

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



Technique de la haute tension

Cours et exercices

Présenté par : Pr SMAILI Atallah

Année universitaire :2024/2025

Introduction

Ce manuscrit constitue un support de cours pédagogique sur les différentes techniques de la haute tension. Il est destiné aux étudiants ingénieurs de 4^e année ainsi qu'aux étudiants en Master 2, option Réseaux Électriques.

La rédaction de ce polycopié s'appuie sur les programmes d'enseignement adoptés par les universités traitant de la haute tension. Bien que chaque pays définisse ses propres référentiels et unités de mesure, les principes fondamentaux restent régis par des normes internationales établies par les grands chercheurs du domaine.

L'étude de la haute tension couvre l'ensemble des systèmes soumis à l'influence du champ électrique. Elle permet notamment d'analyser les phénomènes liés à l'isolement des lignes électriques et des équipements associés, en vue d'assurer leur bon fonctionnement et leur sécurité.

Ce document propose une analyse complète des principes théoriques et pratiques de la haute tension, en abordant tant les aspects techniques que les enjeux environnementaux et économiques liés à son utilisation. Il s'agit d'un outil essentiel pour la formation des ingénieurs et techniciens, leur fournissant les connaissances nécessaires pour comprendre et maîtriser les défis associés aux systèmes de haute et très haute tension (THT), et plus récemment à l'ultra-haute tension (UHT).

Sommaire

Introduction

I. Généralités

1. Historique de l'électricité
2. Les pionniers de l'électricité
3. Définition de la haute tension (HT)
4. Objectifs de l'étude de la haute tension
5. Domaine d'application de la haute tension

II. Sources de Haute Tension

1. Source de haute tension continue
2. Source de haute tension alternative
3. Source de haute tension impulsionnelle

III. Métrologie en Haute Tension

1. Mesure de la haute tension
2. Mesure des pertes diélectriques
3. Méthodes de mesure

IV. Décharges Électriques

1. Décharge électrique dans les gaz
2. Décharge électrique dans les liquides
3. Décharge électrique dans les solides
4. Effet de couronne
5. Phénomène de streamers

V. Foudre et Protection Contre la Foudre

1. Définition et mécanismes de la foudre
2. Effets de la foudre
3. Moyens de protection contre la foudre

VI. Compatibilité Électromagnétique (CEM)

1. Fondamentaux de l'électromagnétisme
2. Sources de perturbations électromagnétiques
3. Techniques d'atténuation des perturbations
4. Tests et normes de compatibilité électromagnétique

VII. Impact de la Haute Tension sur l'Environnement

1. Effets sur la faune et la flore
2. Effets sur la santé humaine
3. Gestion et prévention des impacts environnementaux

VIII. Exercices et Solutions

I. Généralités

1. Historique de l'Électricité

L'électricité est l'une des forces fondamentales dans le monde moderne, utilisée tant pour l'éclairage des habitations que pour l'alimentation des appareils électriques. Elle est omniprésente dans tous les domaines de la vie quotidienne. Dans ce chapitre, nous mettrons en lumière les inventeurs clés qui ont marqué l'histoire de l'électricité, nous conduisant à travers une série de découvertes et d'innovations. Cet ouvrage explorera les grands noms qui ont contribué à la découverte et à l'utilisation de l'électricité, depuis ses premières découvertes jusqu'à son développement actuel.

2. Les Pionniers de l'Électricité

2.1 Thalès de Milet (625-548 av. J.-C.)

Thalès de Milet, un philosophe grec du VI^e siècle avant J.-C., est souvent considéré comme l'un des premiers à avoir observé les propriétés électriques de certains matériaux. Il découvrit que l'ambre, lorsqu'il était frotté, pouvait attirer de petits objets. Cette observation constitue l'une des premières études sur les effets électrostatiques.

2.2 William Gilbert (1544-1603)

William Gilbert, médecin et physicien anglais, est reconnu pour ses travaux fondateurs sur l'électromagnétisme. Dans son ouvrage *De Magnete*, publié en 1600, il décrit ses expériences avec des aimants et d'autres matériaux magnétiques. Il a également exploré les effets électriques de l'ambre et d'autres substances, jetant ainsi les bases des recherches futures sur l'électricité et le magnétisme.

2.3 Charles-François de Cisternay du Fay (1698-1739)

Ce scientifique français du XVIII^e siècle a découvert les charges électriques. Il distingua deux types de charges, la charge positive et la charge négative, un concept qui est toujours utilisé aujourd'hui. Ses recherches ont contribué à la compréhension des conducteurs et des isolants, éléments clés pour la construction de machines électriques.

2.4 Michael Faraday (1791-1867)

Michael Faraday, chimiste et physicien anglais, est l'un des pionniers de l'électromagnétisme. Il est surtout connu pour ses travaux sur l'induction électromagnétique, démontrant que le mouvement d'un aimant par rapport à un conducteur peut générer un courant électrique. Ses découvertes ont permis le développement des générateurs électriques et des transformateurs. Faraday est également célèbre pour avoir conçu la cage de Faraday, un dispositif de protection contre les champs électriques.

2.5 James Clerk Maxwell (1831-1907)

Physicien écossais, James Clerk Maxwell a formulé les équations fondamentales de l'électromagnétisme, désormais connues sous le nom d'« équations de Maxwell ». Ces équations rassemblent les lois de l'électricité et du magnétisme et sont considérées comme le support mathématique de l'électromagnétisme. En 1864, Maxwell a prédit l'existence des ondes électromagnétiques, dont les recherches ont conduit à des innovations technologiques majeures, telles que les communications sans fil.

2.6 Thomas Edison (1847-1931)

Thomas Edison, l'un des inventeurs les plus célèbres, a développé l'ampoule électrique en 1879, révolutionnant l'éclairage domestique. Il a également contribué à la mise en place du réseau électrique de distribution d'électricité, facilitant ainsi l'accès à l'électricité pour le grand public.

3. Définition de la Haute Tension (HT)

La haute tension est un terme utilisé pour désigner une tension électrique supérieure à 33kV en courant alternatif (AC). La HT concerne l'ensemble des systèmes soumis à l'action des champs électriques intenses. Par exemple, une ligne de transport d'énergie de 400 kV fait partie de ces systèmes, car elle génère des champs électriques de plusieurs kV/m. De même, les condensateurs électriques, qui fonctionnent à des champs de plusieurs milliers de V/mm, nécessitent l'application des techniques de haute tension.

4. Objectifs de l'Étude de la Haute Tension

L'étude des phénomènes liés à la haute tension dans les réseaux de transport et d'interconnexion poursuit plusieurs objectifs :

- 1. Explorer des niveaux de tension plus élevés**
- 2. Améliorer la compréhension des phénomènes associés aux Très Haute Tension (THT), afin de mieux dimensionner et concevoir les infrastructures de transport d'énergie HT, THT, ou Ultra Haute Tension (UHT).**
- 3. Réaliser des essais de courte durée et accélérés.**
- 4. Assurer la mise en service des infrastructures**
- 5. Effectuer un contrôle et un suivi durant l'exploitation des systèmes électriques.**

Exemples d'avancées dans le domaine de la HT :

- En 2003, la Chine a construit une grande ligne à haute tension.
- En 2009, la State Grid Corporation of China a mis en service sa première ligne à 1000 kV, avec une tension maximale de service de 1100 kV.

- En 2012, la France a commencé la construction d'une ligne de 160 km reliant une centrale nucléaire à une autre ville.
- Entre 2013 et 2014, la Chine a développé un réseau de 800 kV et a mis en service un autre réseau à 1200 kV.

5. Domaine d'Application de la Haute Tension

La haute tension est utilisée dans de nombreux domaines. Voici un tableau représentant les principales applications :

Tableau1 : Domaine d'application de la Haute Tension

Domaine	Application
Réseaux THT	Lignes de transmission, câbles, isolateurs, transformateurs de mesure de Tension, transformateurs de courant, sectionneurs, mise à la terre
Électricité statique	Générateurs électrostatiques, moteurs, imprimantes
Décharge électrique	Explosions, incendies, perturbations électroniques
Physique	Microscope électronique, accélérateur de particules.
Médecine	Effets biologiques, diagnostic par rayons X, thérapie par rayons X.
Électronique	Tube cathodique, allumage électrique, flash électrique.
Nucléaire	Protection des lignes électriques, transmission, circuits électroniques.

6. Les lignes haute tension THT et HT :

■ Comment distinguer les différentes lignes électriques ?

Les lignes électriques peuvent être distinguées en fonction de leur support :

- * **Haute et très haute tension** : elles sont généralement soutenues par des **pylônes métalliques**.
- * **Basse et moyenne tension** : elles sont principalement déployées sur des **poteaux en bois** ou en **béton**.
- **Pourquoi faut-il se tenir loin des lignes électriques ?**

À proximité d'une ligne électrique, le danger existe dès lors que vous vous en approchez ou pointez un objet dans sa direction, sans même la toucher directement. En effet, le simple fait de s'en approcher trop près peut provoquer un arc électrique (également appelé « amorçage ») et donc un risque d'électrocution !

■ **Que dois-je faire s'il y a des lignes électriques à proximité ?**

Certaines règles de sécurité sont à respecter à proximité des lignes électriques :

- Ne jamais toucher une ligne,
- Ne pas s'approcher à moins de 5 mètres des lignes (même à l'aide d'un objet ou outil),
- Ne pas toucher un arbre dont les branches s'approchent à moins de 2 mètres d'un câble nu ou en contact direct avec câble isolé,
- Ne pas réaliser de jeu sous les lignes électriques.

■ **Pourquoi les lignes électriques font-elles du bruit ?**

Ce phénomène, appelé effet couronne, correspond à une perte d'énergie due à l'ionisation de l'air autour d'un conducteur soumis à un champ électrique intense. L'air devient alors partiellement conducteur, ce qui peut produire un bruit caractéristique.



Figure. 01 : Effet couronne

■ **Composants et Caractéristiques des lignes HT et THT :**

Conducteurs :

Les conducteurs aériens sont affectés par les conditions climatiques telles que la température, le vent, la pluie ou le verglas. Ils doivent être choisis en fonction de leur résistance à ces intempéries. La capacité de transport d'une ligne aérienne dépend du type de conducteur utilisé et des conditions météorologiques. Il est important de s'assurer que la chaîne de conducteurs ne soit pas trop proche du sol ou de la végétation en raison de l'expansion thermique liée à l'effet Joule. Les matériaux les plus courants pour la fabrication des câbles sont l'aluminium et le cuivre. Le tableau ci-dessous présente leurs différentes caractéristiques :

Tableau 02 : Propriétés des matériaux conducteurs les plus utilisés

Propriétés	Cuivre	Aluminium
Résistivité à 20°C (10 ⁻⁸ Ω.m)	1.72	2.8
Masse volumique (kg.m ⁻³)	8890	2700
Contrainte de Rupture à la traction (Mpa)	380 à 450	150 à 190

Le cuivre est un excellent conducteur grâce à sa faible résistivité et sa résistance aux chocs, bien qu'il soit difficile à manipuler.

L'aluminium, utilisé comme alternative, présente une faible contrainte de rupture. Pour améliorer sa résistance, il est traité et allié à d'autres métaux, comme l'aluminium écroui dur, l'aluminium recuit, et les alliages (Aluminium-Acier, Almélec).

**Figure. 02** : Câble en cuivre**Figure. 03** : Conducteur en aluminium

La température maximale d'un conducteur dépend de la chaleur qu'il peut supporter sans dommages, de sa capacité à dissiper la chaleur et de la température ambiante. Pour garantir la sécurité, la somme de la température ambiante et de l'élévation thermique de l'isolant ne doit pas dépasser la température admissible.

Tableau 03 : Caractéristiques des différents alliages en aluminium

Matériaux	Résistivité à 20°C (10 ⁻⁸ Ω.m)	Contrainte de Rupture à la traction (Mpa)	Température maximale Permanente (°C)
Aluminium écrouidur	2,825	160 à 180	75
Almélec	3,26	315 à 325	75
Aluminium recuit	2,92	59 à 97	250

Prenant en considération le prix, le cuivre et l'aluminium sont clairement le meilleur choix pour les conducteurs.

➤ **Types des conducteurs HT :**

a. Conducteurs aériens à haute tension :

Il existe plusieurs types de conducteurs aériens utilisés dans la transmission à haute tension. Certains des plus courants sont les suivants :

1. Fils d'aluminium :

Ces conducteurs sont principalement composés d'aluminium et sont largement utilisés en raison de leur légèreté, bonne conductivité électrique et résistance à la corrosion. Les câbles en aluminium offrent un excellent rapport qualité-prix. Cela en fait un choix populaire pour la transmission d'énergie électrique aérienne.



