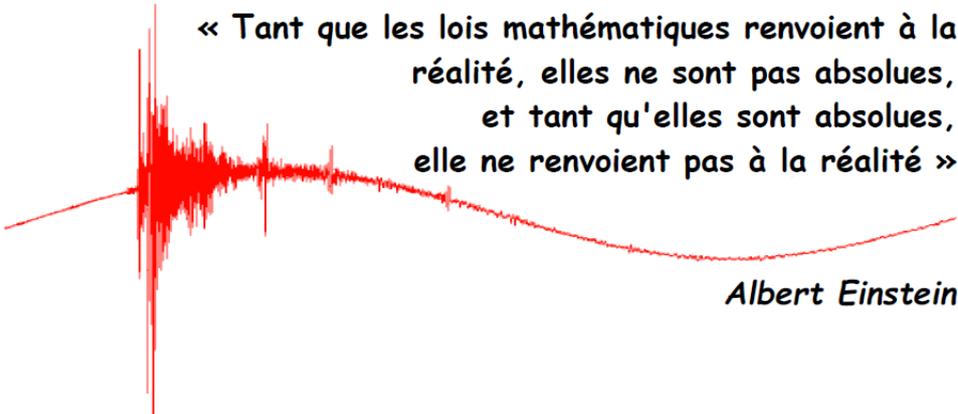
Les normes de familles de produits ont précedence sur les normes génériques mais les normes génériques s'appliquent si le matériel considéré n'est couvert par aucune norme de famille de produits, permettant l'évaluation de la conformité à la directive CEM

Conclusion

L'analyse de la CEM d'un système, formé d'un ou plusieurs équipements ou sous-systèmes, consiste à évaluer ses caractéristiques électromagnétiques. Il s'agit de déterminer la marge de compatibilité de chaque sous-système et de vérifier qu'elle est bien conforme à la norme en vigueur. Après avoir identifié et délimité tous les constituants du système analysé, on définit pour chacun d'eux :

- les niveaux de perturbations émises par rayonnement et/ou par conduction,
- les niveaux d'immunité,
- les effets dus aux différents couplages existants,
- les marges de compatibilité de chaque constituant vis à vis des autres.

CHAPITRE IV
DECHARGE ELECTRIQUE



« Tant que les lois mathématiques renvoient à la
réalité, elles ne sont pas absolues,
et tant qu'elles sont absolues,
elle ne renvoient pas à la réalité »

Albert Einstein

CHAPITRE IV DECHARGE ELECTRIQUE

Introduction

Une *décharge électrique* est un canal conducteur se formant, sous certaines conditions, entre deux électrodes, à travers un milieu normalement isolant.

La *décharge lumineuse* est une décharge dans laquelle la plupart des porteurs sont des électrons générés par émission d'électrons secondaires.

L'*arc électrique* est une décharge à fort courant.

IV-1 Décharges électriques dans les gaz

IV-1-1 Avalanche électronique

Nous envisageons de placer deux électrodes plates dans le gaz et d'appliquer une haute tension.

Electron primaire : généré par ionisation en raison de facteurs naturels (tels que les rayons cosmiques et La radioactivité de la terre.

Explication de l'avalanche : (figure 1)

Dès que l'atome A1 entre en collision avec un électron primaire e_0 qui à son tour accéléré par le champ électrique, l'atome devient ionisé.

A1 devient un ion positif et libère des électrons e_1 (atome ionisé). L'électrons e_0 et l'électron e_1 entrent en collision avec deux autres atomes A2 et A3 pour les ioniser, ces derniers libère aussi deux électrons e_2 et e_3 . Quatre d'autre atomes entrent en collision avec les quatre électrons e_1 , e_2 , e_3 , et e_4 , et devient ionisé à leur tour (Avalanche d'électronique).

Dans ce processus, la diffusion d'électrons se poursuit jusqu'à ce que l'avalanche atteigne l'anode.

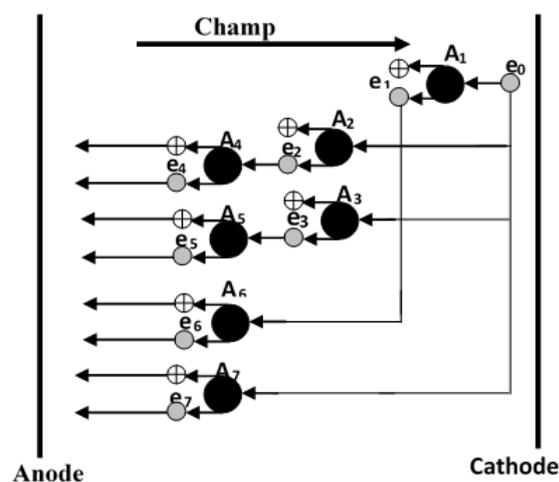


Figure 1 : Description de l'avalanche électronique.

Remarques :

- Les avalanches préparent le chemin au claquage des gaz.
- Les atomes ionisés fournissent des électrons, et les électrons eux-mêmes deviennent des ions positifs; il y en a tellement d'électrons dans l'espace inter-électrode que des ions positifs. Tute collision ionisante génère un électron et un ion positive.
- La direction de l'avalanche est opposée au champ électrique (cathode → anode).
- Un seul électron primaire génère des millions de paires « électron-ion positif » à la fin de l'avalanche!

IV-1-2 MECANISME DE TOWNSEND (Basse Pression)➤ **Mécanisme de claquage**

Phase 1 : Les électrons situés à côté de la cathode provoquent l'avalanche primaire.

Phase 2 : Les électrons vont être absorbés par l'anode et les ions positifs utilisent leur énergie cinétique pour bombarder la cathode afin d'extraire des électrons secondaires.

Phase 3 : En bombardant les électrons secondaires émis par la cathode, donne naissance à une nouvelle avalanche secondaire qui contribue au claquage du gaz.

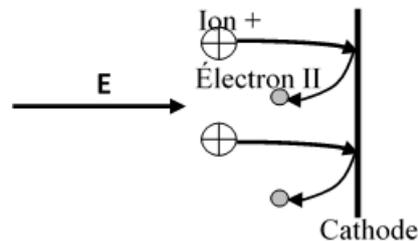


Figure 2 : Mécanisme de claquage dans les gaz.

✓ **Critère de claquage**❖ Paramètres α et γ :

- Paramètre d'ionisation α : la valeur d'électrons produits par ionisation électronique sur le parcours de 1cm.
- Paramètre γ : la valeur d'électrons secondaires émis par les ions positif après bombardement de la cathode. (Également appelé *coefficient* d'ionisation) dans les gaz rares est plus élevé en raison de sa facilité d'ionisation (néon, argon, vapeur métallique, etc.). En revanche, dans le cas d'un gaz chargé négativement (gaz électronégatifs), le coefficient est petit.

❖ Critère de claquage : Soient

n_0 : nombre d'électrons primaires ;

n_+ : nombre d'électrons secondaires (émis de la cathode par bombardement) ;

n : nombre total d'électrons/s collectés par l'anode

Les n_0 électrons primaires peuvent être créés artificiellement par des rayons UV (effet photoélectrique).

- Avalanche primaire : les n_0 électrons primaires produisent n_1 paires « électrons-ions+ » : $n_1 = n_0 e^{\alpha d}$.
- Avalanches secondaires : les n_+ électrons secondaires produisent n_2 paires « électrons-ions+ » :

$$n_2 = n_+ e^{\alpha d}$$

Or

$$n = n_1 + n_2 = n_0 e^{\alpha d} + n_+ e^{\alpha d} = (n_0 + n_+) e^{\alpha d} \quad (1)$$

Comme $n - (n_0 + n_+)$ Représentant le nombre d'électrons et d'ions positifs générés par ionisation (par avalanche I et II), on peut obtenir:

$$\gamma [n - (n_0 + n_+)] = n^+ \quad (2)$$

En combinant les équations 1 et 2 :

Les équations (1) et (2) donnent :
$$n = \frac{n_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)}$$

Soit
$$i = \frac{n_0 e e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} = \frac{i_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)}$$

i : courant total dû à tous les électrons ;

i_0 : courant primaire dû aux n_0 électrons primaires.

Lorsque le claquage a lieu, il se produit un court-circuit entre les électrodes $\Rightarrow i \cong \infty$.

D'où $1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1) = 0 \Rightarrow \gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1$

Comme $e^{\alpha d} \gg 1$

$\gamma e^{\alpha d} = 1$ qui est le critère de claquage pour le mécanisme de Townsend.

c) Interprétation du critère :

1 électron primaire produit lors de l'avalanche primaire $e^{\alpha d}$ paires « électrons-ions+ ».

D'où

$\gamma e^{\alpha d}$ Représente le nombre d'électrons secondaires.

- Si $\gamma e^{\alpha d} < 1$: pas d'électron secondaire et pas de claquage.
- Si $\gamma e^{\alpha d} = 1$ (cas critique) : il y a un seul électron secondaire qui suffit pour provoquer le claquage.
- Si $\gamma e^{\alpha d} > 1$: il y a plusieurs électrons secondaires qui provoquent un claquage facilement.

✓ **Caractéristique courant-tension**

On applique entre les électrodes une HT qu'on fait varier, puis on relève le courant traversant l'intervalle inter-électrodes à l'aide d'un microampèremètre (Fig.3). On obtient la caractéristique tracée à la figure 4.

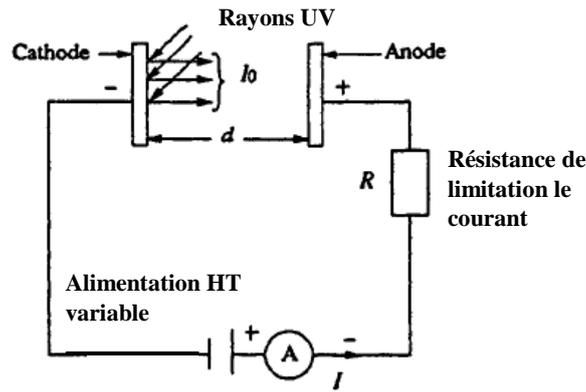


Figure 3 : Dispositif expérimental

Partie OA : $I = f(U)$ est une droite $\Rightarrow U = RI$ (Loi d'Ohm); R : résistance du gaz.

Utilisez des rayons ultraviolets pour extraire artificiellement les électrons primaires de la cathode. La cathode émet n_0 / s d'électrons. Le courant est dû au déplacement de n_0 électrons, limité par la résistance R .

Partie AB : $I = I_0$ courant de saturation.

Le déplacement des électrons primaires génère un courant de saturation. Une fois la saturation est atteinte et la tension augmente, la cathode ne génère pas d'électrons primaire.

Pour des valeurs faibles de champ électrique la saturation du courant dans l'air est atteinte. La saturation n'est que 0,5 V/m Lorsque si la distance inter-électrode égale 10 mm.