Figure. 04 : Conducteur aérien en aluminium Haute Tension

2. Câbles en alliage d'aluminium

Ces conducteurs sont constitués d'un alliage d'aluminium qui peut comprendre d'autres éléments comme le silicium, cuivre et magnésium. L'incorporation de ces alliages améliore les caractéristiques mécaniques du conducteur en aluminium pur, tels que la résistance à la fatigue et la capacité de supporter des charges plus lourdes. Les câbles en alliage d'aluminium sont idéaux pour les situations où une capacité de charge plus élevée et une plus grande résistance aux conditions météorologiques difficiles sont requises...



Figure. 5 : Conducteur d'almelec 54.6mm, en aluminium

3. Câbles en acier renforcé :

Ils sont constitués d'un noyau en acier recouvert de couches concentriques d'aluminium. La combinaison de l'acier et de l'aluminium offre une résistance mécanique élevée et lui permet de résister à des contraintes plus élevées. Les câbles renforcés d'acier sont particulièrement adaptés aux zones où des conditions météorologiques extrêmes sont attendues, comme des vents forts ou de la glace.



Figure. 6 : Conducteur en aluminium avec noyau en acier renforcé.

b. Conducteurs souterrains haute tension :



Figure. 07 : câble enterré haute tension

Généralement, les conducteurs de la haute tension sont aériens et il y a rarement câbles souterrains à haute tension. Ceci est dû au fait, comme l'air est un isolant et la terre un conducteur. Ensuite, tous les câbles souterrains doivent être isolés pour éviter les fuites de courant. Le coût d'isolation des câbles souterrains à haute tension est si élevé qu'ils ne sont utilisés que dans une partie des municipalités des grandes villes. Les conducteurs souterrains à haute tension utilisent essentiellement des conducteurs en cuivre, qui ont une efficacité de transmission plus élevée que les conducteurs en aluminium. Quand ils tendent, les câbles souterrains à haute tension sont souvent posés dans des tranchées pour réduire les pertes de transmission.

c. Conducteurs spéciaux haute tension



Figure. 08 : sous-marin de câble HVDC

Il existe d'autres types de conducteurs haute tension utilisés dans des cas particuliers. Les plus courants sont les câbles sous-marins HVDC. Ces câbles sont spécialement conçus pour la transmission de courant continu sur de longues distances sous-marines.

A. Câble de garde :

Le câble de garde est un conducteur placé en tête de pylône, au-dessus des phases et attachés directement aux pylônes ; son rôle est de protéger la ligne électrique contre les coups de foudre, d'améliorer le fonctionnement des protections par mise en parallèle des prises de terre des pylônes et de réduire les phénomènes d'induction sur les lignes de télécommunications ou les canalisations métalliques voisines. Ils sont généralement fabriqués en alliage d'aluminium et de magnésium appelé almélec-acier, spécialement conçu pour les conducteurs électriques. Grâce à des traitements thermiques et mécaniques, l'almélec acquiert une résistance à la rupture double de celle de l'aluminium pur écroui tout en maintenant une conductivité élevée proche de celle de l'aluminium pur.

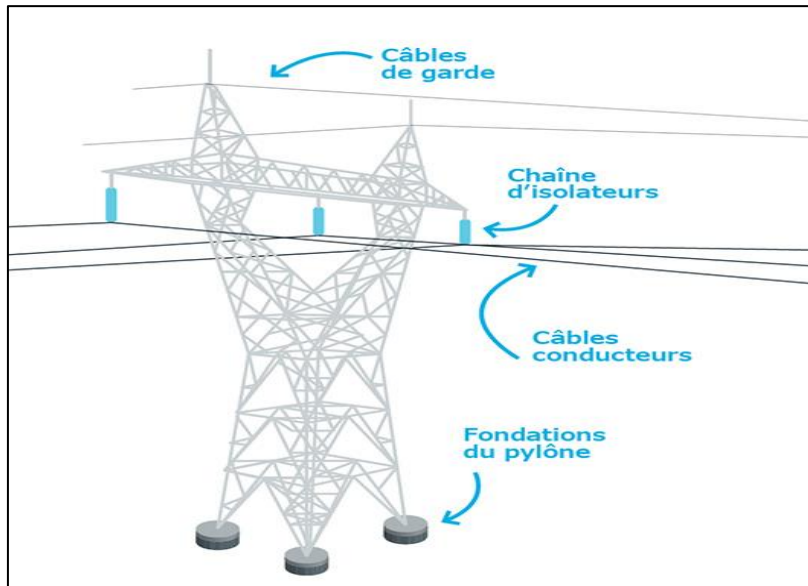


Figure. 09 : Emplacement de câble de garde et les conducteurs dans un pylône.

Il existe deux types de câble de garde :

- Des câbles alu-mécan-acier normaux ;
- Des câbles alu-mécan-acier comportant à l'intérieur des circuits de télécommunication. Equipés de fibres optiques, ils permettent de transmettre les informations nécessaires pour la protection, la conduite et l'exploitation du réseau.

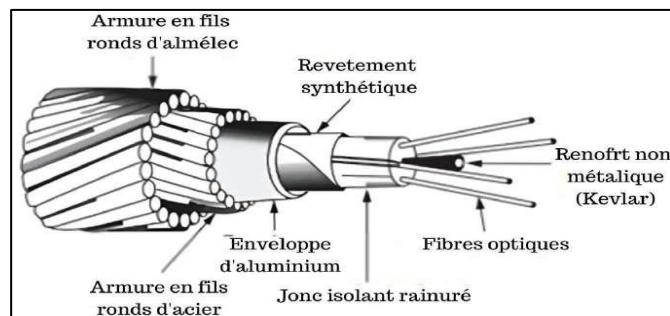


Figure 10 : Câble de garde à fibres optiques incorporées.

B. Isolateurs :

Un isolateur est un composant en matériau isolant solide, caractérisé par une très grande résistance électrique et une conductibilité quasi nulle. Il est conçu pour isoler les conducteurs et les pièces sous tension, empêcher les courts-circuits, les pertes de courant et les risques d'électrocution.

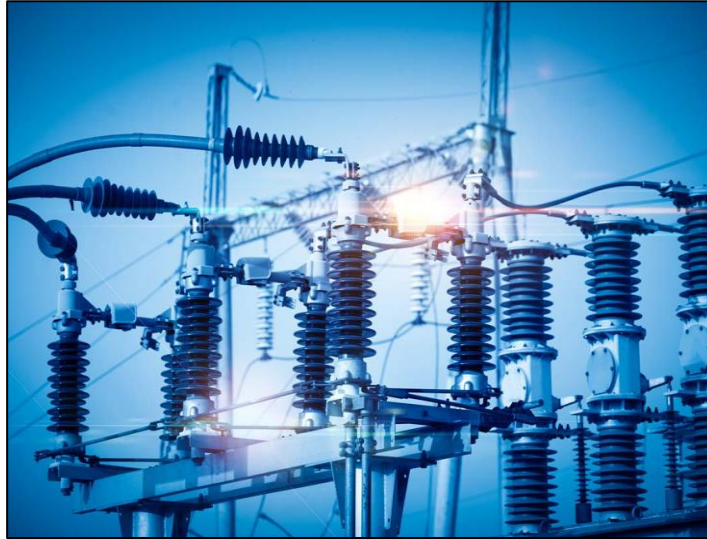


Figure. 11 : Isolateurs HT

1. Rôle des isolateurs de haute tension :

- ✓ Ils permettent d'isoler électriquement les lignes de transport d'énergie électrique des pylônes mis à la terre
- ✓ Ils ont un rôle mécanique qui consiste à soutenir ces mêmes lignes et donc résister aux différentes contraintes mécaniques dû surtout au poids de la ligne, son mouvement en présence de vent.

2. Types d'isolateurs HT :



Figure. 12 : Isolateur en porcelaine



Figure. 13: Isolateur en verre

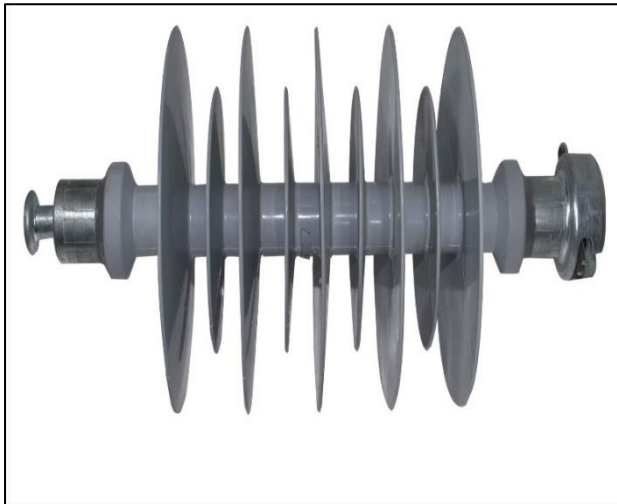


Figure. 14 : Isolateur en silicone



Figure. 15 : Isolateur en polymère

3. Vieillessement des isolateurs :

Le vieillissement des isolateurs est dû à deux phénomènes distincts : la perforation de l'isolateur par un arc électrique à l'intérieur de son matériau et le contournement de l'isolateur par un arc électrique qui se propage sur sa surface.

■ La perforation :

Se produit quand des décharges partielles se produisent au voisinage des imperfections des isolateurs (vide, inclusion, inhomogénéité), et vont progressivement ronger l'isolateur, jusqu'à l'apparition d'une décharge complète détruisant par explosion l'isolateur (décharge intrinsèque-perforation).

■ Le contournement :

Il faut distinguer deux cas dû à :

- a) **Une surtension** (foudre par exemple) qui provoquera une décharge électrique à la surface de l'isolateur suivant des mécanismes à peu près similaires aux décharges dans les intervalles d'air (streamer et/ou leader).
- b) **La pollution atmosphérique** est une des causes principales des interruptions de l'alimentation en énergie des réseaux électriques.

4. Le processus de contournement :

Le processus de contournement est constitué de quatre phases :

- a) Dépôt d'une couche solide constituée de sels et de matériaux insolubles, sauf dans le cas d'une pollution marine où la pollution est sous la forme d'embruns marins.
- b) Humidification de la couche de pollution et circulation d'un courant dû à la dissolution des sels contenus dans le dépôt (formation d'un électrolyte).

- c) Apparition de bandes sèches dues à l'échauffement par effet Joule résultant de la circulation du courant et conduisant à l'amorçage de décharges locales.
- d) Elongation des décharges jusqu'à court-circuiter l'isolateur : **contournement**.

✚ Plusieurs solutions ont été proposées pour améliorer les performances des isolateurs telles que :

- **L'allongement de la ligne de fuite** : l'allongement de la distance que l'électricité doit parcourir à la surface d'un isolateur entre les points de haute tension (conducteur) et de basse tension (pylône ou sol). Cette distance est importante car plus elle est longue, plus il est difficile pour l'électricité de franchir l'isolateur et de provoquer un court-circuit.
- **Le lavage sous tension** : Est une méthode utilisée pour nettoyer les isolateurs électriques par l'utilisation d'une solution chimique spéciale, tout en maintenant les lignes électriques sous tension.
- **Modifier la nature du matériau isolant** pour lui conférer de meilleures capacités d'isolation. Par exemple, on utilise des matériaux comme l'EPDM, le silicone, ou des isolateurs en céramique dopés avec des semi-conducteurs.

5. **Identification de la ligne haute tension par la taille des isolateurs :**

Le nombre de galettes peut indiquer la puissance de la ligne :

- 20 000 Volts (2 à 3 galettes)
- 63 000 Volts (4 à 6 galettes)
- 90 000 Volts (9 galettes)
- 225 000 Volts (12 à 14 galettes)
- 400 000 Volts (19 galettes)

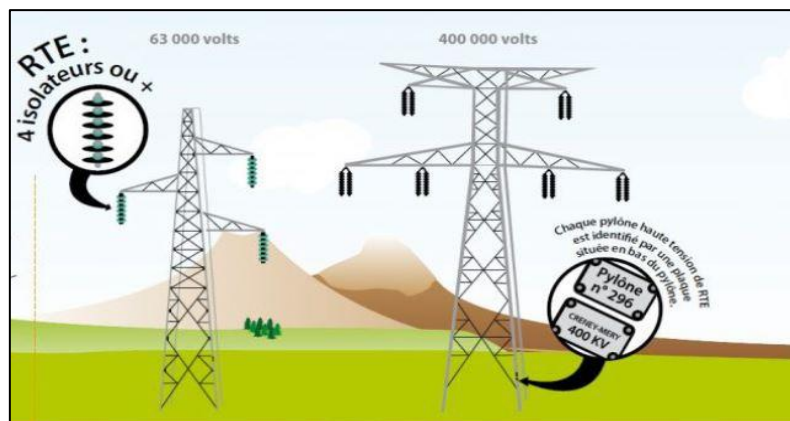


Figure. 16 : Nombre d'isolateurs dans deux lignes : 63kV e 400kV

C. **Les pylônes :**

Pour transporter l'électricité produite vers les utilisateurs, des supports sont nécessaires pour maintenir les conducteurs (câbles) à une distance minimale de sécurité du sol et des obstacles environnants. Ceci est crucial pour assurer la sécurité des personnes et des installations à proximité des lignes. Le choix des pylônes

dépend de plusieurs facteurs tels que les lignes à réaliser, l'environnement, les contraintes mécaniques liées au terrain et aux conditions climatiques de la zone.

a) Types des pylônes :

Le design des pylônes et des réseaux de pylônes intègre des questions de coûts (moindre quantité de matériaux et mise en œuvre et entretien facilités pour diminuer les coûts), des aspects techniques (solidité, moindre prise au vent...), mais aussi de sécurité (limitation des risques de fuite d'électricité et de brûlure électrique). Depuis la diffusion de courant à très haute tension sur de grandes distances, dans les années 1950, les pylônes sont devenus de plus en plus grands et ont nécessité des fondations plus profondes et solides.

1) Pylône en treillis :

C'est un pylône métallique, constitué par un assemblage de membrures et cornières (notamment utilisées comme contreventement) formant un treillis (ou de tubes). On distingue :

- **Pylône à triangles :**

Les pylônes possédant 3 triangles (1circuit triphasé) sont également appelés pylônes à armement triangle. Les pylônes possédant 6 triangles (2 circuits triphasés) sont également appelés pylônes à armement Drapeau.

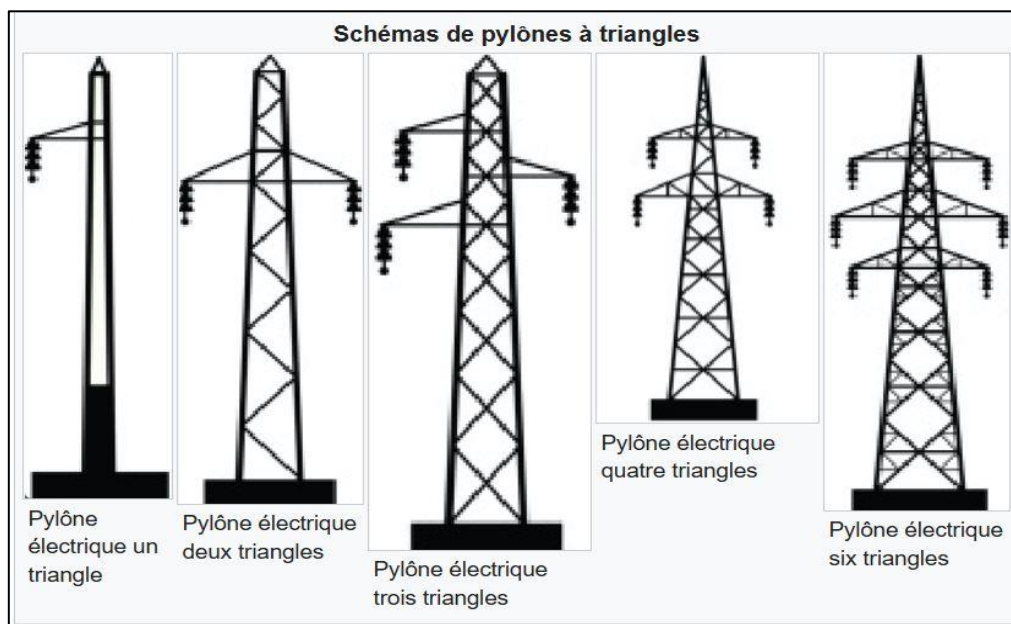


Figure. 17 : Schémas de pylônes à triangles

- **Pylône Nappe :**

Le pylône Nappe a la particularité d'avoir les conducteurs situés sur le même plan horizontal, dans le but de limiter la hauteur du pylône par rapport aux pylônes à triangles.

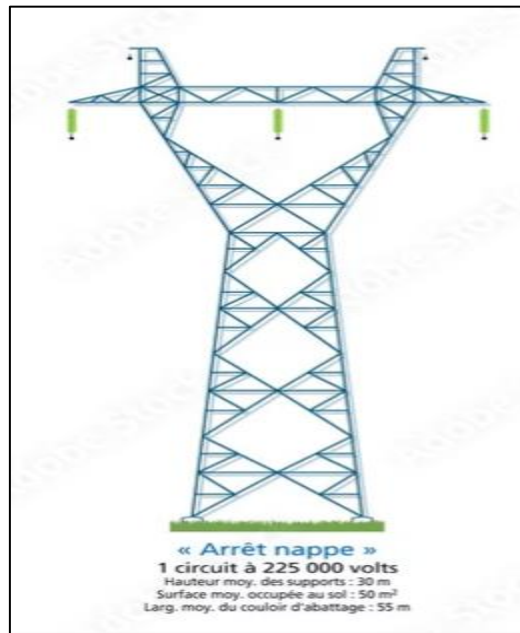


Figure 18 : Un pylône Nappe

- **Pylône Chat :**

Le pylône Chat a une hauteur moyenne de 35 mètres et un poids moyen de 6 tonnes en 225 kV.

L'objectif principal du pylône Chat par rapport au pylône Nappe est de surélever le câble du milieu pour des raisons électriques.

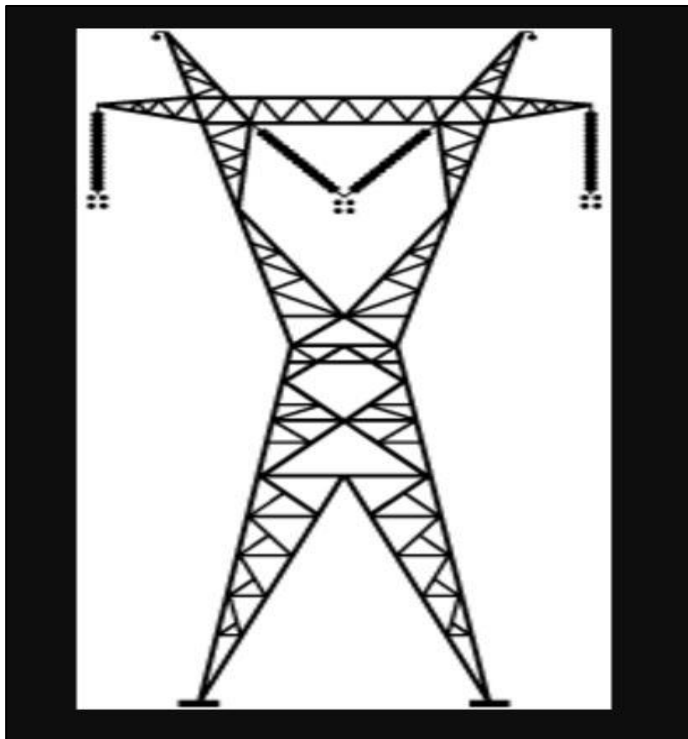


Figure. 19 : Un pylône Chat

- **Pylône F44 ou Beaubourg :**

Le pylône « Beaubourg » mesure 41 mètres et fait 20 tonnes en 225 kV.

Le pylône « Beaubourg » mesure 50 mètres et fait 45 tonnes en 400 kV.



Figure. 20 : Un pylône F44

- **Pylône Trianon :**

Le pylône Trianon mesure 25 mètres et fait 12 tonnes en 225 kV.

Le pylône Trianon mesure 35 mètres et fait 21 tonnes en 400 kV.

Le pylône Trianon, au design simple, a été conçu pour protéger les sites sensibles et mieux s'intégrer dans les paysages. Ces pylônes sont fréquemment utilisés près des aéroports et zones aéronautiques.

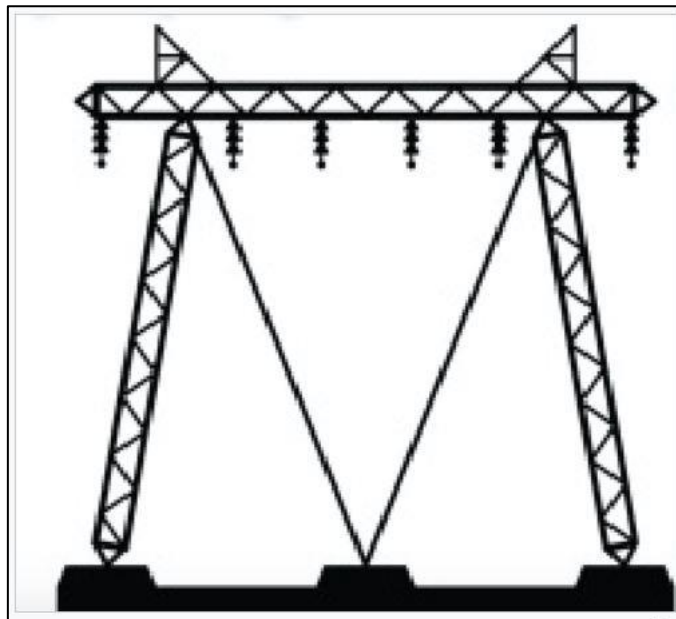


Figure. 21 : Un pylône Trianon

- **Pylône portique :**

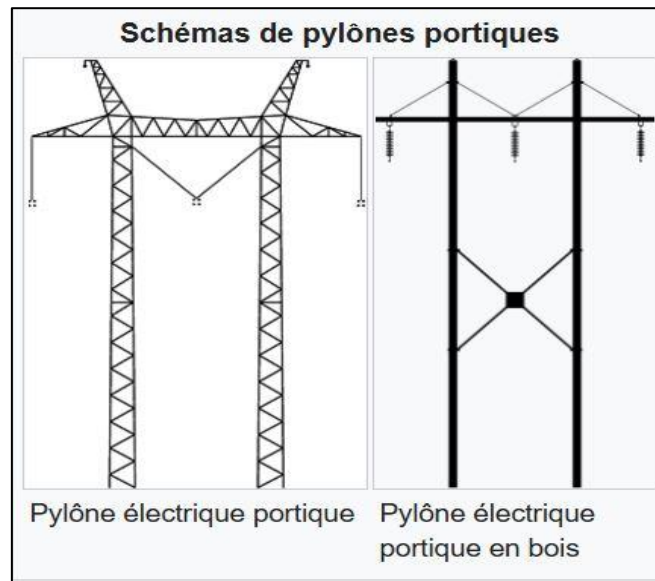


Figure. 22 : Pylônes portiques

2) **Pylône monopode :**

- **Pylône Muguet (tubulaire) :**

Le pylône Muguet mesure 42 mètres et fait 15 tonnes en 225 kV.

Le pylône Muguet mesure 54 mètres et fait 33 tonnes en 400 kV.

Il est moins massif que les autres pylônes et s'intègre plus facilement au milieu. On l'utilise de plus en plus dans les centres urbains.

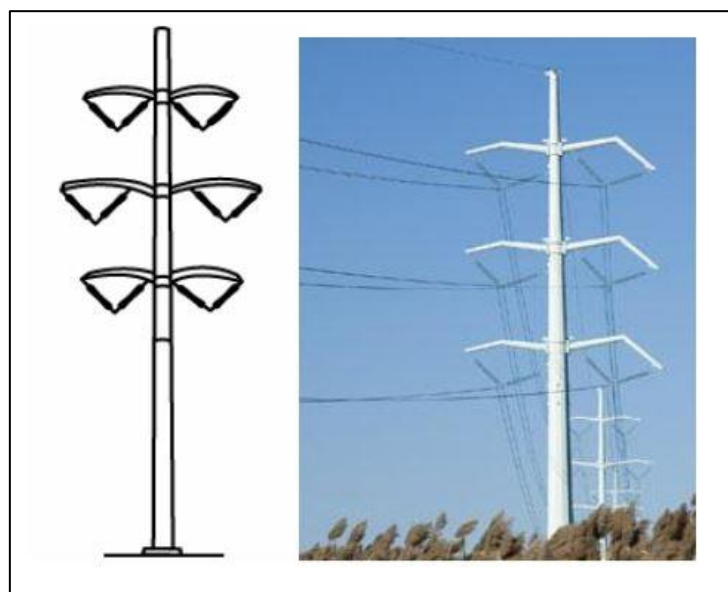


Figure. 23 : Pylône tubulaire

3) Pylône haubané :

- Pylône haubané en V :

Le pylône en V haubané est un pylône métallique en treillis. À la différence du pylône traditionnel, son fût forme un V fermé par la console. Il est fixé au sol par sa base et par quatre haubans en acier d'un diamètre de 12,7 mm tendus à un angle de 35°. Il a l'avantage d'être beaucoup plus léger que le pylône en treillis traditionnel — un pylône en V pèse 11,8 t plutôt que 21 pour celui en treillis — et permet d'allonger les portées à 460 m en moyenne.