Partie BC ($U > U_B$) : croissance exponentielle de I .

Au fur et à mesure que le courant I augmente, en plus des électrons primaires, d'autres charges seront générées. Ces nouvelles charges sont créées parce que les électrons primaires ont maintenant l'énergie cinétique nécessaire pour provoquer l'avalanche primaire.

Partie C-∞ : I devient infini \Rightarrow Claquage.

l'énergie nécessaire des ion positif pour extraire certains électrons secondaires de la cathode, provoquera une avalanche secondaire, et d'éclanche le claquage.

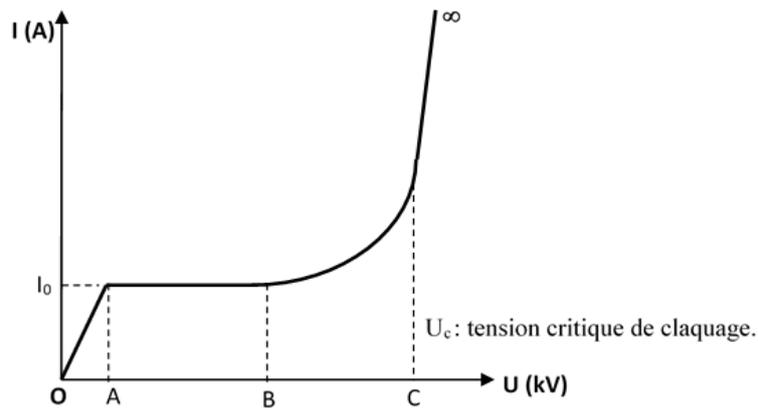


Figure 4 : Caractéristique courant – tension.

IV-1-3 Loi de paschen

Considérons une enceinte étanche remplie par un gaz, dans laquelle on peut varier la pression (Fig. 5).

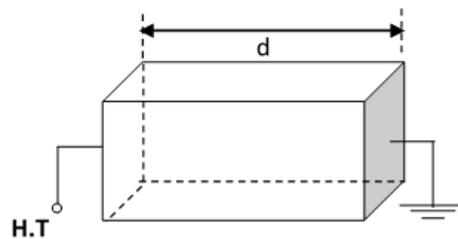


Figure 5 : Enceinte remplie par un gaz

La loi de Paschen montre la variation de la tension critique avec le produit $P * d$ dans un champ uniforme (figure 6).

U_c : Tension de claquage critique;

P : Pression du gaz ;

d : Distance entre les électrodes.

U_{cmin} : Tension minimale critique.

Si $U < U_{cmin} \Rightarrow$ il y aura pas de claquage.

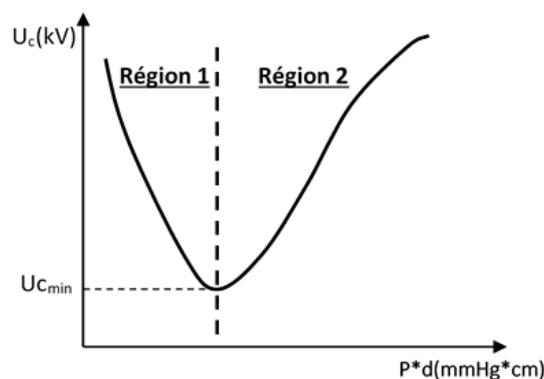


Figure 6 : Courbe descriptive de Paschen

➤ *Limite de Paschen*

Sur la courbe de Paschen qu'il existe une valeur de tension U_{cmin} . Lorsque la tension est inférieure à cette valeur, l'intervalle gazeux sous n'importe quelle longueur et pression ne sera pas claqué.

La valeur minimale de Paschen est mal définie et dépend des conditions de l'électrode et du gaz. Cela signifie que aucun amorçage n'est possible en dessous de cette tension. De cette façon, sous une tension de 220 V, nous produirons seulement des étincelles de rupture de tension inductive et ne produirons pas d'étincelles dues à la tension elle-même.

➤ *Interprétation de la courbe : (d constante)*

Région 1 : U_c diminue avec la pression P

À mesure que la pression augmente, la densité des atomes augmente. Il y a plus des particules et donc plus d'ionisation par collision. Le gaz devient plus conducteur et le claquage plus facile $\Rightarrow U_c$ diminue.

Région 2 : U_c augmente en fonction de la pression P.

Lorsque la pression augmente davantage, bien que la probabilité d'ionisation par collision augmente, le libre parcours moyen λ si petit que l'énergie de l'électron $W = \int qE dr = qE\lambda$ nécessaire à l'ionisation atomiques devient insuffisante. Presque pas d'ionisation et le claquage devient difficile $\Rightarrow U_c$ augmente.

Remarques :

Selon la loi de Paschen, il est plus recommandé d'utiliser du gaz à haute pression (parfois même très basse pression) dans les équipements haute tension, les condensateurs, les câbles, etc. La validité expérimentale de la loi de Paschen est vérifiée sur une courte distance ne dépassant pas 0,1 mm et la pression peut atteindre 10 atmosphères.

Le mécanisme de coupure du gaz dépend de la valeur du produit (p.d). Par conséquent, pour le cas où la valeur p.d du produit est inférieure à des dizaines de Torr.cm, le claquage est généralement du type Townsend, ce qui se traduira par une décharge uniforme avec un grand rayon. Pour des valeurs de p.d de produit plus élevées, le claquage est généralement du type streamer ce qui entraîne un petit rayon de décharge, une énergie élevée et non homogène. En effet, la distance entre les électrodes est rarement inférieure à un millimètre, et la valeur du produit (p.d) est de plusieurs dizaines de Torr.cm: le mécanisme de rupture de gaz habituellement observé est donc de type streamer.

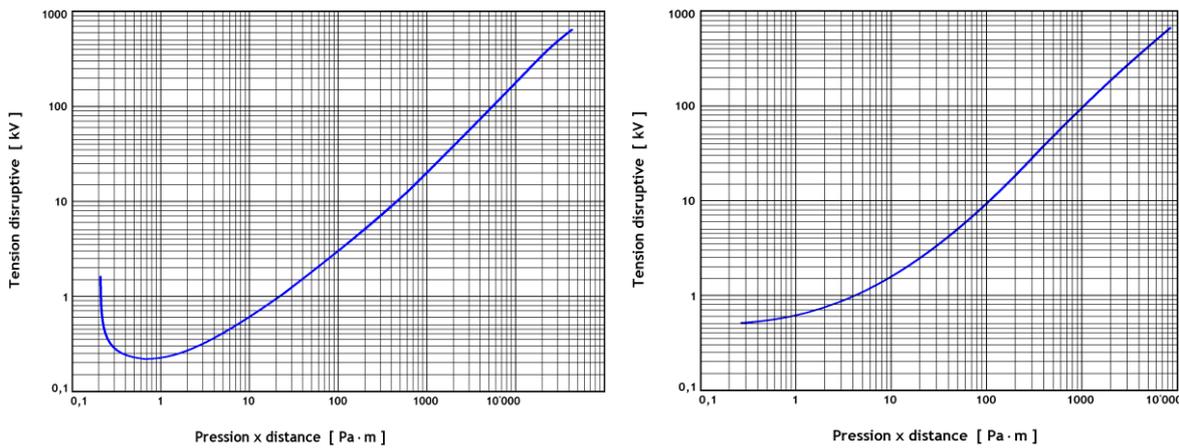


Figure 7 : Courbe expérimentale de Paschen obtenues dans l'air et le SF6.

IV-1-4 Mécanisme de streamer (Haute pression)

➤ **Mécanisme de claquage**

Le principe de fonctionnement de ce mécanisme est le suivant:

PHASE 1 : Un électron près de la cathode provoque une avalanche d'électrons. La vitesse des électrons étant environ 100 fois plus rapide que celle des ions, l'avalanche se développe comme un nuage d'électrons, laissant une charge d'espace positive (figure 8.a).

La taille de la charge d'espace doit être telle que le champ de la charge devienne aussi grand que le champ appliqué. A ce moment, le nombre de paires électrons-ions positifs atteint son seuil critique, $N_{cr} \approx 10^8$.

Les électrons sont absorbés par l'anode, tandis que les ions positifs forment dans le gaz, une charge d'espace positive. En tête de l'avalanche, le champ E_c de cette charge est maximal (Figure 8.a).

PHASE 2 : Les électrons secondaires sont générés par photoionisation autour de la charge d'espace. Ces électrons provoquent de petites avalanches secondaires en tête de l'avalanche (figure 8.b). Le champ de charge d'espace améliore le champ électrique entre la tête d'avalanche et la cathode, et produit également une composante radiale.

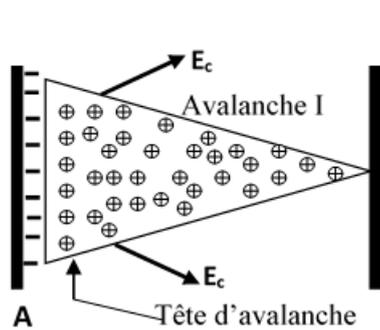


Figure 8.a

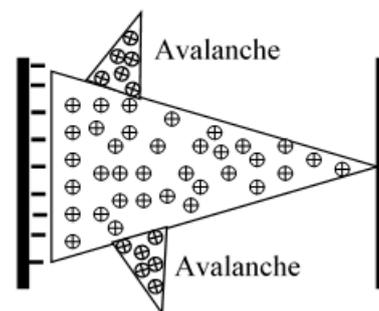


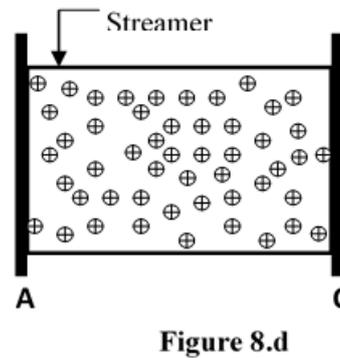
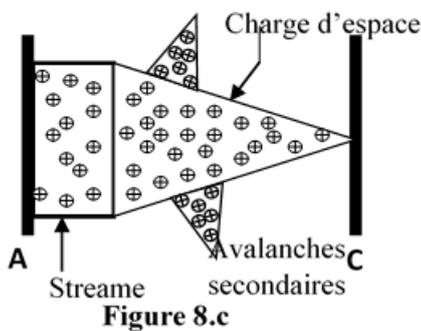
Figure 8.b

Origine des électrons secondaires : La tête d'avalanche est un lieu d'activité importante (la collision entre électrons et ions positifs), et c'est la source de photons absorbés par le gaz environnant. En particulier, les

molécules d'azote excitées peuvent émettre des photons d'énergie supérieure à 13 eV, ce qui est suffisant pour ioniser les molécules d'oxygène dont l'énergie d'ionisation n'est que de 12,2 eV.