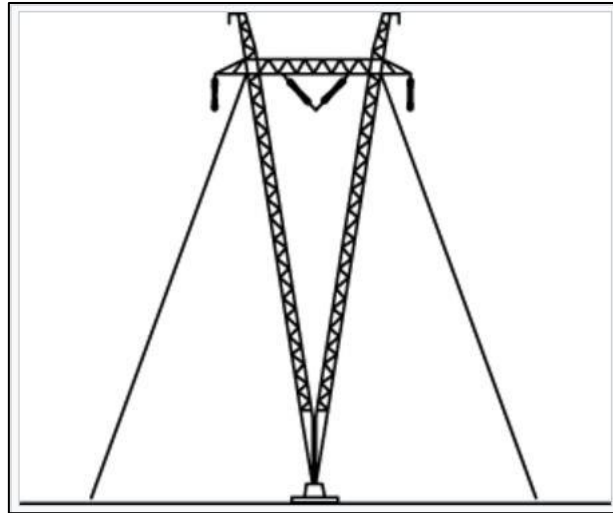


Figure 24 : Pylône en V haubané

- Pylône haubané à chaînette :

Il supporte des conducteurs à 735kV. Ce type de pylône nécessite moins d'acier galvanisé que le pylône haubané en V ; il est donc comparativement moins lourd et moins cher.

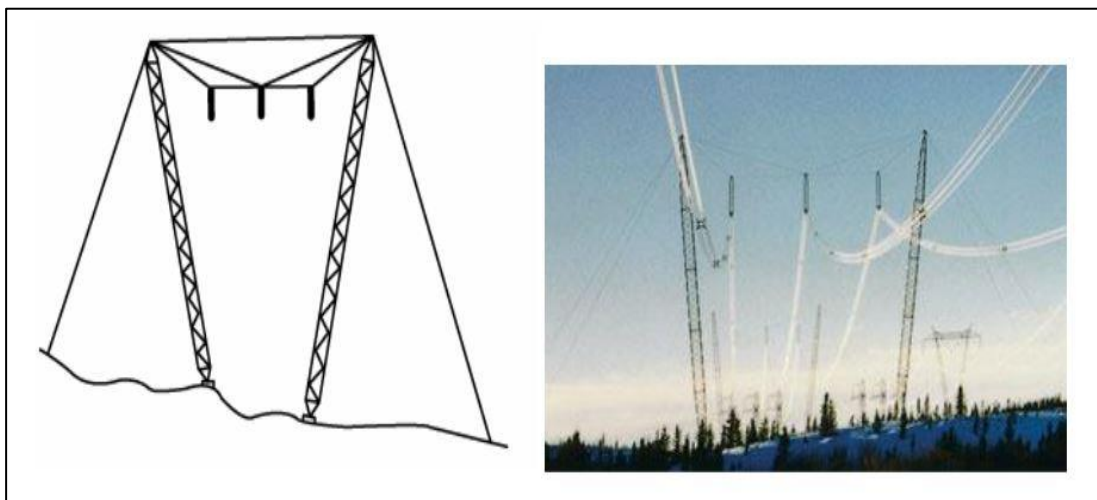


Figure 25 : Pylône à chaînette haubané

D. Les éclateurs :

Le moyen le plus simple de protéger un réseau est de placer des éclateurs selon le schéma ci-après :

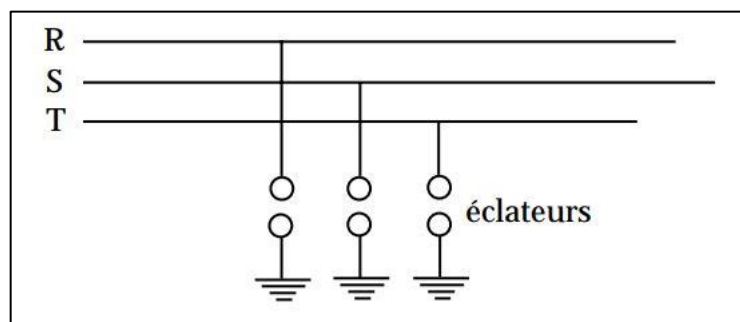


Figure. 26 : éclateurs entre les conducteurs et la terre

Un éclateur est un dispositif utilisé dans les systèmes électriques pour protéger les équipements contre les surtensions, comme celles causées par la foudre ou des anomalies dans le réseau.

Il est composé de deux électrodes conductrices, l'une reliée à l'élément à protéger (conducteur) et l'autre à la terre, séparées par un petit intervalle d'air, de gaz, ou d'un matériau isolant.

L'espacement entre les électrodes est précisément ajusté pour correspondre à la tension d'amorçage souhaitée.

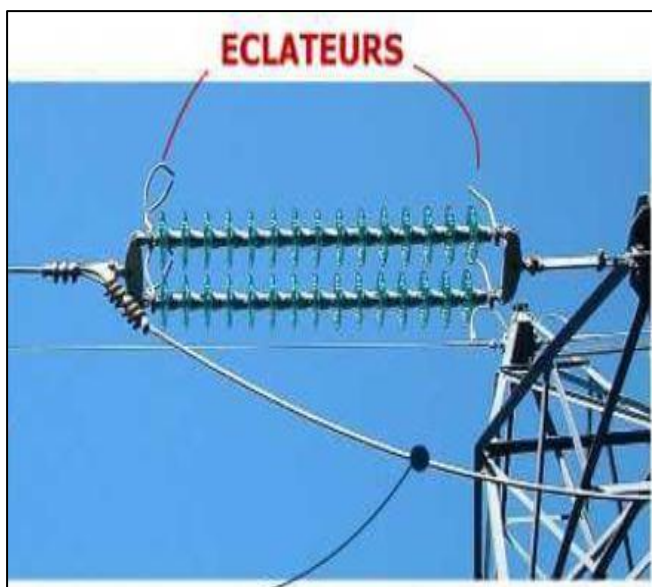


Figure. 27 : éclateurs entre le conducteur et la terre(pylône)

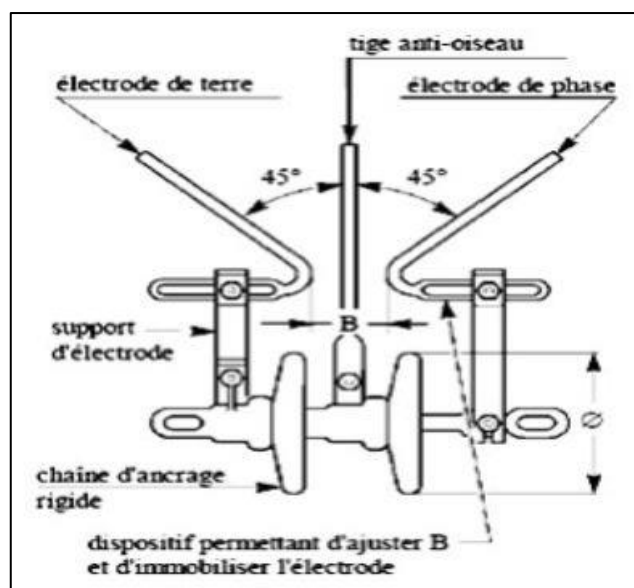


Figure. 28 : éclateur

Principe de fonctionnement :

- En conditions normales, la tension appliquée entre les électrodes est inférieure à la tension d'amorçage, donc aucune décharge ne se produit.
- Lorsqu'une surtension (comme un coup de foudre ou une montée subite de tension) survient, la tension dépasse le seuil critique.

- À ce moment, l'air ou le gaz entre les électrodes devient conducteur sous l'effet de l'ionisation, créant un arc électrique.
- Ce passage d'arc détourne la surtension vers la terre ou un autre chemin sécurisé, protégeant ainsi les équipements en aval.
- **Retour à l'état normal :**
- Une fois que la surtension a été évacuée, l'arc s'éteint naturellement lorsque la tension redescend sous le seuil.
- Le dispositif reprend alors son état isolant, prêt à réagir à une future surtension.

E. **Transformateurs avec régulateur en charge :**

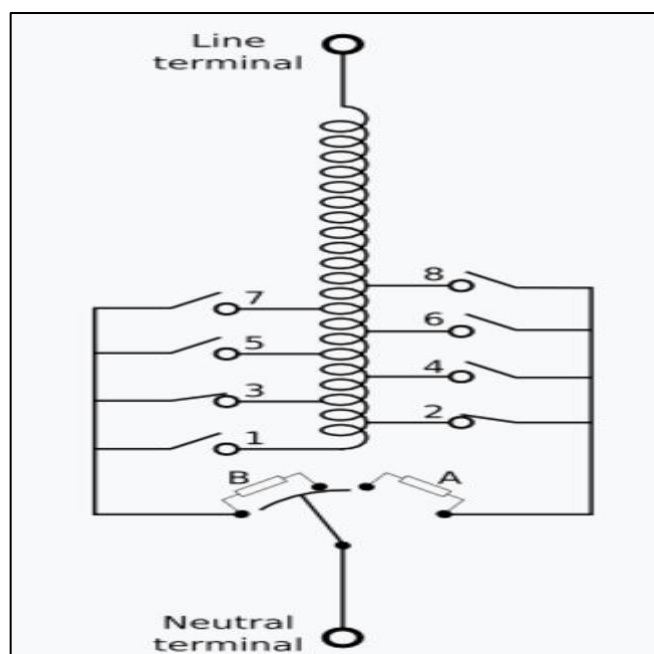


Figure. 29 : régulateur en charge

Les transformateurs /HTB HTA alimentent les départs HTA via des jeux de barres. Ces transformateurs sont équipés d'un régulateur en charge qui permet de modifier le rapport de transformation par pas de 1%, en diminuant ou augmentant le nombre de spires de l'enroulement primaire en fonction de l'évolution des charges et des fluctuations de la tension amont, et ce sans coupure de l'alimentation.

- **Principe de fonctionnement :**

1. **Adaptation de la tension :**

Le régulateur agit sur les transformateurs ou les bobines de réglage pour modifier le rapport de transformation ou la réactance. Cela permet d'ajuster la tension en fonction des variations de charge ou des conditions du réseau.

2. Commandes automatiques :

Les capteurs surveillent en permanence la tension, le courant et d'autres paramètres. En cas d'écart par rapport aux seuils prédéfinis (consignes), le régulateur effectue une correction automatique.

3. Réglage sous charge :

Il permet ces ajustements sans couper l'alimentation, évitant ainsi des interruptions de service.

Les régulateurs en charge sont essentiels pour maintenir la qualité de l'énergie, réduire les pertes électriques et éviter les **surtensions** ou **sous-tensions** sur les réseaux HT et THT.

II. Sources de Haute Tension

Le Courant Alternatif

Le courant continu (CC), promu par Thomas Edison à la fin du 19e siècle comme première utilisation de l'électricité dans les activités quotidiennes (éclairage, chauffage, transport), a progressivement cédé la place au courant alternatif (CA), après des expérimentations et des recherches.

Qu'est-ce qu'un courant alternatif ?

Le **courant alternatif (CA)** est un type de courant électrique où le mouvement des électrons dans un matériau conducteur change de direction de manière périodique. Contrairement au courant continu, où les électrons se déplacent dans une seule direction, le courant alternatif fait osciller les électrons d'un côté à l'autre du conducteur.

Le courant alternatif est généré par une **turbine et un alternateur** grâce à une **énergie primaire**, qui peut provenir de différentes sources :

- **Énergie mécanique** : provenant de sources renouvelables, telles que l'énergie éolienne (force du vent), l'énergie hydraulique (mouvement de l'eau), ou la biomasse (production de biogaz à partir de déchets organiques).
- **Énergie thermique** : issue de la combustion de combustibles fossiles (charbon, gaz naturel, pétrole) dans des centrales thermiques.
- **Énergie nucléaire** : générée à partir de la fission de l'atome dans des centrales nucléaires.

Le processus de production du courant alternatif reste similaire, quel que soit le type d'énergie primaire :

1. L'énergie primaire fait tourner une **turbine**, qui entraîne un **rotor** fixé à l'axe de l'alternateur.
2. Le rotor, composé d'électro-aimants, tourne, créant un mouvement sinusoïdal des électrons.
3. Cette rotation génère une interaction entre le rotor et le **stator** (composé de bobines de fils de cuivre).
4. Cette interaction produit un courant électrique alternatif.

5. L'électricité produite est généralement **consommée immédiatement**, car elle ne peut pas être stockée.

La vitesse de rotation du rotor détermine la **fréquence** du courant alternatif, exprimée en **Hertz (Hz)**, qui mesure le nombre d'alternances de la direction du courant par seconde.

En France, le courant alternatif est **périodique et sinusoïdal**, avec une fréquence de **50 Hz**, ce qui signifie que le courant change de direction 50 fois par seconde (soit 100 alternances par seconde, 50 dans un sens et 50 dans l'autre).

Objectifs d'étude :

1. Comprendre la différence entre une **tension continue** et une **tension alternative**.
2. Savoir comment **produire une tension alternative**.
3. Connaître les **caractéristiques** d'une tension alternative.
4. Apprendre à utiliser un **oscilloscope** pour mesurer l'amplitude et la période de la tension alternative.

Création d'une tension alternative

Pour créer une tension alternative, on a besoin des éléments suivants :

- **Une bobine de fils de cuivre dénudés.**
- **Un aimant** ou un **électroaimant**.
- Un dispositif capable de **faire tourner l'aimant**.

Lorsque l'aimant ou l'électroaimant tourne devant la bobine, il génère une variation du champ magnétique dans la bobine, ce qui déplace les électrons de manière périodique, créant ainsi une tension alternative. Plus l'aimant tourne vite, plus la variation de la tension est rapide, et plus l'aimant est éloigné, moins la variation de la tension est marquée.

Ce dispositif est appelé **alternateur**, et il permet de produire du courant alternatif en faisant tourner un aimant devant une bobine de fils de cuivre.

Différence entre tension continue et tension alternative

- **Tension continue (DC) :** Le courant circule dans une seule direction, avec une valeur constante. Exemple : une batterie.
- **Tension alternative (AC) :** La direction du courant change périodiquement, avec une amplitude variable. Exemple : le courant électrique fourni dans les foyers.

Caractéristiques d'une tension alternative

Amplitude et tension efficace

- **Amplitude ($U_{\max}$)** : C'est la valeur maximale de la tension, c'est-à-dire la distance entre l'axe des abscisses (l'axe horizontal) et l'un des sommets ou des minima de la courbe.

Exemple : Si la tension atteint 10 V à son maximum, l'amplitude est 10 V.

- **Tension efficace (U_{eff})** : C'est la valeur qui représente l'équivalent en courant continu nécessaire pour produire la même quantité de chaleur dans un appareil. Elle est généralement plus faible que l'amplitude.

La relation entre **$U_{\max}$** et **U_{eff}** est la suivante : $U_{\max} = \sqrt{2} U_{\text{eff}}$

Cela signifie que **$U_{\max}$** est environ 1,414 fois supérieur à **U_{eff}** .

Mesure de l'amplitude sur un oscilloscope

Pour mesurer l'amplitude avec un oscilloscope :

1. On compte le nombre de carreaux verticaux qui séparent l'axe des abscisses et un sommet (ou un minimum).
2. On multiplie ce nombre par la **sensibilité verticale** de l'oscilloscope (en volts par carreau).

Exemple : Si la sensibilité verticale est de **2 V/div**, et que la distance entre l'axe des abscisses et le sommet est de 3 carreaux, l'amplitude sera : $U_{\max}=3 \times 2=6 \text{ V}$

Période et fréquence

Période (T)

La période est la durée nécessaire à la tension alternative pour parcourir une oscillation complète. Elle est mesurée en secondes. On peut la déterminer sur un oscilloscope en comptant le nombre de carreaux horizontaux entre deux sommets (ou minimums) consécutifs, puis en multipliant par la **sensibilité horizontale** de l'oscilloscope (en secondes par carreau).

$$T = (\text{nombre de carreaux horizontaux}) \times (\text{sensibilité horizontale})$$

Exemple : Si la sensibilité horizontale est de **20 ms/div** (soit 0,02 s/div), et que la distance entre deux sommets est de 8 carreaux, la période sera : $T=8 \times 20\text{ms}=160\text{ms}=0,16\text{s}$.

Certains phénomènes (les saisons, les éclipses...) se reproduisent dans le temps. On dit qu'ils en sont périodiques.

Fréquence (F)

La fréquence est l'inverse de la période. Elle représente le nombre d'oscillations ou de cycles qui se produisent en une seconde. Elle est exprimée en **Hertz (Hz)** : $f = \frac{1}{T}$

La période doit être obligatoirement en seconde pour effectuer le calcul de f.

La Fréquence est le nombre de fois que le motif élémentaire apparaît pendant une seconde.

Ainsi si la tension alternative a une fréquence de 50 Hz, cela signifie que le motif élémentaire se répète 50 fois en une seconde.

Il existe de multiples du Hertz :

1KHz = 1000 Hz

1MHz = 1000000 Hz ;

1GHz = 1000000000 Hz ;

Exemple : Si la période est de **0,02 s**, la fréquence sera : $F=1/0,02=50$ Hz

Le Courant Alternatif

Le courant alternatif (comme la tension alternative) possède une **amplitude** (Imax), une **tension efficace** (Ieff), une **période**, et une **fréquence**.

Lorsque le courant est alternatif, les électrons se déplacent alternativement dans un sens puis dans l'autre, créant une oscillation de l'intensité du courant.

Sources de Haute Tension (HT)

Sur la figure 30 on remarque la taille du pylône, la chaîne d'isolateurs et les câbles destinés au transport de l'énergie électrique, le pylône est reconnaissable à ses entretoises en X, qui maintiennent écartés les quatre conducteurs de chaque phase ce qui, en raison de l'effet de peau, provoquant moins de pertes qu'un seul conducteur de même section.



Figure. 30 : ligne à haute tension

Exemple : Le réseau de transport au Canada compte 11 422 km de lignes à 735 et 765 kV, qui acheminent l'électricité des centrales hydroélectriques vers les centres de consommation.

Tout transfert d'énergie impose d'utiliser un système de liaisons associant une grandeur de flux et une grandeur d'effort. Pour le transfert d'énergie par l'électricité, la grandeur d'effort est la tension électrique et la grandeur de flux est l'intensité du courant. La plus grande partie de l'énergie perdue lors de ce transfert dépend de la grandeur de flux, responsable des pertes liées au déplacement. Le choix d'utiliser des lignes à haute tension s'impose dès qu'il s'agit de transporter de l'énergie électrique sur des distances supérieures à quelques kilomètres. Les objectifs de la haute tension sont :

- **Réduire les pertes :** Les pertes par effet Joule, dépendant de l'intensité du courant et de la résistance des conducteurs ($P = R \times I^2$), sont réduites en diminuant l'intensité grâce à une tension élevée.
- **Amélioration de la stabilité :** Une tension plus élevée assure une meilleure répartition de l'énergie entre les réseaux interconnectés.
- **Transport sur longue distance :** La haute tension permet d'acheminer l'énergie sur plusieurs centaines de kilomètres avec une efficacité accrue.

Les pertes en ligne sont principalement dues à l'effet Joule, qui dépend de trois paramètres : la résistance, de l'intensité du courant (selon la relation $P=RI^2$) mais aussi de la fréquence qui intervient dans l'effet de peau.

L'utilisation de la haute tension permet, à puissance transportée équivalente, de diminuer le courant et donc les pertes. Par ailleurs, pour diminuer la résistance, aux fréquences industrielles, il n'y a que deux facteurs :

- La résistivité des matériaux utilisés pour fabriquer les câbles de transport, et Le RE Algérien de transport elec est relie à 2 réseaux (Marocain et Tunisien) ... plusieurs lignes elec. Dont les plus récentes sont deux lignes de 400 KV (réseau THT).
- La production d'électricité est de 84750 Gwh avec 1 capacite ruse tallée de 25180 MV pour 1 longueur de transport elec de 33770 km
- Longue réseau de distustion 383014 km
- Nombre de clients d'électricité 11461720 (2020).
- La section de ces cables. A matériau de fabrication et section équivalents, les pertes sont donc égales, en principe, pour les lignes aériennes et pour les lignes souterraines.

Les lignes à haute tension font partie du domaine haute tension B qui comprend les valeurs supérieures à 50 KV en courant altératif.

L'expression « très haute tension » est parfois utilisée, mais n'a pas de définition officielle. Les tensions utilisées varient d'un pays à l'autre.

Schématiquement, dans un pays, on trouve des tensions de l'ordre de 63 à 90 kV pour la distribution urbaine ou régionale, de l'ordre de 110 à 220 kV pour les liaisons entre régions, et de l'ordre de 345 & 500 kV pour les principales interconnexions nationales et internationales. Dans certains pays, comme au Canada par exemple, on utilise aussi du 735 kV et même des tensions plus élevées comme en Chine (1 100 kV).

Mais ce type de tension ne se justifie que pour un transport sur une distance de l'ordre du millier de kilomètres, pour lequel un transport en courant continu peut être une solution intéressante.

Exemple de tensions de fonctionnement

Il est d'usage de classer les lignes électriques en fonction de leur tension de fonctionnement (prise entre deux de leurs trois conducteurs) :

- a. **Basse tension - moins de 1 000 volts**, utilisée pour la connexion vers un immeuble d'habitation ou de petits clients commerciaux et de l'utile.
- b. **Moyenne tension entre 1 000 volts (1 kV) et 33 kV**, est utilisée pour la distribution dans les zones urbaines et rurales.
- c. **Haute tension-entre 33 KV et 230 kV**, est utilisée pour le transport de grandes quantités d'énergie électrique.
- d. **Très haute tension-plus de 230 kV à 800 KV**, est utilisée pour de longues distances, de ses grands quantiles d'énergie électrique.
- e. **Ultra haute tension supérieure à 800 KV**. Suivant le tableau 04 représentant les différentes gammes de tension.

Principe Fondamental

Tout transfert d'énergie implique deux grandeurs :

- **Effort** : La tension électrique .
- **Flux** : L'intensité du courant .

En augmentant la tension, on réduit l'intensité pour une même puissance transportée, ce qui minimise les pertes par effet Joule.

Exemple :

- **Canada** : Le réseau de transport comprend 11 422 km de lignes fonctionnant à des tensions de 735 kV et 765 kV, reliant les centrales hydroélectriques aux centres de consommation.

- **Algérie (Sonelgaz) :**

- Longueur des lignes HT : 33 770 km.
- Production annuelle : 84 750 GWh.
- Nombre de clients (2020) : 11,46 millions.

Classification des tensions

Les réseaux électriques sont classés selon les tensions de fonctionnement :

Tableau 04 : Classification des tensions

Catégorie	Plage de tension	Applications
Basse tension (BT)	< 1 kV	Alimentation des habitations et commerces.
Moyenne tension (MT)	1 kV à 33 kV	Distribution urbaine et rurale.
Haute tension (HT)	33 kV à 230 kV	Transport interurbain et régional.
Très haute tension (THT)	230 kV à 800 kV	Transport longue distance.
Ultra haute tension (UHT)	> 800 kV	Transport intercontinental (Chine : 1 100 kV).

Remarque :

Les lignes à haute tension fonctionnent presque toutes en courant alternatif triphasé mais dans le cadre particulier de certaines traversées sous-marines ou de lignes entrées, transport se fait en courant continu haute tension (HVDC) pour des raisons d'économie d'encombrement et de fiabilité. A titre d'exemple :

La liaison tunnel entre France-Angleterre IFA 2000 est réalisée par deux paires de conducteurs dont la tension continue par rapport à la terre vaut respectivement +270 kV at-270 kV, soit une différence de potentiel entre les deux conducteurs de chaque paire égale à 540 KV.

Lignes souterraines

A ce jour, les lignes souterraines, plus couteuses à l'installation sont utilisées dans quelques cas particuliers : transport sous-marin, franchissement de sites protégés, alimentation de grandes villes, de métropoles ou autres zones à forte densité de population. Elles sont plus souvent en tasse et moyenne tension qu'en haute tension du fait des coûts prohibitifs.

Types de lignes HT

Lignes aériennes

- **Avantages** : Moins coûteuses, facile à maintenir.
- **Inconvénients** : Sensibles aux intempéries.

Lignes souterraines

- **Avantages** : Protégées des aléas climatiques, discrètes.
- **Inconvénients** : Coûts d'installation élevés.
- **Utilisation** : Zones urbaines, franchissement de sites sensibles.

Composants des lignes HT

1. Pylônes

Cette image montre un pylône qui supporte deux lignes 230/400 (420) Kv: soit trois paires de conducteurs et une paire de cibles de garde pour chaque ligne, avec chaines d'isolation à 19 éléments.



Figure. 31 : pylônes supportant deux lignes 230/400 KV

- **Rôle** : Supports mécaniques des conducteurs.
- **Structure** : Entretoises en X pour maintenir les conducteurs à distance.

2. Conducteurs

Le courant électrique est transporté dans des conducteurs, généralement sous forme triphasée avec au moins trois conducteurs par ligne. Pour une phase, on peut aussi trouver un faisceau de conducteurs de deux à quatre) à la place d'un simple conducteur afin de limiter les pertes d'augmenter la puissance pouvant transiter.

Les conducteurs en cuivre sont de moins en moins utilisés car ce matériau est de plus en plus cher et à conductibilités égales, deux fois plus lourd qu'un conducteur d'aluminium. On utilise en général des conducteurs en alliage d'aluminium, ou en combinaison aluminium acier pour les câbles plus anciens ce sont des conducteurs composés d'une âme centrale en acier sur laquelle sont tressés des brins d'aluminium. Les conducteurs sont nus, c'est-à-dire non revêtus d'un isolant.