PHASE 3 : Le volume de la charge d'espace augmente et devient un « Streamer ». La nouvelle avalanche secondaire s'ajoutera à l'avalanche primaire et le Streamer progresse (Figure 8.c). Lorsqu'il entre en contact avec la cathode, le claquage se produit en ce moment (Figure 8.d).

Remarque : Cette description correspond à la propagation d'un streamer positif, comme on peut l'observer dans le cas d'une faible distance inter-électrode et d'une faible surtension, ce qui est le cas pour les DBD. Lorsque la distance entre les électrodes est grande et que la surtension appliquée est importante, un streamer négatif peut se propager à partir de la cathode.



PHASE 4 : Etablissement un canal de décharge

Une fois que le streamer atteint l'anode, la phase de claquage est terminée et un mince filament de canal de décharge partiellement ionisé est formé. Par définition, une décharge de filament est composée de nombreux filaments, qui apparaissent aléatoirement et indépendamment dans l'espace entre les électrodes.

IV-1-5 Décharge partielle

À l'intérieur des isolants solides et liquides des bulles d'air existent toujours.

A partir des conditions aux limites du champ électrique, on peut écrire:

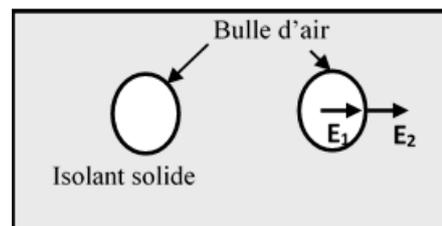


Figure 9 : Décharge partielle

$$D_{n1} = D_{n2} \Rightarrow \epsilon_1 E_1 = \epsilon_2 E_2 \Rightarrow E_2 = E_1 \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}$$

La permittivité de tous les gaz est égale à la permittivité du vide

$$\epsilon_2 = \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F / m}$$

En général, les isolants solides et liquides ont des constantes diélectriques plus élevées:

$\epsilon_1 \gg \epsilon_2$, donc $E_2 \gg E_1$ implique :

Claquage seulement dans la bulle (décharge partielle), mais il n'y aura pas de claquage dans l'isolant.

La décharge partielle se produisant dans les bulles d'air affaiblit la rigidité diélectrique de l'isolant. En plus des pertes, la possibilité de rupture de l'isolation augmentera.

Remarque : L'huile de transformateur doit être analysée en laboratoire chaque année, si elle contient beaucoup de bulles d'air, elle doit être remplacée.

IV-1-6 Décharge luminescente

Dans un tube fluorescent (gaz à basse pression, entre 100 et 5000 Pa) ou dans les ampoules à gaz à haute pression (xénon, krypton, mercure, sodium : 105–106Pa), le dépassement de la limite disruptive conduit à une décharge luminescente, caractérisée par :

- L'augmentation du courant
- L'augmentation de la surface émissive de la cathode (régime normal), puis...
- L'augmentation de la tension lorsque toute la surface cathodique est devenue émissive (régime anormal).

IV-1-7 Arc électrique

Définition: L'arc est une décharge autonome, qui peut transmettre un courant fort lorsque la différence de potentiel est faible.

Contrairement à une décharge luminescente:

- ✓ L'arc couvre une zone très limitée sur la cathode et l'anode (spots anodique et cathodique)
- ✓ Les électrodes sont chaudes et l'émission d'électrons à la cathode est en partie due à l'effet thermoélectronique.
- ✓ En raison du fort gradient de tension près de l'électrode, l'émission à effet de champ joue également un rôle qui devient particulièrement important dans les applications où l'électrode est refroidie.

IV-1-8 Effet de couronne

L'effet corona fait référence à tous les phénomènes liés à la conductivité électrique des gaz dans l'environnement d'un conducteur porté à une haute tension. Cette conductivité est due au phénomène d'ionisation.

Définition: L'effet corona se génère sur tous les conducteurs exposés à une haute tension. Lorsque le champ électrique à la surface du conducteur devient suffisamment grand (supérieur au champ d'ionisation de l'air environ 30 kV/cm), l'air s'ionise et forme un anneau lumineux autour du conducteur (Figure 10).

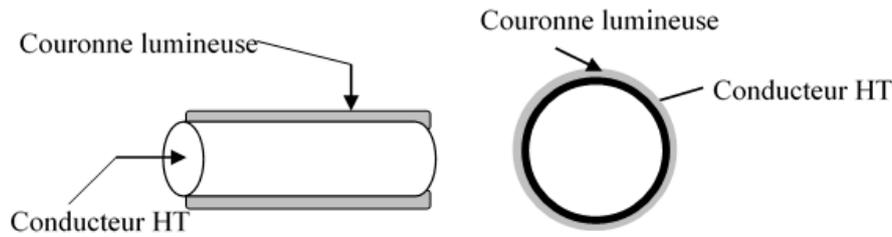


Figure 10 : Effet de couronne

La lumière de la décharge corona n'est visible que lorsque la ligne THT ($U \geq 400kV$), est sombre.

Inconvénients : interférence avec les ondes radio, vibrations et bruit des conducteurs, perte de couronne.

Avantages : C'est un régulateur de tension, De plus, il existe de nombreuses applications industrielles (séparateurs électrostatiques, précipitateurs électrostatiques, photocopie ...)

- Pour les réseaux inférieurs à 345 kV, l'effet corona devient très gênant.
- Actuellement, le bruit et le champ électrique de surface sont les paramètres environnementaux les plus importants à prendre en compte lors de la construction de nouvelles lignes.
- L'effet de couronne se produit principalement sur les conducteurs de ligne, mais aussi sur les parties métalliques aiguës reliées à la haute tension, telles que sur l'isolateur, surtout par temps humide.

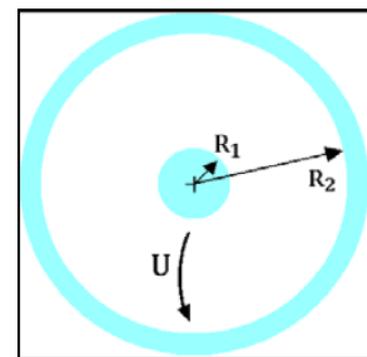
Exemple : Lorsqu'une tension accrue est appliquée aux lignes coaxiales des rayons R_1 et R_2 , une décharge disruptive se produit à partir du seuil de tension U_C .

Deux cas doivent être distingués:

$R_1 < R_2/e$ avec $e = 2.718.. \Rightarrow$ Apparition d'une zone ionisée, de rayon croissant, autour du conducteur central; puis amorçage d'une étincelle).

$R_1 > R_2/e \Rightarrow$ Amorçage d'une étincelle sans effet de couronne.

Correction de Peek :



$$U_C = E_{do} K m \left(1 + \frac{0,03}{\sqrt{K \cdot R_1}} \right) R_1 \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right)$$

Avec : $E_{do} = 3$ MV/m en courant continu (DC) ou 2,12 MV/m valeur efficace en alternatif (AC).

K : Facteur de correction climatique

m : Facteur de correction lié à l'état de surface du conducteur

Les facteurs entre parenthèses tiennent compte de la difficulté des électrons à ioniser l'air autour d'un conducteur de petit diamètre.

Pour une ligne monophasée avec une distance D entre conducteurs de rayon R , la valeur efficace de la tension d'apparition de l'effet corona est donnée par la formule suivante:

$$U_C = 2 E_{do} K \cdot m \left(1 + \frac{0,03}{\sqrt{K \cdot R}} \right) R \ln \left(\frac{D}{R} \right)$$

Pour une ligne triphasée symétrique, où trois conducteurs sont disposés dans un triangle équilatéral, l'effet corona apparaît dès que les tensions simples atteignent la valeur suivante :

$$U_C = E_{do} \frac{K m}{\sqrt{3}} \left(1 + \frac{0,03}{\sqrt{K \cdot R}} \right) R \ln \left(\frac{D}{R} \right)$$

Les lignes électriques sont dimensionnées de manière à éviter l'effet corona. Cependant, cela se produit dans différents cas:

- ✓ Par temps pluvieux ou brouillard. Les gouttelettes d'eau favoriseront l'apparition d'une d'aigrettes autour des conducteurs ;

Ce sont en effet les gouttelettes d'eau qui ont produit cet effet. L'humidité a généralement l'effet inverse, à moins qu'elle produit de la condensation sur le conducteur.

- ✓ Lorsque le conducteur ou l'isolateur de la ligne commence à être pollués, cela se produira inévitablement après certain nombre d'années finira par être pollués;
- ✓ Lorsqu'un conducteur ou un isolateur a été endommagé à la suite d'une défaillance mécanique localisé, les perturbations générées par l'effet corona peut être utilisé pour localiser la défaillance.

On calcule aussi les pertes par effet de couronne avec deux formules semi-empiriques ;

Pour $U_S = 1,8 \times U_C$, en raison de l'effet corona, la perte de puissance active de chaque phase est donnée par la formule Peek suivante:

$$P' = 2,41 \cdot 10^{-9} \frac{f [\text{Hz}] + 25}{K} \sqrt{\frac{R}{D}} (U_S - U_C)^2$$

P' : Puissance dissipée active par unité de longueur [W/m = kW/km]

f : Fréquence du réseau

U_S : Tension simple

Cependant, l'expérience montre que la perte varie fortement avec l'état de surface du conducteur, et l'état de surface du conducteur lui-même dépend des facteurs climatiques et du vieillissement du conducteur.

Pour $U_S < 1,8 \times U_C$, en raison de l'effet corona, la perte de puissance active de chaque phase est donnée par la formule de Peterson:

$$P' = \frac{2.25 \cdot 10^{-16} E_{do} f U_S^2}{[\ln(D/R)]^2} \cdot F$$

Facteur F dépend du rapport U_S / U_C :

U_S/U_C	1	1.2	1.4	1.6	1.8
F	0.05	0.08	0.3	1	3.5

Pertes par effet Joule, pour les lignes de grandes longueurs sont dominante par rapport aux pertes dues à l'effet couronne deviennent négligeables.

IV-2 Claquage des isolants liquides

IV-2-1 Differences entre claquage des isolants liquides gaz

1. La mobilité des ions dans les liquides est beaucoup plus faible. Ils n'atteignent pas une vitesse suffisante pour arracher les électrons de la cathode.
2. Le mouvement des ions provoque le mouvement de tout le liquide à travers la viscosité (convection électrique), assurant ainsi l'uniformité de la température.
3. La cathode reste relativement froide de sorte que l'émission d'électrons y est due uniquement au champ et non à l'effet thermoélectronique.
4. Un champ électrique assez élevé génère des streamers qui produit des bulles.

IV-2-2 Procédure de décharge des liquides

Premièrement, à une tension relativement basse (région de courant ohmique), la résistivité apparente d'un liquide dépend presque toujours de la méthode de purification utilisée; comme il est impossible d'atteindre une pureté absolue, il est impossible de connaître la résistivité d'un liquide complètement pur.

Quant au mécanisme de dissociation ionique dans le liquide (deuxième région), et au mécanisme d'arrachement d'électrons dans la cathode (troisième région), ils sont très hypothétiques et dépendent dans une large mesure du type de liquide. L'étude de ces mécanismes n'a jamais permis de prédire la valeur de la tension de claquage.

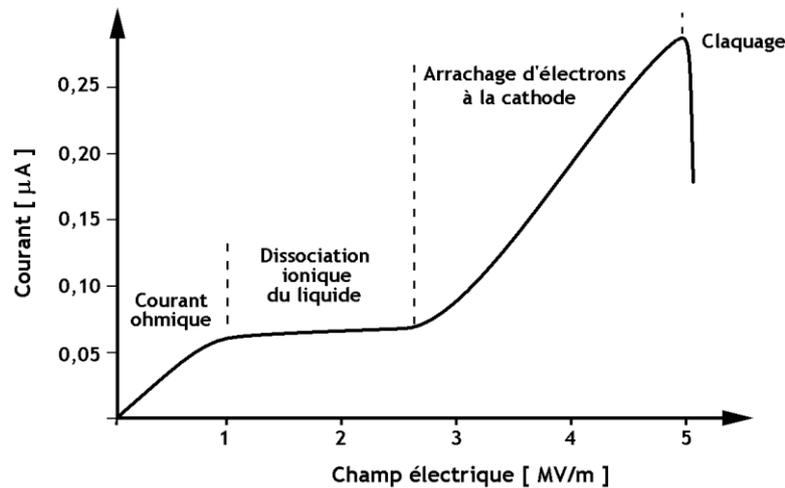


Figure 11: Décharge dans les liquides

IV-2-3 Type de claquage

Il existe principalement 3 théories expliquant le mécanisme de claquage dans les liquides.

a- Claquage avec les bulles

Divers mécanismes peuvent provoquer la formation de bulles dans les liquides isolants soumis à des champs électriques élevés. Le claquage sera alors initié au niveau de la bulle. La formation de bulles peut être expliquée de la manière suivante:

- ❖ L'apparition de poches de gaz près de l'électrode;
- ❖ Répulsion électrostatique des charges dans le liquide;
- ❖ Sous l'action d'un bombardement électronique ou ionique, les molécules se dissocient du liquide et libèrent des sous-produits gazeux;
- ❖ à l'évaporation due à une décharge partielle (impuretés, aspérité des électrodes...). Créez ensuite la colonne à bulles dans lesquelles se produit finalement le claquage ;

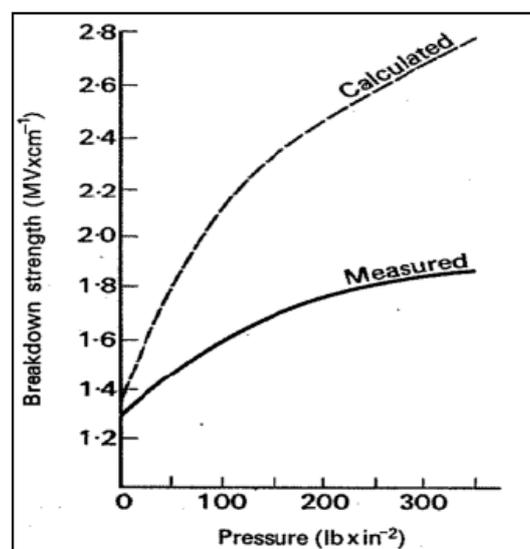


Figure 12 : Claquage par les bulles.

b- Claquage avec suspension des particules

Sous l'action de la force électrostatique, ils peuvent former des ponts entre les électrodes ou provoquer des micro-décharges par l'effet de concentration des lignes de champ électrique à proximité des particules.

Depuis longtemps a été reconnu l'importance des particules en suspension dans les liquides: en particulier, il a été observé que sous l'action d'un fort champ électrique, les particules (isolantes ou conductrices) se rassemblent et forment une colonne sur l'une des électrodes, réduisant d'autant L'espace entre les électrodes. Dans la mesure où la tension destructrice chute fortement, cet effet est généralement très catastrophique.

c- Claquage avec streamer

Comme dans le gaz, les électrons entièrement accélérés peuvent ioniser les molécules sur leur chemin et déclencher une avalanche.

IV-3 Claquage des isolants solides

Différentes théories ont été élaborées pour expliquer le claquage diélectrique dans les solides

IV-3-1 Claquage des isolants solide thermique

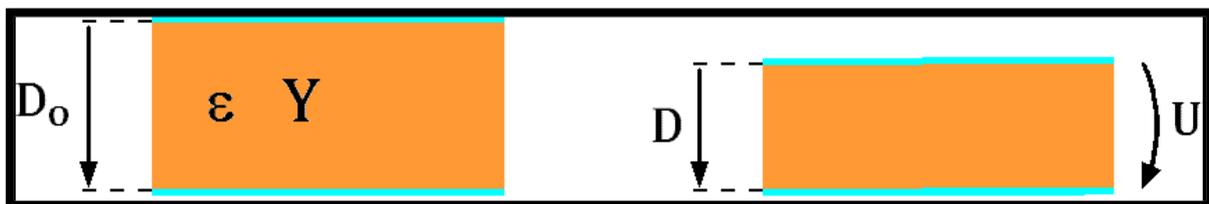
La conductivité non nulle du matériau fait monter la température par effet Joule. Lorsque la température augmente, la conductivité augmente et un « emballement » thermique se produit. Cependant, la rigidité diélectrique diminue considérablement avec la température.

Dans le courant alternatif haute fréquence (environ MHz), une résonance de polarisation par orientation peut se produire, ce qui génère également un échauffement et provoque une rupture des liaisons chimiques.

IV-3-2 Claquage des isolants solide électromécanique

Selon ce mécanisme, le champ électrique exerce une compression mécanique. La déformation qui en résulte provoque la rupture du matériau.

Considérons un échantillon avec une épaisseur initiale D_0 de constante diélectrique absolue et du module d'Young Y . L'échantillon comprimé sous l'action de la tension U (correspondant au champ électrique E).



L'énergie électrostatique vaut :

$$W_{el} = \frac{1}{2} \varepsilon E^2 = \frac{1}{2} \varepsilon \frac{U^2}{D^2}$$

Et l'énergie mécanique :

$$W_{mec} = Y \ln \left(\frac{D_0}{D} \right)$$

A l'équilibre $W_{el} = W_{mec}$

$$\Rightarrow U^2 = \frac{2 Y}{\varepsilon} D^2 \ln \left(\frac{D_0}{D} \right)$$

La tension présente un maximum pour une certaine valeur de D :

$$\frac{d}{dD} U^2 = \frac{2 Y}{\varepsilon} D \left[2 \ln \left(\frac{D_0}{D} \right) - 1 \right]$$

Cette dérivée est nulle pour :

$$\ln \left(\frac{D_0}{D} \right) = \frac{1}{2} \Rightarrow D^2 = \frac{D_0^2}{e}, e = 2.7183,$$

En introduisant ces deux relations dans la relation de U^2 , on obtient sa valeur maximale

$$U_{max} = D_0 \sqrt{\frac{Y}{\varepsilon e}}$$

La relation ci-dessus, appelée relation de Garton, donne en fait la tension destructrice maximale possible. En fait, celle-ci est toujours bien inférieure à la valeur obtenue par ce modèle.

IV-3-3 Claquage avec streamer

Tout comme dans les gaz et les liquides, les électrons entièrement accélérés peuvent ioniser les molécules sur leur chemin et provoquer une avalanche d'électrons.

IV-3-4 Claquage avec érosion

Ce mécanisme de claquage est une occurrence à long terme: cela est dû à l'augmentation progressive de la cavité où des décharges partielles se produiront progressivement lorsque des matériaux isolants sont utilisés normalement.

IV-4 Le Coup de Foudre

- Le tonnerre et la foudre sont des décharges électriques qui se produisent dans un intervalle de temps relativement long. D'une part, les « électrodes » sont des nuages d'orage chargés, et d'autre part, la terre.
- En raison de la nature éphémère et imprévisible de la foudre, elle est encore mal comprise en science, il est donc difficile de mener des recherches en laboratoire. Dans les grands laboratoires, le coup de foudre est causé par le lancement d'une fusée reliée à la terre par des fils.
- L'impact de la foudre sur l'équipement équivaut à un générateur de courant très fort (10 à 100 kA ou plus). Il produit une surtension considérable.

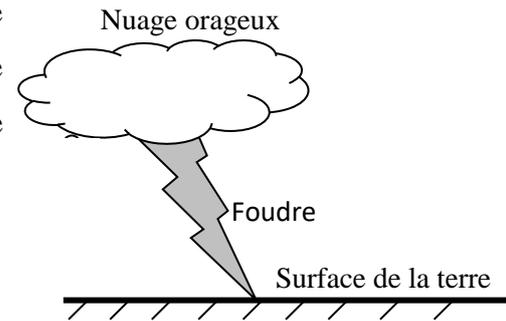


Figure 13 : Foudre

La recherche sur la foudre comporte deux aspects:

Aspect physique : mécanisme de coup de foudre;

Aspect électrique : protection contre la foudre.

IV-4-1 DEROULEMENT DU COUP DE Foudre

a- Classification des coups de foudre

Le traceur: Le traceur est une faible décharge préliminaire qui se produit entre la terre et les nuages, ouvrant la voie au canal du tonnerre et de la foudre.

La classification des coups de foudre est la suivante:

- La direction du traceur;
- Signes de décharge.

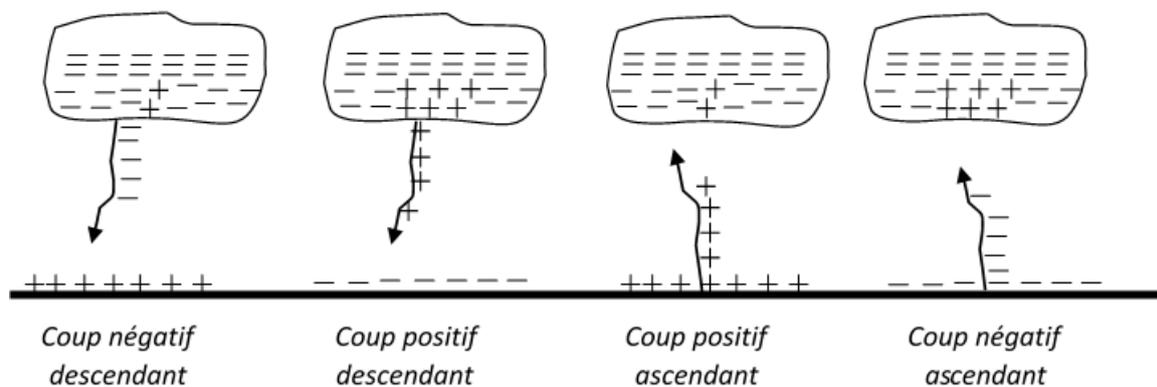


Figure 14 : Classification des coups de foudre

b- Déroulement du coup de foudre descendant

Phase 1 : Le traceur prend naissance à la base du nuage.