La capacité de transport d'une ligne aérienne dépend du type de conducteur et des conditions météorologiques. Il faut éviter que la chaînette formée par le conducteur ne se rapproche trop du sol ou de la végétation à cause de la dilatation thermique provoquée par l'effet Joule.

Les conducteurs haute tension sont aériens ou souterrains (et parfois sous-marins). Les conducteurs aériens sont soumis à l'action des facteurs atmosphériques : température, vent, pluie, gel, etc.

Ces facteurs interviennent de façon importante dans le choix des paramètres d'une ligne haute tension : type de conducteur électrique (matériaux et géométrie), hauteur et distance des pylônes, tension mécanique maximum sur le conducteur afin de maintenir une garde au sol suffisante.

Le choix de ces paramètres a une grande influence sur les coûts de construction et d'entretien d'une ligne de transmission, ainsi que sur sa fiabilité et sur sa longévité. Toutes choses égales par leur position, des conducteurs influent sur l'intensité des dispositions du champ électromagnétique.

3. Isolateurs

La fixation et l'isolation entre les conducteurs et les pylônes est assurée par des isolateurs. Ils ont une résistance à la fois mécanique et électrique. Ceux-ci sont réalisés en verre, ou en céramique, ont en général la forme d'un empilement d'assiettes.

On utilise un matériau synthétique. Les socles en verre ou en céramique ont en généralisé la forme d'un cône. Il existe deux types : les isolateurs rigides (assiettes collées) et les éléments de chaîne (assiettes emboîtées).

Plus la tension de la ligne est élevée, plus le nombre d'axes est important. Les chaînes peuvent être simples (câbles légers en suspension), doubles droites (horizontales pour les câbles en amarrage et verticales pour les câbles lourds en suspension), doubles en V (câbles en suspension anti-balancement) voire triples (supportant plusieurs câbles).

L'isolateur est formé par un isolant auquel sont fixés deux pièces métalliques M^1 et M^2 .

- Isolant : Verre, céramique, matériaux synthétiques. Mi se fixe a pylône: Mr porte le conducteur. L'isolateur possède un double rôle
- Rôle mécanique : porte le conducteur
- Rôle électrique : isole le conducteur par rapport pylône

Les isolateurs sont des composants indispensables au transport et à la distribution de l'énergie électrique Leur fonction est de réaliser une liaison entre des conducteurs HT.

Ils maintiennent les conducteurs dans la position spécifiée (isolateurs d'alignement et d'ancrage).

Ils assurent la transition entre l'isolation interne (huile, SF6) et l'isolation externe (air atmosphérique), ils permettent de raccorder les matériels électriques (traversées de transformateur, extrémités de câbles) et ils constituent, également, l'enveloppe de certains appareils (disjoncteurs, parafoudres, réducteurs de mesure).

4. Câbles de garde

Les câbles de garde ne transportent pas le courant. Ils sont situés au-dessus des conducteurs Ils jouent un rôle de paratonnerre au-dessus de la ligne, en attirant la foudre pour éviter une éventuelle surtension au niveau des conducteurs. Ils sont en général réalisés en alu-mec-acier. Au centre du câble de garde on place parfois un câble en fibre optique qui sert à la communication de l'exploitant, on parle alors de OPGW. Si on décide d'installer la fibre optique sur un câble de garde déjà existant, on utilise alors un robot qui viendra enrouler en spirale la fibre optique autour du câble de garde.

5. Signalisation

Afin d'éviter les impacts d'aéronefs, les lignes sont signalées par des balises diurnes (boules) ou nocturnes (dispositifs lumineux, Balisor), aux abords des aéroports et aérodromes la partie supérieure du fût du pylône est peinte en rouge et blanc. D'autres dispositifs sont utilisés pour la protection avifaune dans les zones sensibles (couloirs de migration en particulier), comme des spirales de couleurs qui outre l'aspect visuel sifflent sous l'effet du vent ou encore des silhouettes de rapaces placés en tête de pylône qui provoquent par réflexe une élévation du vol pour échapper au supposé prédateur. En France, le choix des techniques et des zones de pose est réalisé de concert avec les organismes de protections des oiseaux et RTE ou EDF.

Modélisation électrique

Une ligne électrique parfaite peut être considérée comme un fil d'impédance nulle. Dans la pratique plusieurs phénomènes physiques entrent en jeu pertes d'énergie par effet Joule, réponse fréquentielle, courants de fuite. Une étude à l'aide d'un modèle théorique simplifié permet de comprendre l'effet de divers paramètres sur le comportement de la ligne.

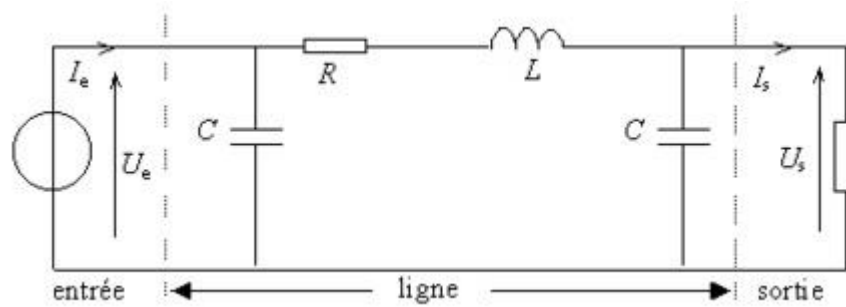


Figure. 32 : schéma d'une ligne électrique de type Pi

Le schéma ci-dessus, appelé modèle en P, permet de modéliser correctement des ligne longueur allant de 80 à 240 km. En dessous, les effets capacités peuvent être négligés pour une ligne aérienne. Au-delà les phénomènes de propagation doivent être pris en compte alors assimiler la ligne à une succession de cellules élémentaires de type Pi. Le modèle alors similaire à celui d'une ligne de transmission.

Une ligne aérienne est principalement inductive. Elle consomme donc de la puissance réactive, cela provoque une chute de tension". Cette inductance fait également croître l'angle de transport, qui influe sur la stabilité des réseaux électriques et la puissance active transportée par la ligne. Lorsque cette inductance devient trop importante, à cause de la longueur de la ligne, il est nécessaire d'utiliser de la compensation électrique

La résistance des conducteurs provoque des pertes par effet Joule, L'usage de faisceaux de conducteurs, eux-mêmes faits d'aluminium, un matériau léger, très bon conducteur électrique.

Et d'acier permet de limiter cette résistance. Celle-ci décroît avec la section des conducteurs. En pratique la section est d'environ 500 mm². L'effet de peau rend l'usage de sections plus importantes peu avantageux. Il est plus intéressant d'augmenter le nombre de conducteurs par faisceau.

La capacité de la ligne électrique avec la terre est relativement faible pour une ligne aérienne par contre pour les câbles souterrains, ce paramètre est dominant. Un câble souterrain produit de la puissance réactive contrairement à une ligne aérienne. Il faut la compenser régulièrement sous peine de ne transporter qu'un courant réactif. Concrètement, le câble se charge et se décharge au rythme de la fréquence du réseau. Ceci explique qu'enterrement des lignes à haute tension pose problème sur de longues distances.

Par ailleurs, une résistance doit être représentée en parallèle aux capacités. Elle est due à l'effet corona et aux fuites de courant (causées par la pollution sur les isolateurs par exemple).

Pertes de puissance

Malgré l'effort entrepris pour limiter la résistance, le transport de électricité engendre des pertes d'énergie importantes, principalement par effet Joule. A titre d'exemple pour le réseau de transport d'électricité ces pertes sont estimées en moyenne à 2,5% de la consommation globale, soit 11,5 TWh par an

Pour ne pas subir de pertes importantes, on utilise donc deux techniques :

- Augmenter le nombre de conducteurs certaines lignes comportent pour chacune d phases jusqu'à quatre câblés distants de quelques centimètres
- Diminuer l'intensité du courant en élevant la tension pour une puissance transportée identique, si on augmente la tension, intensité du courant électrique diminue pertes dues au passage du courant dans le fil seront réduites selon le carré de l'intensité.
- Augmenter la cos-phi (col)

Ou Atténuer les phases.

Toutefois, la tension servie aux particuliers doit rester inchangée (230 V en Europe ou 120 V en Amérique du Nord pour les installations domestiques) et dans le domaine de la basse tension afin de limiter les risques pour les utilisateurs. Il faut donc l'abaisser au plus près de ceux-ci. Comme on ne sait pas le faire de façon simple avec le courant continu (HVDC), on a recours au courant alternatif (de fréquence 50 Hz) et des transformateurs.

Il faut également prendre en compte le risque d'arc électrique entre deux conducteurs. Ce risque est d'autant plus important que la tension est élevée. Cela impose des contraintes d'isolement plus fortes et nécessite notamment :

- Pour les lignes aériennes, d'écarter suffisamment les conducteurs, (typiquement 1 cm/kV), ce qui a pour conséquence d'augmenter proportionnellement la dimension des matériels associés (isolateur, pylônes...)
- Pour les câblés (enterrés ou non) d'augmenter les épaisseurs d'isolants, d'ajouter des écrans de masse, voire de recourir à des technologies différentes (par exemple câblés à isolation gazeuse)

Intensité du courant

L'intensité maximale du courant transportable dans une ligne est liée à la résistance de ses conducteurs et donc leur section et à la résistivité des matériaux les constituant.

Un courant circulant dans un conducteur va créer des pertes, et donc une élévation de température.

Un équilibre thermique va s'établir entre les pertes dans le conducteur, et l'énergie transmise par le conducteur à son milieu ambiant (l'air) par convection et rayonnement.

Les gestionnaires du réseau devront limiter courant et donc la température du conducteur à un niveau acceptable : la déformation due à la chaleur doit respecter la limite d'élasticité des câblés et flèches de ligne (son point bas par rapport au sol) doit rester suffisamment élevée du sol pour ne pas mettre en danger les biens et personnes à proximité.

La température limite admissible d'un conducteur aluminium est de l'ordre de 100 °C. À partir de là, le concepteur de la ligne définira en fonction de la température ambiante est suffisamment inférieure à la valeur maximale prise pour dimensionnement.

Cependant le choix des sections de lignes doit se faire en fonction des courants maximaux transportés, mais aussi en fonction de critères technicoéconomiques.

Le choix d'une section plus importante entraînera une dépense plus importante, mais permettra de réduire les pertes.

On peut même envisager de réaliser deux lignes transportant la moitié du courant, car les pertes de chaque ligne sont divisées par 4 - donc le total des pertes est divisé par 2.

L'économie réalisée permet d'amortir la réalisation de la deuxième ligne. De plus, on conserve la possibilité de doubler l'installation en cas de besoin opérations de maintenance pannes sur l'autre ligne.....

La densité du courant dans les lignes aériennes haute tension est d'environ 0,7-0,8 A/mm².

Gestion des pertes

Sources de pertes

1. **Effet Joule** : Proportionnel au carré du courant
2. **Effet corona** : Ionisation de l'air autour des conducteurs.
3. **Pertes réactives** : Consommation d'énergie réactive par les lignes inductives.

Solutions

- **Augmenter la tension** : Diminution de l'intensité pour une puissance constante.
- **Multiplier les conducteurs** : Faisceaux pour réduire la résistance.
- **Compensation réactive** : Ajout de condensateurs pour contrôler les variations de tension.

Courant continu VS courant alternatif : pour quelles utilisations ?

Le courant continu et le courant alternatif présentent des caractéristiques distinctes qui leur donnent des utilisations singulières :

Le courant électrique continu : est réservé aujourd'hui à des utilisations moins universelles des débuts. Il est utilisé pour le transport de l'électricité sur les lignes à très haute tension (entre 225000 et 400000 v) sur de longues distances, ou lors du transport de l'électricité via les câblages sous-marins. Pour autant, le courant continu n'est pas totalement exclu de nos vies quotidiennes, puisqu'on le retrouve dans la majorité des appareils électriques alimentés sous batterie tels que les lampes électriques, les téléphones et ordinateurs portables, ainsi que les voitures électriques qui sont alimentées via différentes batteries. De plus, le développement des énergies renouvelables permet une production utile et pratique de courant continu : l'énergie solaire permet de produire de l'énergie photovoltaïque sous forme de courant continu. Ce courant continu est ensuite transformé en courant alternatif, via un onduleur, pour être injecté sur le réseau de distribution de l'électricité ;

Le courant électrique alternatif est beaucoup plus « manipulable » que le courant continu, sa tension ainsi que son intensité peuvent être abaissées via des transformateurs électriques, sans trop de pertes d'énergie (exprimée en Joules) ; Ce qui fait de lui le courant électrique privilégié dans le transport et la distribution de l'électricité via les lignes à haute tension, et les lignes en basse tension (230V à 400 V). Le courant alternatif est, de manière générale, le type de courant électrique adapté pour nos usages domestiques puisqu'il est utilisé couramment pour le chauffage, l'éclairage, la cuisson et tout type d'utilisation d'appareils électriques.