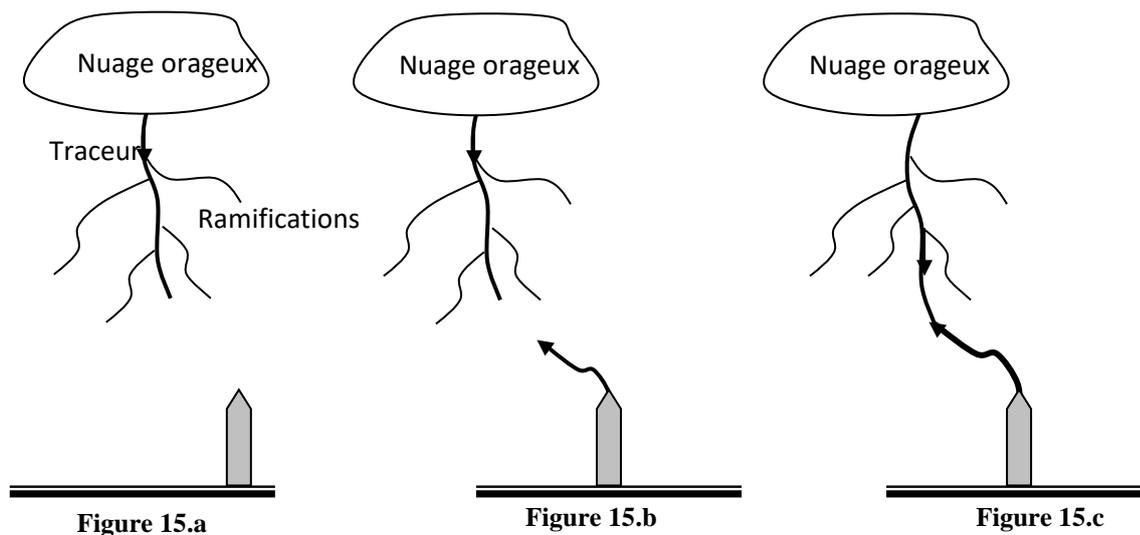
Phase 2 : Le traceur qui se ramifie progresse en direction de la terre par des bonds successifs de quelques dizaines de mètres, avec une vitesse moyenne $v = (1,5 \text{ à } 2) \cdot 10^5 \text{ m/s}$ (Figure 15.a). Le temps d'arrêt entre deux bonds successifs est de 40 à 100 μs .

Phase 3 : Avant que le traceur ne touche la terre, une décharge créée au sol par effet couronne appelée "décharge de capture" (Figure 15.b), établit la liaison avec le traceur principal (Figure 15.c).

Phase 4 : A ce moment, un arc électrique circule dans le canal ionisé créé par le traceur et s'en suit un écoulement de charges superficielles de la terre vers le nuage (décharge primaire) qui neutralisent les charges du nuage. La vitesse de l'éclair est de 20 à 110 $\text{m}/\mu\text{s}$ correspondant à une vitesse en ligne droite entre 15 et 65 $\text{m}/\mu\text{s}$.

L'onde de choc se transforme en onde sonore, c'est le tonnerre.

Phase 5 : Une succession d'arcs de moins en moins intenses suivra jusqu'à l'extinction de la foudre (décharges secondaires). Entre ces arcs, le traceur continu subsiste laissant circuler un courant.



Remarque : La foudre contribue à rééquilibrer les charges dans le nuage, c'est la raison pour laquelle un coup de foudre (CdF) n'est pas unique, mais se réamorce plusieurs fois, jusqu'à durer des fois 1s. En général, un CdF dure entre 0,2 et 1 s et comporte en moyenne 4 décharges partielles. Dans l'intervalle entre les décharges, un faible courant circule dans le canal ionisé de l'ordre de la centaine ou du millier d'Ampères : c'est le courant persistant qui écoule souvent la plus grande partie de la charge du nuage.

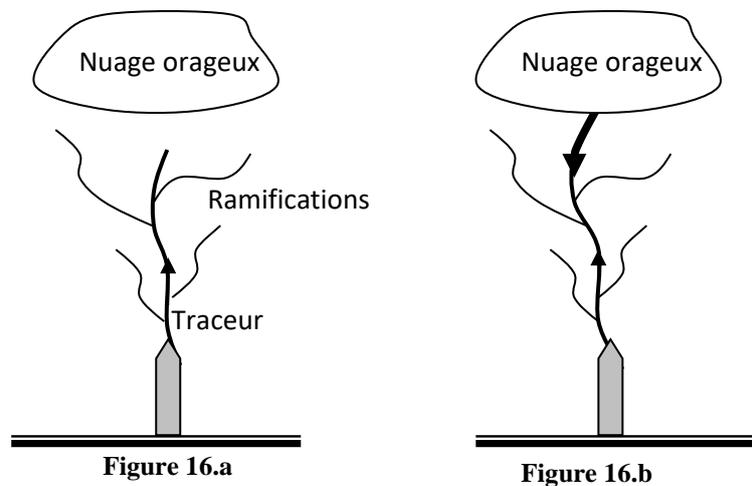
c- Déroulement du coup de foudre ascendant

Phase 1 : Au droit du nuage, le champ au sommet d'une installation (tour, arbre...) devient tellement intense qu'il crée par effet couronne le traceur.

Phase 2 : Le traceur progresse en direction du nuage avec des ramifications et une vitesse moyenne $v = (2 \text{ à } 6) 10^4 \text{ m/s}$ (Figure 16.a).

Phase 3 : Dès que les ramifications lèchent la base du nuage s'établit la foudre. A ce moment, se produit un écoulement de charges du nuage vers la terre appelé "arc en retour" pouvant durer jusqu'à une seconde qui écoule un courant d'un millier d'Ampères (Figure 16.b). L'onde de choc devient une onde sonore (tonnerre).

Phase 4 : Une succession d'arcs de moins en moins intenses suivra (décharges secondaires) continue jusqu'à l'extinction de la foudre.



IV-4-2 Protection Contre La Foudre

Toutes les mesures de protection contre la foudre sont basées sur la déviation du courant vers le sol. Il est à noter que les perturbations causées par un coup de foudre direct (déclenchement et réenclenchement des disjoncteurs) sont beaucoup plus fréquentes que les défauts eux-mêmes contre lesquels nous avons appris à nous protéger.

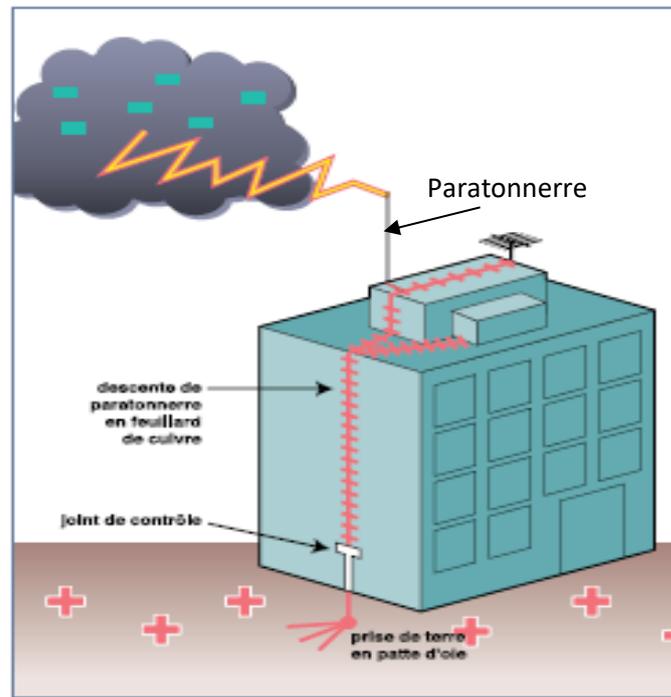
a- Paratonnerre

Le paratonnerre est un conducteur relié au sol et son sommet est pointu. Il est placé sur ou à proximité de l'appareil à protéger.

a) Fonctionnement :

Avec la puissance de crête, la décharge générée au sommet du paratonnerre continuera à rencontrer et à capturer le traceur de foudre, renvoyant ainsi le courant vers le sol.

Remarque : Lorsque le traceur s'approche du sol, le champ électrique au-dessus de la pointe du traceur augmente, atteignant des valeurs de 300 à 400 kV / m à certains endroits.



Principe du paratonnerre à tige.

Figure 17 : Paratonnerre

b- Eclateur

L'éclateur est généralement placé parallèlement à l'isolant et se compose de deux électrodes pointues, dont l'une est reliée à la terre et l'autre connectée à l'équipement à protéger (figure 18).

❖ Fonctionnement :

Lorsqu'une onde de tension frappe l'appareil, la grande surtension apparaissant aux bornes de l'éclateur produit un arc, qui dévie le courant vers la terre car le courant sélectionne le chemin le moins résistant.

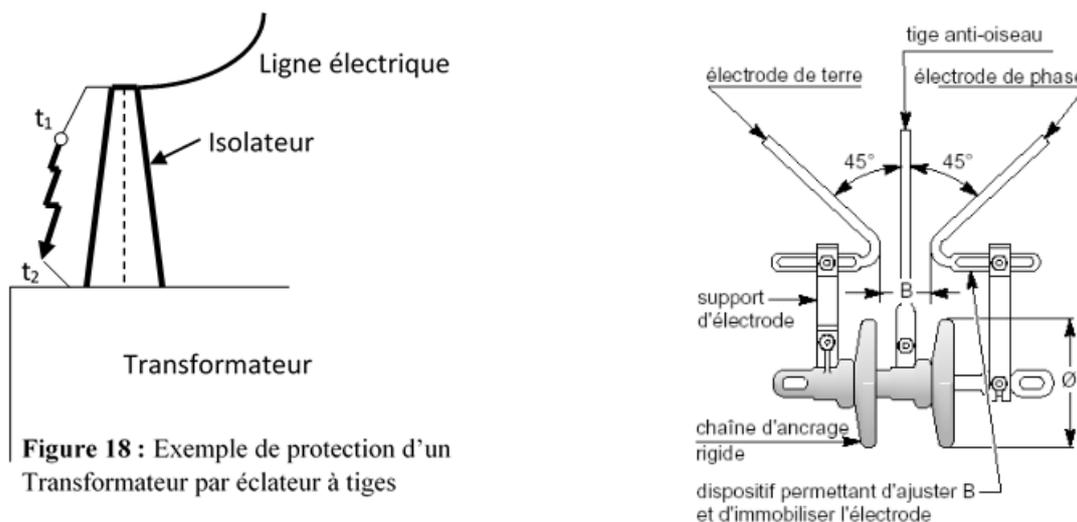


Figure 18 : Exemple de protection d'un Transformateur par éclateur à tiges

c- Parafoudre (Varistance)