Courant alternatif : monophasé ou triphasé ?

Maintenant que nous avons fait la distinction entre le courant continu et le courant alternatif ; intéressons-nous de plus près au courant alternatif puisqu'il est le type de courant électrique utilisé en majorité dans nos habitations.

Principes de phases et de neutre

Le courant alternatif circule dans votre logement, via deux modes d'alimentation le courant monophasé et le courant triphasé ces deux courants alternatifs sont définis par le principe de phase et de neutre, contrairement au courant continu qui est déterminé par les bornes positives et les bornes négatives.

Mais qu'appelle-t-on phase et neutre exactement ?

- **La phase** est le câble électrique à véhiculer l'électricité vers le point de consommation ; Il permet d'apporter la tension nécessaire au fonctionnement d'un appareil électrique.
- **Le neutre** est le câble électrique qui permet sa bonne répartition. Comme son nom le laisse envisager, sa tension est nulle. Le neutre sert principalement à faire repartir le courant alternatif vers le circuit électrique et le réseau général.

III. Métrologie en Haute Tension

a) Voltmètre électrostatique :

Le voltmètre électrostatique fonctionne selon le principe de la force d'attraction électrique entre deux charges. Un disque mobile **M**, relié au potentiel à mesurer, est situé au centre d'un anneau de garde **G**, qui est conçu pour assurer l'uniformité du champ électrique entre les électrodes. Ce disque mobile **M** est attiré par un disque fixe **F**, et la force d'attraction **F_e** est d'autant plus grande que la tension à mesurer est élevée.

Le dispositif comprend également une aiguille d'indication et un contrepoids **P** permettant de régler le calibre de mesure. La distance entre les électrodes **F** et **M** joue un rôle crucial dans le réglage de la précision de l'appareil.

Calcul de la force électrostatique :

L'énergie électrostatique accumulée dans un condensateur est donnée par la formule :

$$W = \frac{1}{2} CU^2$$

où C est la capacité du condensateur et U est la tension appliquée. La capacité C est exprimée par :

$$C = \varepsilon \frac{S}{d}$$

où :

- C est la capacité du condensateur (en farads, F),
- ε est la permittivité absolue du matériau diélectrique ($\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0$),
- ε_r est la permittivité relative du diélectrique (sans unité),
- ε_0 est la permittivité du vide ($\varepsilon_0 \approx 8.854 \times 10^{-12}$ F/m),
- S est l'aire des plaques du condensateur (en mètres carrés, m²),
- d est la distance entre les plaques (en mètres, m).

Ainsi, la capacité du condensateur augmente avec la permittivité du matériau diélectrique et la surface des plaques, et diminue lorsque la distance entre les plaques augmente.

Les gammes de mesure de l'appareil sont ajustées en modifiant la distance **d** entre les électrodes. En augmentant la distance, la précision augmente, mais l'appareil devient plus volumineux.

a. Mesure par éclateurs :

Un éclateur est constitué de deux électrodes sphériques identiques. L'une est reliée à la terre et l'autre au potentiel à mesurer.

Principe de fonctionnement :

Le claquage se produit lorsque la tension entre les électrodes dépasse la tension de claquage, et cette tension est fonction de la distance inter-électrodes. Un abaque est utilisé pour établir la relation entre la distance critique d_c et la tension de claquage U_c : $U_c = f(d_c)$. Cela permet de déterminer la tension à mesurer en fonction de la distance à laquelle se produit le claquage.

Exemple :

Si l'éclateur claque pour une distance critique de $d_c = 9\text{cm}$, l'abaque peut indiquer que la tension appliquée est 200kV. Si la distance critique est $d_c = 50\text{ cm}$, l'abaque peut indiquer que la tension est 1000kV.

L'éclateur est utilisé pour mesurer des tensions continues, alternatives et de choc. La précision de la mesure dépend de l'uniformité du champ entre les sphères. Pour améliorer cette uniformité, des électrodes plus plates et moins arrondies peuvent être utilisées.

Remarque : L'éclateur est souvent utilisé comme référence pour étalonner d'autres instruments de mesure en haute tension.

b. Mesure Galvanométrique :

La mesure de la tension en haute tension peut être réalisée à l'aide d'un galvanomètre, qui dérive un faible courant I à travers une grande résistance R (généralement $R \geq 1\text{ M}\Omega$). La tension mesurée est alors calculée par la relation : $U = R \cdot I$

La grande valeur de R permet de minimiser l'effet joule et l'échauffement, ce qui est crucial pour les faibles courants utilisés. Cependant, cette méthode peut être influencée par des courants parasites, tels que les courants de fuite ou les effets de couronne. La précision de cette méthode dépend de la stabilité de la résistance, qui peut varier avec la température, l'humidité, et l'usure au fil du temps.

IV. Diviseurs de Tension :

Il existe deux types de diviseurs de tension utilisés pour mesurer des tensions élevées :

1. Diviseur Résistif :

Un diviseur résistif est constitué de deux résistances R_1 et R_2 en série. La tension à mesurer est appliquée à ce diviseur, et la tension mesurée est donnée par :

$$U_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U \text{ et } U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U$$

Cette méthode est utilisée pour mesurer des tensions continues et alternatives.

2. Diviseur Capacitif :

Dans le cas des tensions alternatives, un diviseur capacitif est utilisé pour minimiser les pertes d'énergie. Il est composé de deux condensateurs, C_1 à haute tension et C_2 à basse tension, avec C_1 ayant une capacité beaucoup plus faible que C_2 . Cette configuration est particulièrement utile pour des mesures de haute tension alternative.

c. Transformateur de Mesure :

Les transformateurs de mesure sont utilisés pour réduire une tension élevée à une valeur plus facile à mesurer. Le transformateur est généralement de petite puissance et permet de mesurer la tension en utilisant le rapport de transformation. Par exemple, si le transformateur a un rapport de transformation de 100:1, la tension mesurée au secondaire sera 1/100ème de la tension primaire.

Ces transformateurs sont principalement utilisés pour mesurer les tensions des réseaux de puissance, mais sont rarement utilisés en laboratoire pour des mesures de haute précision.

d. Oscilloscope à Mémoire :

Bien que les oscilloscopes ne soient pas spécifiquement conçus pour mesurer des tensions élevées, ils peuvent enregistrer des phénomènes transitoires très rapides, comme les ondes de choc. Ils sont utilisés pour visualiser les variations de tension au cours d'événements brusques, tels que le claquage ou les court-circuits.

L'oscilloscope à mémoire peut afficher la forme d'onde de la tension, mais il donne principalement la valeur de la crête de la tension. Dans le cas des ondes de choc, on utilise des oscilloscopes spéciaux appelés **oscilloscopes de choc** qui sont capables de capter des phénomènes de l'ordre de la microseconde (μs).

I. Résumé des Techniques de Mesure :

Tableau 05 : Résumé des Techniques de Mesure

Tension Continue	Tension Alternative	Tension de Choc
Voltmètre électrostatique	Voltmètre électrostatique	Mesure par éclateur
Mesure par éclateur	Mesure par éclateur	Diviseur capacitif avec adaptation
Diviseur résistif	Mesure galvanométrique (avec capacité)	Diviseur résistif avec adaptation
Mesure galvanométrique (avec résistance)	Diviseur capacitif	
	Transformateur de tension	

VIII. Production de Haute Tension :

La haute tension peut être produite à partir de transformateurs haute tension montés en cascade. Si le transformateur ne délivre pas la tension souhaitée, des condensateurs peuvent être ajoutés en parallèle pour augmenter la tension.

Surtensions de Manœuvre : Les surtensions de manœuvre sont des transitoires rapides qui se produisent lors de modifications de la topologie du réseau, comme l'ouverture ou la fermeture d'une liaison ou un court-circuit. Elles peuvent être classées en manœuvres volontaires (enclenchement ou déclenchement d'un élément du réseau) et manœuvres involontaires (par exemple, rupture d'un conducteur).

IX. Tension Impulsionnelle :

Les tensions impulsionnelles sont des phénomènes transitoires de très courte durée. Elles peuvent être mesurées en utilisant des générateurs de tension impulsionnelle et des éclateurs. Les caractéristiques de ces impulsions peuvent être représentées sous forme de courbes $V(t)$, avec V_{max} correspondant à la tension maximale atteinte.

IV. Décharges électriques

- a) **Définition** : la décharge électrique est un canal conducteur qui a lieu sous certaines conditions entre 2 électrodes métalliques planes et parallèles dans 1 milieu isolant (diélectrique).

À cet effet beaucoup de recherches scientifiques seront multipliées dans ce domaine dont on cite en particulier les travaux de recherche au labo menées par l'auteur "Townsend" qui a procédé comme suit.

b) Expérience de Townsend

Considérons 1 diélectrique gazeux contenu entre 2 électrodes, il peut exister dans ce gaz en l'absence de tout champ un certain nombre de particules chargées produites.

- Soit par des mécanismes naturels ou U.V ou radioactivité.
- Soit artificiellement par bombardement de la surface cathodique avec 1 source de rayonnement U.V pour produire des e^- quel que soit l'origine de ces charges
- Si l'on applique à l'espace inter-électrodes une tension V donc 1 champ E , leur existence entraîne la création dans le circuit extérieur un courant de très faible intensité qui croît avec la tension.

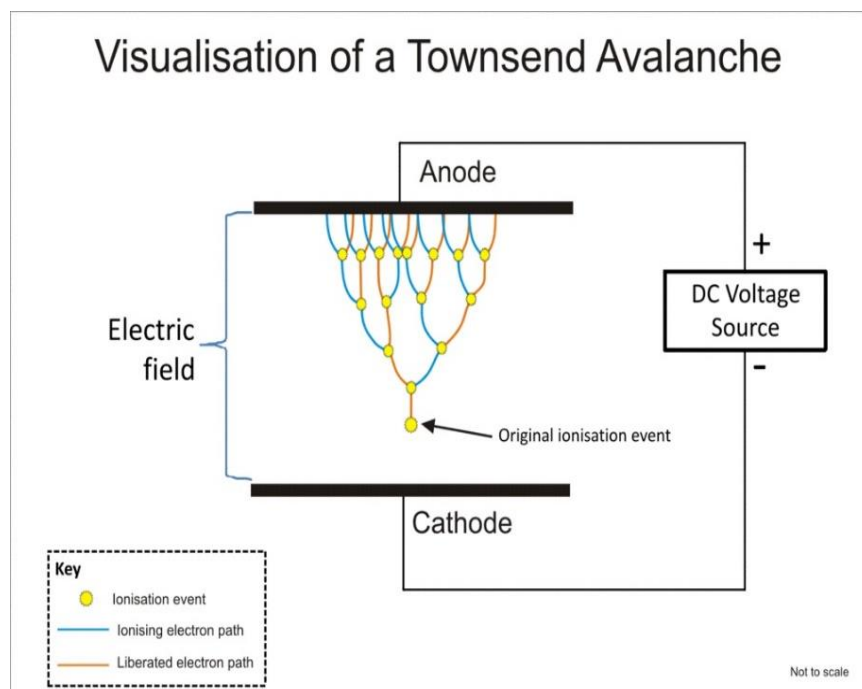


Figure. 33 : Montage de l'expérience de Townsend

L'expérience montée avec 2 électrodes plans et parallèles dans 1 gaz halogène à basse pression (placée des 1 enceinte)

On obtient la courbe caractéristique suivante :

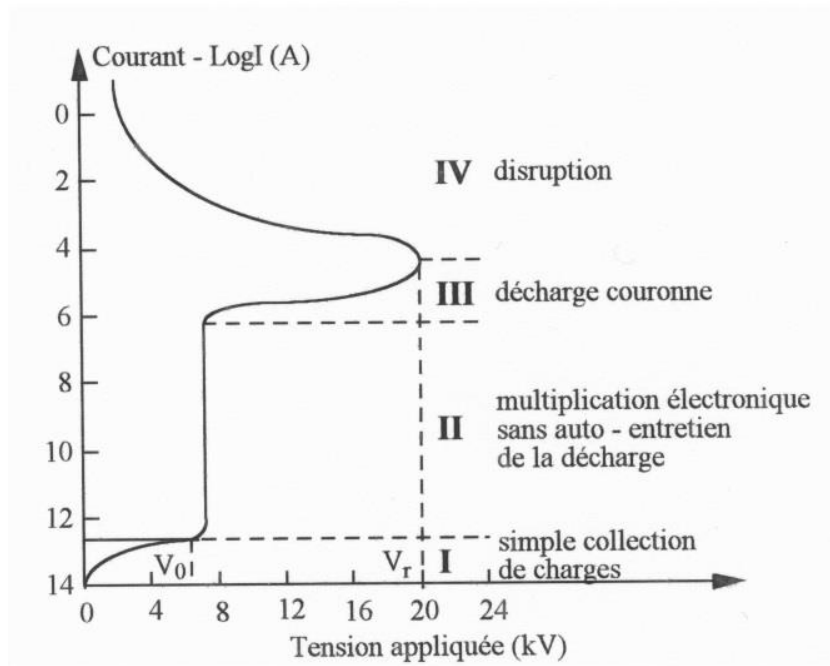


Figure. 34 : Courbe caractéristique $I : f(v)$

Cette figure représente la relation entre le courant (exprimé en logarithme) et la tension appliquée dans un système soumis à un champ électrique élevé. Elle décrit les différents régimes de conduction électrique dans un gaz en fonction de la tension appliquée.