❖ Fonctionnement :

La varistance est une sorte de résistance non linéaire, qui chute fortement à mesure que la tension augmente. En fonctionnement normal sans surtension, la résistance de la varistance est très élevée et empêchera le courant de circuler de la ligne vers la terre. D'autre part, à l'état de surtension, la résistance chute soudainement, de sorte que le courant et la surtension sont transférés à la terre. Lorsque l'onde de tension arrive à travers la ligne électrique, le courant de foudre choisit le chemin avec le moins de résistance, c'est-à-dire le chemin de la varistance, de sorte qu'il est polarisé vers la terre. En fait, il fonctionne sur le même principe qu'un éclateur, car dans les deux cas, la résistance du dispositif de protection diminuera: en raison d'un claquage

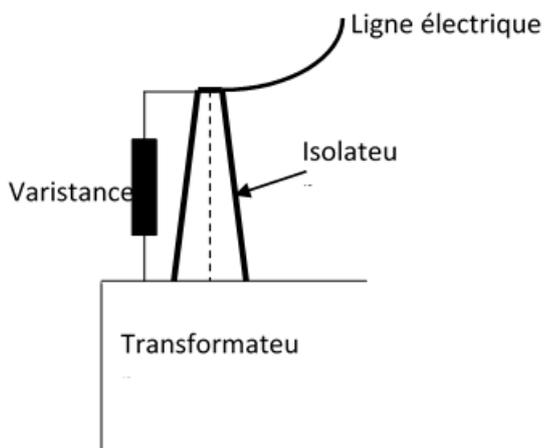


Figure 19 : exemple de protection d'un Transformateur par varistance

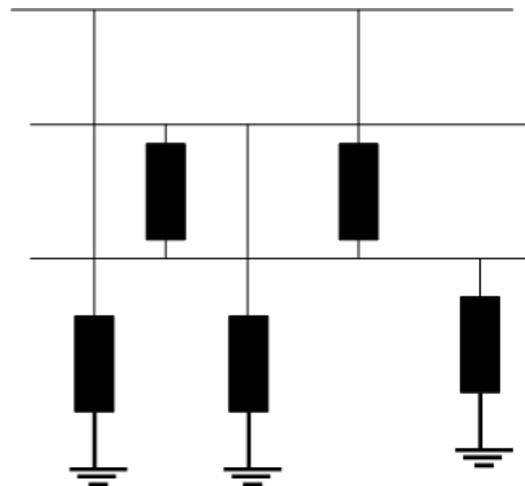


Figure 20 : Protection du réseau par des varistances

❖ Emplacement des parafoudres :

Les parafoudres seront toujours placés le plus près possible de l'équipement à protéger ou de la jonction « câble-ligne aérien ». Ils doivent être placés à proximité de l'alternateur et du transformateur. En fait, comme ils ont une impédance élevée, des réflexions se produisent, de sorte que la tension augmente localement. La combinaison des ondes peut provoquer des nœuds. Un parafoudre placé à des dizaines de mètres de distance est susceptible de se trouver à l'intérieur du nœud et ne s'amorce jamais. Dans les grandes sous-stations, il est encore plus avantageux de placer plusieurs parafoudres sur la même tige.

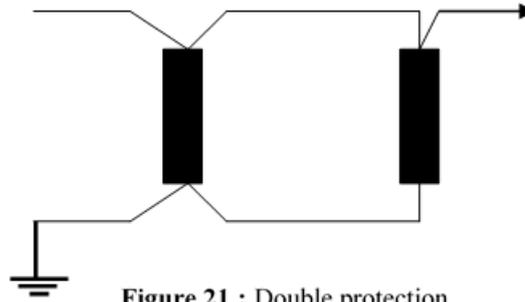


Figure 21 : Double protection

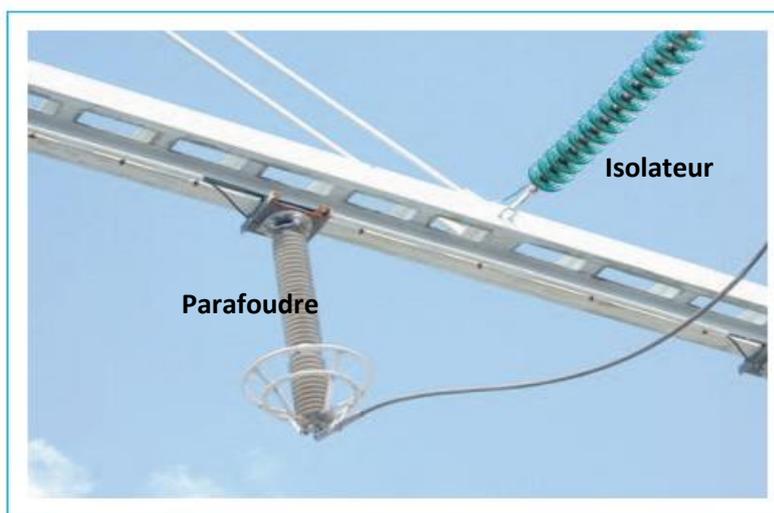


Figure 10 - Parafoudre 225 kV à enveloppe synthétique suspendu sous un portique de poste

Figure 22 : Parafoudre 225 KV.

d- Câbles de garde

Le câble de garde peut empêcher les coups de foudre car il est situé directement au-dessus du conducteur. Si un coup de foudre se produit, c'est le premier à être touché. Après un coup de foudre, il transmet de l'électricité au sol à travers le pylône. L'existence de câbles de garde ne permet pas d'éviter complètement l'apparition de coups de foudre, mais leur effet est tout de même important, car selon les différentes zones actives, les câbles de gardes peuvent réduire la probabilité d'un rapport de 1,5 à 5.

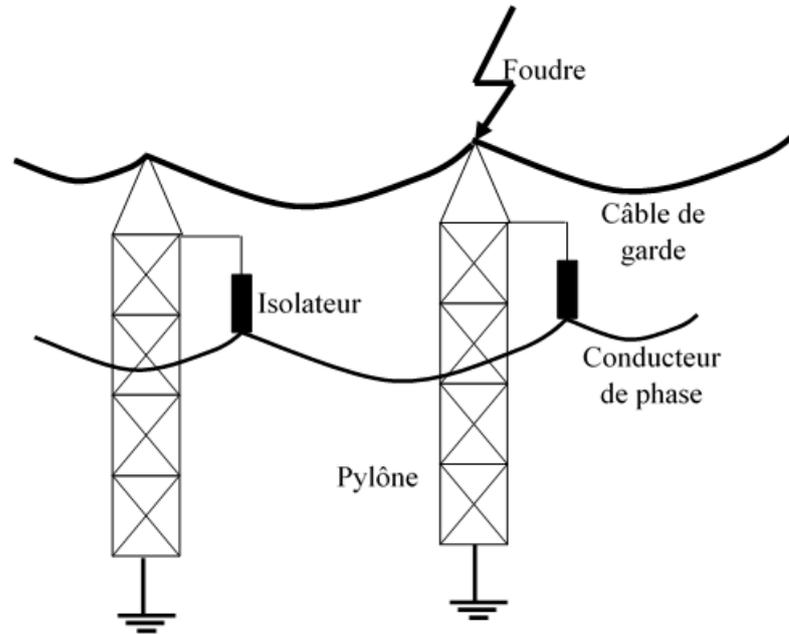


Figure 23 : Coup de foudre dans un câble de garde

Remarques :

- Pour des causes économiques, il y a une dizaine d'années, les câbles de garde étaient placés généralement à l'entrée et la sortie des postes. Mais à l'heure actuelle, comme SONELGAZ est utilisé pour la communication HF, le câble de garde a tendance à connecter l'ensemble du réseau national.
- Le diamètre du câble de garde est égal ou inférieur au conducteur de phase. Du fait qu'il joue un rôle protecteur, il réduit également l'impact de propagation d'ondes de foudre en réduisant l'impédance caractéristique de la ligne et l'éventuel blindage des lignes de télécommunication.
- Il est à noter que la plupart des coups de foudre sur les conducteurs provoquent des arcs électriques sur les réseaux à des potentiels inférieurs à 400 kV et l'amorçage de la ligne lors d'un coup direct est certain, nous essayons de nous protéger des dommages en plaçant un câble de garde.

e- Cage maillée

Elle est utilisée comme protection dans les nouvelles construction sensibles et importantes (militaire, électronique, informatique, etc.). La couche de protection externe (blindage) empêche les ondes de foudre.

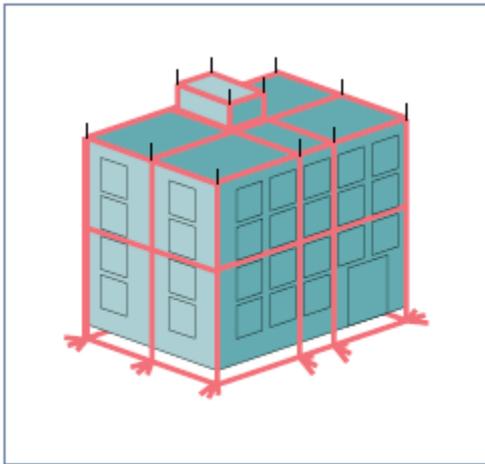


Figure 8. Principe d'une cage maillée (cage de Faraday).

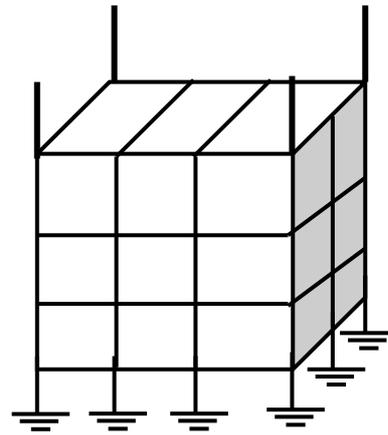


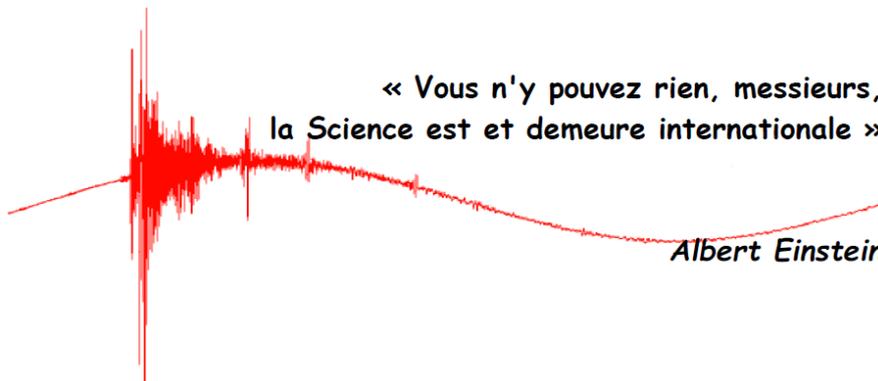
Figure 24 : Cage maillée

Cette technique est utilisée dans les constructions très sensibles et importantes (militaires, tours de contrôle, etc.), les équipements informatiques ou les boîtiers de circuits intégrés. Il s'agit d'augmenter la zone descendante à l'extérieur du bâtiment de manière symétrique. Si le bâtiment est plus grand, ajoutez des connexions horizontales.

Exemple, chaque deux étages. Le conducteur qui descend est mis à la terre par les pattes d'oie. Cette technique peut donner au bâtiment une meilleure équipotentialité et peut distribuer le courant de foudre, réduisant ainsi considérablement le champ électromagnétique et l'induction.

CHAPITRE V

Impact de la Haute Tension sur l'environnement



« Vous n'y pouvez rien, messieurs,
la Science est et demeure internationale »

Albert Einstein

CHAPITRE V Impact de la Haute Tension sur l'environnement

Introduction

Avec le développement de la civilisation, les champs naturels existants ont été complétés par divers champs et radiations d'origine anthropique, L'humanité est de plus en plus libérée de la dépendance directe vis-à-vis de l'environnement extérieur et augmente son impact sur la nature. Avec l'aide de la radio et des appareils électroniques, l'homme a créé une toile électromagnétique invisible, dans laquelle nous nous trouvons tous. Elle s'est particulièrement développée ces dernières années. Lignes électriques puissantes à haute et ultra-haute tension, stations de radio et de télévision non moins puissantes et nombreuses, répéteurs spatiaux, tous affectent l'image globale de l'effet des champs électromagnétiques.

La recherche sur les champs électromagnétiques à une importance majeure dans la technologie haute tension, en particulier le champ électrique. En effet, plus la tension est élevée, plus les champs deviennent gênants plus le respect normalisé des distances d'isolement sont importantes et le matériel devient volumineux. Plus il devient important d'apprendre comment les champs électromagnétiques, créés par nous-mêmes, agissent sur l'environnement. Le développement du monde moderne est impossible sans augmenter la consommation d'énergie.

Cette électrification rapide forme un facteur électromagnétique stable de pollution de l'environnement à proximité des immeubles résidentiels, des immeubles de bureaux, des jardins d'enfants et des écoles. Outre l'impact négatif sur le bon fonctionnement des lignes de communication et des appareils électriques de haute précision, qui, à leur tour, peuvent provoquer une catastrophe d'origine humaine, le champ électromagnétique (CEM) des lignes de transport d'électricité a un effet important sur les objets biologiques, en particulier la santé des gens et la qualité de la vie.

V-1 Impact des champs électromagnétique dans les réseaux électriques sur l'environnement

V-1-1 Champ électrique

La présence des charges électriques (électrons) génère un champ électrique (EC). Relatif à la tension (en volts), le champ électrique est mesuré en (V/m). Près des lignes à haute tension, le CE est généralement mesuré en kilovolts / mètre (kV / m). Plus la tension de service de l'appareil est élevée, plus le champ E générée est élevée. Le fil branché sur une prise de courant d'un appareil génère le CE, même si l'appareil n'est pas en marche. La présence d'abris (arbres, clôtures, bâtiments, etc.) peut réduire considérablement l'intensité de l'EC.

V-1-2 Méthode générale de calcul

Le champ superficiel d'un conducteur se calcule, de la façon la plus générale, par le théorème de

Gauss :

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 r}$$

où : E : Champ superficiel en [kV/cm].

q : Charge superficielle / unité de longueur [C/m].

r : rayon lisse équivalent du conducteur, en [cm].

$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi \cdot 10^9}$: permittivité de l'air, en F/m

Dans les montages expérimentaux, on utilise une nasse cylindrique dont le conducteur de rayon r est placé au centre d'un cylindre métallique de rayon R relié à la terre (fig.2.1).

Appliquons le théorème de Gauss dans ce cas de figure, le champ électrique au point M vaut :

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 \cdot \rho}$$

où ρ est la distance du point M par rapport à l'axe.

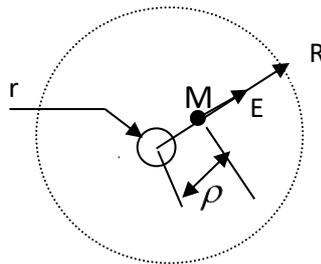


Figure V-1: Champ électrique radial dans une nasse cylindrique.

On en déduit le potentiel du conducteur central :

$$V = \int_r^R E d\rho = q \cdot \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{R}{r}$$

Ainsi que sa capacité par rapport au cylindre, puisque $C = q/V$

$$\text{D'où : } C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{R}{r}} \quad \text{et} \quad E = \frac{V}{\rho \ln \frac{R}{r}}$$

A la physique fondamentale des champs électriques quasi-statiques correspond celle des champs magnétiques quasi-statiques. C'est en effet la propriété quasi-statique qui peut analyser le champ électrique et magnétique de manière indépendante et non interactive. Au champ électrique E et à la densité de flux électrique Φ correspondent au champ magnétique H et au champ d'induction magnétique B avec :

$$B = \mu_0 \mu_r H$$

où : $\mu_0 = 4 \pi 10^{-7}$

μ_r : Perméabilité relative.

L'une des lois fondamentales du magnétisme, la loi d'Ampère :

$$\oint \vec{H} . d\vec{l} = i$$

Exemple : Cas d'un seul conducteur :

Pour calculer le champ magnétique au niveau du sol au voisinage d'une ligne de transport d'énergie, on peut utiliser la formule $B = \mu_0 \mu_r H$, ce champ est engendré par le courant circulant dans le conducteur (i) voir figure V-2.

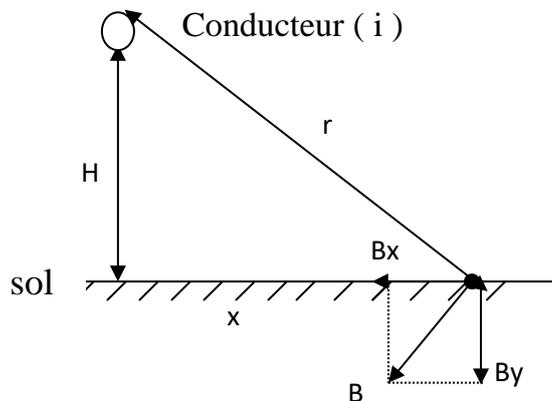


Figure V-2: L'intensité magnétique générée par le courant I qui circule dans un conducteur.

On peut utiliser la théorie des images des conducteurs en tenant compte de la profondeur de pénétration; en effet l'image est située à une certaine profondeur sur le sol, qui est bien supérieure à la hauteur du conducteur. la profondeur « p » égale en première approximation :

$$p = 660 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \text{ mètres}$$

où : ρ : résistivité du sol en ohm par mètre.

f : fréquence en Hz.

Pour tenir compte du sol qui est imparfaitement conducteur Le calcul précis du champ magnétique nécessite l'utilisation du terme de Carson. Mais dans la plupart des applications, il suffit d'ignorer l'image et de considérer les lignes de phase dans l'espace libre.

Pour le conducteur de la figure V-2, sans son image on peut appliquer la formule:

$$\vec{B} = \frac{\mu I}{2\pi r} = \frac{\mu I}{2\pi \sqrt{h^2 + x^2}}$$

Où I : est le courant qui traverse le conducteur et vaut:

$$I = \frac{P}{U \cdot \cos \varphi}$$

Où : P est la puissance active transportée par le conducteur.

U: Tension appliquée au conducteur.

φ : Déphasage entre la tension U et le courant I.

V-2 Impact de l'effet de couronne dans les réseaux électriques sur l'environnement

La construction des lignes est faite de manière à minimisé l'effet corona. Cependant, cela se génère dans des circonstances différentes:

-*Par temps pluvieux* ou dans *le brouillard*. Les gouttes d'eau donnent naissance d'aigrettes autour du conducteur;

-Quand les phases d'une ligne ou l'isolateur commencent à être **pollués**, cela favorise l'effet couronne après un nombre d'années ;

-Si une phase ou isolant a été endommagé en raison d'une défaillance mécanique bien déterminé. A ce niveau, l'effet corona génère des perturbations qui peuvent être utilisé pour localiser le défaut.

V-2-1 Pertes:

Quelle que soit la méthode d'émission, le phénomène de base est toujours la transformation des atomes en ions positive & électrons.

Toute charges avec des signes opposés au conducteur sont immédiatement attirées au conducteur et neutralisées, tandis que toute charges de mêmes signes sont repoussé à l'extérieur via le champ électrique. Puisque les électrons s'attachent très rapidement au atomes et forme les ions négatifs ; leurs migrations dans le champ électrique sont la cause physique des **pertes**, l'énergie est dissipée à cause du frottement.

V-2-2 Perturbations électromagnétiques

L'effet de couronne engendre un rayonnement électromagnétique

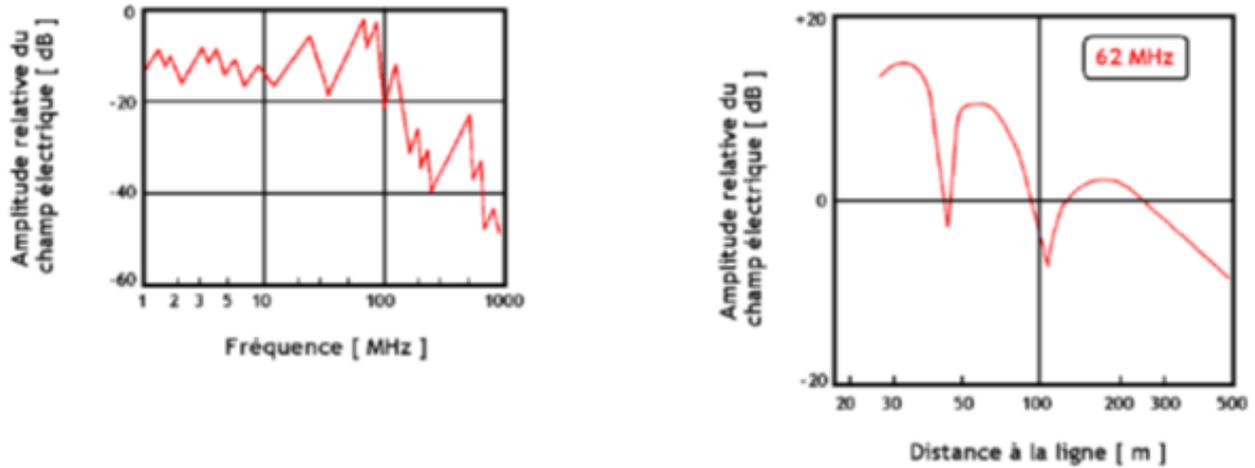


Figure V-3: Exemples de variation du champ électrique perturbateur, tirés de la norme CISPR 18-1.

Une différence de 20 dB est régulièrement observée entre les niveaux des champs électriques perturbateurs mesurés par temps sec et par temps pluvieux.

V-2-3 Perturbations acoustiques produite par les lignes à HT et THT

Les fréquences sonores émises par l'effet de couronne dans le réseau électrique sont principalement comprises entre 2 et 15 kHz.

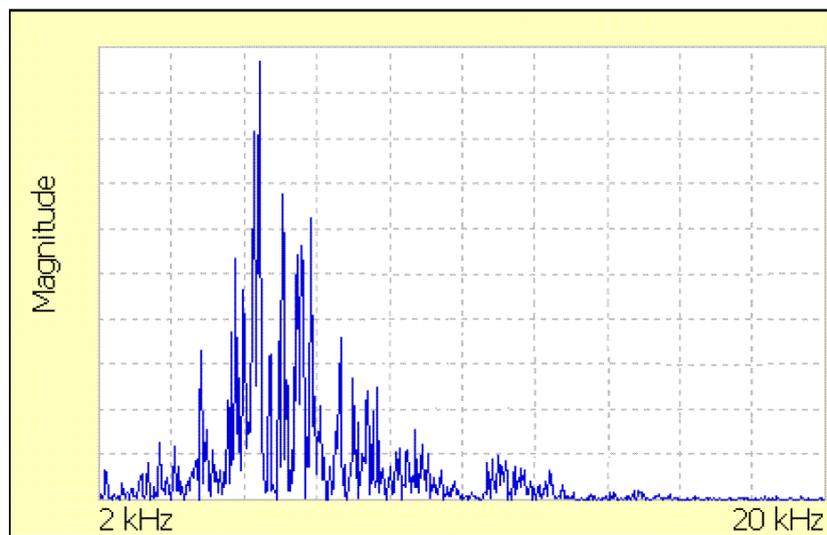


Figure V-4: Exemple de spectre sonore enregistré sur une installation moyenne tension.

V-2-4 Production d'ozone

La production d'ozone autour des lignes à haute tension est généralement modérée.

Des mesures réalisées sous des lignes haute tension ont montré des concentration d'ozone de l'ordre de 0,004 ppm d'ozone par temps sec et jusqu'à 0,009 ppm par temps pluvieux.

Les seuils de toxicité de l'ozone, pour des effets réversibles (sensibilité bronchitique) correspondent à 0,1 ppm pendant 7 heures ou 0,35 ppm pendant 1 heure. Dose létale : 50 ppm pendant 30 minutes.

V-2-5 Application de l'effet de couronne

a- Production d'ozone

- Pour purifier: élimination des bactéries dans l'eau et dans l'air, oxydation des métaux lourds dans les rejets industriels.
- Pour blanchir: aliments, papier, textiles...

b- Parafoudre

- La conductivité de l'air est grande autour de la pointe due à l'effet couronne; le coup de foudre opte pour le chemin le moins résistant et il sera capté par le paratonnerre (Figure V-5).

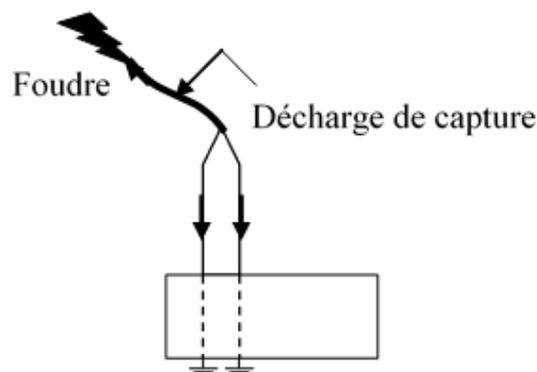


Figure V-5 : Parafoudre

c- Neutralisation

- Les surfaces des avions se charge par frottement avec l'air. Les charges surfaciques seront éliminées et neutralisé par effet couronne produit par des flèches disposées sur les ailes de l'avion.

d- Filtre électrostatique

- Le filament central génère une charge négative par effet corona. Les particules de poussière chargées négativement sont attirées et capturées par le cylindre, empêchant ainsi leur émission. Ce cylindre agit comme un filtre à poussière, une fois saturé, il sera remplacé par un nouveau filtre (Figure V-6).

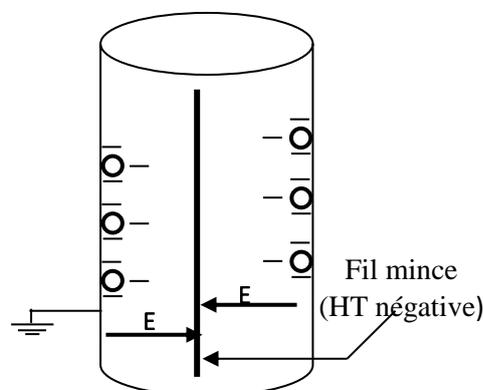


Figure V-6 : Filtre électrostatique

e- Séparateur électrostatique

- Lorsque l'électrode à pointe est connectée à une source de tension négative élevée, le mélange de particules granulaires acquiert la charge électrique générée par l'effet corona.
- Le comportement des particules métalliques ou isolantes est différent et tombent à différents endroits (Figure V-7).

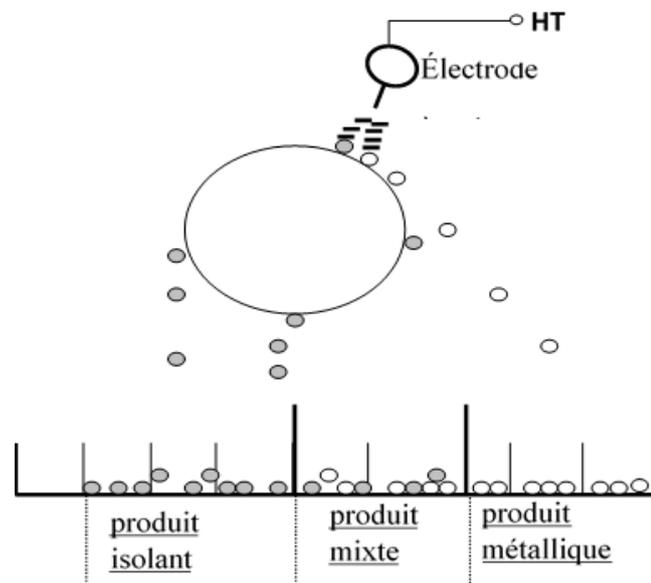


Figure V-7 : Séparateur électrostatique

V-3 Action biologique des lignes électriques

Les champs électriques et magnétiques sont des facteurs d'influence très forts sur l'état de tous les objets biologiques qui tombent dans la zone de leur influence. Par exemple, dans le domaine d'action du champ électrique des lignes de transport d'énergie, les insectes présentent des changements de comportement: de cette manière, les abeilles présentent une agressivité accrue, de l'anxiété, une diminution de l'efficacité et de la productivité, une tendance à perdre des reines. Chez les plantes, les anomalies de développement sont courantes, les formes et les tailles des fleurs, des feuilles et des tiges changent souvent et des pétales supplémentaires apparaissent. Une personne en bonne santé souffre d'un séjour relativement long dans le domaine des lignes électriques. Une exposition de courte durée (minutes) peut entraîner une réaction négative uniquement chez les personnes hypersensibles ou chez les patients souffrant de certains types d'allergies. Des études ont montré qu'une exposition à long terme aux rayonnements électromagnétiques, même à des niveaux relativement bas, peut provoquer le cancer, des pertes de mémoire, la maladie de Parkinson et d'Alzheimer, l'impuissance et même augmenter les tendances suicidaires. Les champs sont particulièrement dangereux pour les enfants et les femmes enceintes. Ces dernières années, les maladies oncologiques sont souvent citées parmi les conséquences à long terme. Certaines personnes sont hypersensibles aux champs électromagnétiques, et les médecins l'ont appelé « syndrome d'hypersensibilité électromagnétique ».

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Haute Tension, M. Aguet, M. Ianovici, vol XXII, Edition Georgi 1982.
- [2] High Voltage Engineering, Practice and Theory, J. P. Holtzhausen, W. L. Vosloo.
- [3] High voltage insulation technology: Textbook for Electrical Engineers, D. Kind, H. Karner, Friedr Vieweg & Sohn 1985.
- [4] Les propriétés diélectriques dans l'air et les très hautes tensions, C.Gary, Editions Eyrolles, 1984
- [5] Haute tension, P. Bergounioux, Edition Willam blake & Co, 1997.
- [6] A. TILMATINE, Technique de la Haute Tension, Notes de cours, Université Djillali liabès Sidi Bel Abbés. <http://cours-examens.org/index.php/etudes-superieures/8-etudes-superieures/ingeniorat-electricite/222-8-cours-11-examens-et-5-documents-de-techniques-de-haute-tension>
- [7] Djilali Benyoucef, Technique de la Haute Tension, Notes de cours, Université Hassiba Benbouali,Chlef, <http://cours-examens.org/images/An-2018/Etudes-superieures/Electricite/Haute-tension/Techniques-Haute-Tension.pdf>
- [8] Pierre Zweiacker, Cours de Haute Tension, École polytechnique fédérale de Lausanne Suisse, <http://www.surprises.ch/HT/A-HAUTE-TENSION.html>.
- [9] M. BRAHAMI, IMPACT DE L'EFFET DE COURONNE SUR LES LIGNES TRES HAUTE TENSION, Thèse de doctorat UDL, SBA. Octobre 2003.
- [10] I. FOFANA, INGÉNIERIE DE LA HAUTE TENSION, Note de cours, Université du Québec à Chicoutimi, <http://www.uqac.ca/ifofana/cours.php>.
- [11] E. Kuffel, Zaengl W. S., High Voltage Engineering Fundamentals, Pergamon Press , 1970, (Collection générale Bibliothèque UQAC: TK3401K95.1970).
- [12] M. S. Naidu and Kamaraju V. High Voltage engineering, New York; 2e Ed, McGraw-Hill, 1996, (Collection générale Bibliothèque UQAC : TK3144N155.1996).
- [13] M. Aguet et M. Ianoz, Haute Tension, Dunod, 1987 (Collection générale Bibliothèque UQAC : TK7T768.1990.22 et TK7T768.22).
- [14] G. Le Roy, C. Gary, B. Hutzler, J. Lalot et C. Dubanton, Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions, Editions Eyrolles, Paris, 1984 (Collection générale Bibliothèque UQAC: TK3091P965.1984).