1. Région I : Simple collection de charges

- Pour des tensions inférieures à V_{01} , le courant observé est uniquement dû à la collecte de charges libres préexistantes dans le milieu.
- Ce courant est faible et ne présente aucune amplification.

2. Région II : Multiplication électronique sans auto-entretien

- Lorsque la tension dépasse V_{01} , les électrons libres commencent à acquérir suffisamment d'énergie pour ioniser les molécules de gaz environnantes.
- Il y a un phénomène de multiplication électronique, mais la décharge ne s'auto-entretient pas encore.

3. Région III : Décharge couronne

- À partir de V_r , la multiplication des charges devient suffisante pour entretenir la décharge de manière autonome.
- Il s'agit d'un phénomène de décharge couronne, caractérisé par une émission lumineuse visible et un bruit crépitant.

4. Région IV : Disruption (claquage diélectrique)

- Lorsque la tension atteint un niveau critique, le champ électrique devient suffisamment intense pour provoquer l'ionisation complète du milieu.
- Cela entraîne une augmentation soudaine du courant, correspondant à un claquage ou une disruption, qui peut causer des dommages aux isolants.

Ce graphique illustre la transition progressive d'un état isolant vers un état conducteur dans un gaz soumis à une haute tension. Il met en évidence l'importance des phénomènes de décharges partielles (couronne) et des risques liés au claquage électrique.

c) Types de recharges électriques

2- Types de décharges électriques

On suppose que l'intervalle de décharge est soumis à l'action d'une force extérieure ionisante, telle que les rayonnements UV ou X, qui tombent sur la cathode et provoquent l'éjection d'électrons. Cela rend le gaz légèrement conducteur et un courant apparaît dans le circuit externe.

a. Décharge non autonome

Si l'on cesse de bombarder la cathode avec la force extérieure, on observe que le processus de décharge entre la cathode (C) et l'anode (A) s'arrête immédiatement. Ce type de décharge est dit non autonome, car il dépend entièrement de la source d'ionisation externe pour se maintenir.

b. Décharge autonome

Lorsque l'ionisation atteint un certain seuil grâce à l'application de la force extérieure sur la cathode, on remarque que même si l'on cesse cette action, le processus de décharge persiste. Cela signifie que la décharge s'auto-entretient en l'absence de la force extérieure. Ce type de décharge est qualifié d'autonome.

3- Phénomène d'ionisation secondaire

En plus de l'ionisation primaire, il existe un mécanisme de création d'électrons supplémentaires appelé émission secondaire. Ce phénomène se produit lorsque la cathode est bombardée par des ions positifs (+).

Si un ion positif en déplacement vers la cathode acquiert une énergie suffisante, il peut arracher plusieurs électrons de la surface de la cathode. Ce processus est caractérisé par un taux d'émission secondaire, qui indique combien d'électrons peuvent être extraits par un seul ion incident.

Remarque : L'expérience de Townsend a mis en évidence l'existence simultanée de deux types d'ionisation :

- Ionisation de surface : qui se produit lorsque les particules chargées interagissent avec la cathode.
- Ionisation en volume : qui a lieu dans tout le volume du gaz.

Ces deux mécanismes conduisent au phénomène d'amorçage, qui permet à la décharge de devenir autonome et de se maintenir sans source extérieure d'ionisation.

4- Types de pertes diélectriques

1. Dans les gaz

Les gaz présentent une faible conductivité électrique et donc des pertes diélectriques insignifiantes dans des conditions normales. Cependant, en présence d'inclusions gazeuses dans un isolant, des phénomènes d'ionisation peuvent apparaître :

- **Ionisation** : Sous haute tension, les gaz peuvent se polariser et provoquer des pertes significatives.
- **Traitement** : Les isolants contenant des gaz doivent subir un séchage sous vide suivi d'un remplissage par un composé sous pression pour éliminer les pores.

Exemple : Un isolant mal séché peut avoir des bulles de gaz qui augmentent les pertes et dégradent sa durée de vie.

2. Dans les solides

Les diélectriques solides varient en fonction de leur composition et structure :

- **Matériaux avec pertes faibles** : Soufre, paraffine, et polystyrène sont des exemples de solides utilisés pour des applications haute fréquence.
- **Matériaux avec pertes significatives** : Le quartz et le mica ont une conductivité traversante due à des impuretés semi-conductrices.

Effets de la fréquence et de la température

- **Fréquence** : Les pertes dépendent peu de la fréquence mais diminuent légèrement avec des fréquences élevées.
- **Température** : Les pertes suivent une loi exponentielle avec la température.

Exemple : La céramique, très sensible aux conditions environnementales, est utilisée dans des environnements contrôlés pour minimiser les pertes.

3. Dans les liquides

Les pertes dans les liquides sont étroitement liées à leur composition chimique :

- **Liquides purs** : Comme l'huile minérale raffinée, ils ont des pertes proches de zéro.
- **Liquides polaires ou impurs** : Les pertes augmentent en présence d'impuretés ou de polarisation dipolaire.

Effet de la viscosité et de la température

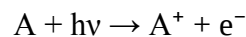
- **Viscosité** : Une viscosité élevée entraîne des pertes accrues.
- **Température** : Les pertes augmentent avec la température jusqu'à une valeur maximale, puis diminuent temporairement avant de croître à nouveau.

Exemple : Les huiles isolantes dans les transformateurs doivent être purifiées pour éviter une dégradation des performances due aux pertes.

Régime du Streamer

Le phénomène de streamer se produit sous de fortes pressions atmosphériques dans un gaz. Au lieu d'être directement ionisé par un électron, un atome excité se désexcite en émettant un photon. Ce photon peut ensuite ioniser un autre atome par photoionisation, générant ainsi un nouvel électron.

Réaction chimique :



où $h\nu$ est le photon émis.

Ce processus génère une cascade d'électrons qui propagée dans le gaz.

1. Conditions nécessaires à la propagation du streamer

Pour que le streamer se développe, plusieurs conditions doivent être remplies :

- **Présence de photons de haute énergie** : Il doit y avoir suffisamment de photons à haute énergie à la tête de l'avalanche principale pour initier le phénomène.
- **Ionisation des molécules de gaz** : Ces photons doivent être capables d'ioniser les molécules de gaz présentes dans le voisinage immédiat de l'avalanche, permettant ainsi la création de nouveaux électrons.
- **Champ de charge suffisant** : Un champ électrique d'espace suffisamment intense est nécessaire pour créer de nouvelles avalanches secondaires, propulsant ainsi la propagation du streamer.

2. Étapes successives du développement du streamer

Le développement du streamer se déroule en plusieurs étapes successives. On suppose ici que les avalanches secondaires ne se développent pas pendant l'intervalle de temps considéré.

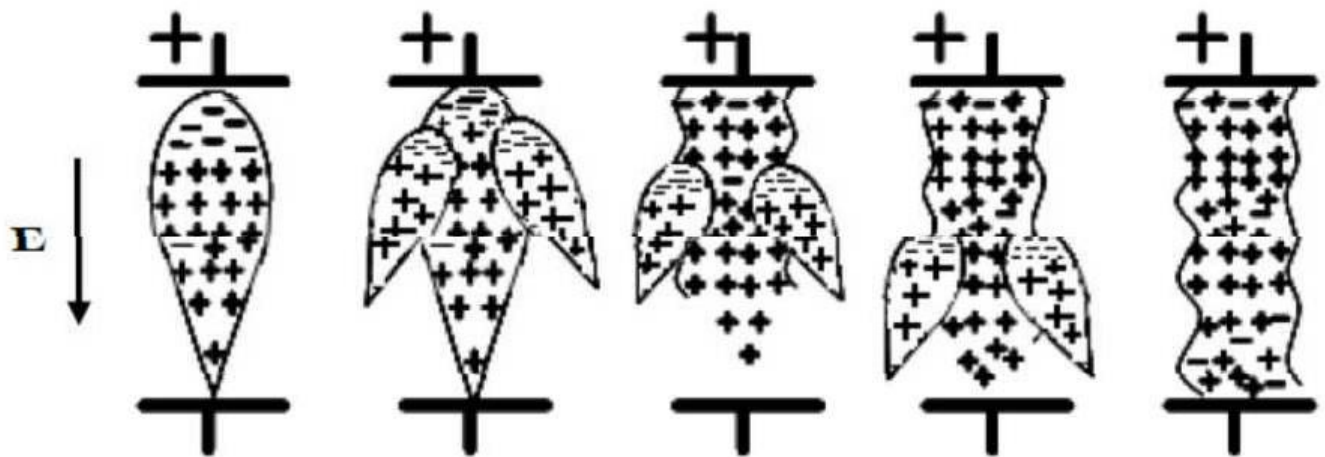


Figure. 34 : Étapes successives du développement du streamer

1. **Formation du nuage d'électrons :** La tête du streamer, constituée d'un nuage d'électrons, est attirée par l'anode. Les charges positives restantes à la tête de l'avalanche primaire sont neutralisées par les électrons produits lors des avalanches secondaires. Ce phénomène mène à la formation du streamer, qui est un canal partiellement ionisé.
2. **Propagation du streamer :** Ce phénomène consiste en une série d'avalanche secondaires qui déposent des charges supplémentaires, créant ainsi une structure ionisée qui se propage du côté positif vers la cathode. L'ensemble du processus se déroule sur des intervalles de plusieurs mètres, ce qui conduit à des phénomènes non observés sur de plus petites échelles.

3. Description du parcours de la décharge électrique (DE)

Lors de la propagation de la décharge électrique (DE), plusieurs phénomènes lumineux peuvent être enregistrés par des caméras ultra-rapides (convertisseurs d'image) qui permettent de visualiser les phénomènes successifs au cours de la croissance de l'onde de tension. Voici les principales étapes de ce développement :

a. Première couronne

C'est la première manifestation lumineuse visible près de l'électrode haute tension (H.T) immédiatement après un choc. Elle se présente sous forme de filaments lumineux ramifiés (les streamers). Ce phénomène se développe à partir de la pointe de l'électrode sur une certaine distance et se déroule en quelques centaines de nanosecondes.

b. Période sombre

Après la première couronne, il y a une période de durée variable caractérisée par l'absence d'émission lumineuse visible au niveau de la pointe de l'électrode. Cette période peut être influencée par les caractéristiques de l'électrode H.T et la forme de l'onde appliquée.

c. Le leader

Lorsque la tension a suffisamment augmenté, l'ionisation commence et un canal de décharge (leader) se développe en direction du plan de l'électrode. À ce stade, le canal devient plus lumineux en raison de la couronne de tête du leader. La propagation du leader est généralement tortueuse, et sa vitesse d'avancement est d'environ 2 cm/ μ s.

La propagation du streamer peut être discontinue et passer à un autre phénomène, créant ainsi des transitions dans le parcours de la décharge.

d. Saut final

Lorsque les premiers filaments de la couronne touchent le plan, il y a une intense réillumination des streamers, qui s'étendent de la tête du leader jusqu'au plan. La vitesse de propagation augmente alors considérablement, passant de 2 cm/ μ s à environ 1 m/ μ s. La durée de cette phase est de l'ordre de 20 μ s.

Remarque : À partir du moment où le saut final commence, la décharge devient certaine, et un arc électrique se forme entre les électrodes.

4. Les Streamers

Les streamers se forment sous l'influence d'une tension à front raide, ce qui entraîne un claquage beaucoup plus rapide que celui prédit par la théorie de Townsend. Meek et Raether ont estimé que le champ électrique nécessaire à la transformation d'une avalanche en streamer doit dépasser un certain seuil.

a) La foudre:

Est un phénomène naturel de décharge électrique disruptive de grande intensité qui se produit dans l'atmosphère, entre des régions chargées électriquement et elle peut se produire soit entre 2 blocs de nuages ou à l'intérieur d'un même nuage ou bien entre un nuage et le sol.

* Elle est toujours accompagnée d'un ou plusieurs éclairs (l'éclair est une émission intense de rayonnement électromagnétique, visible et aussi d'émissions Sonores (Tonnerre).

* La décharge nuage sol présente un grand danger pour l'homme et les biens.

- Lors d'un orage plusieurs phénomènes peuvent se produire : des éclairs que l'on voit dans la masse nuageuse, du tonnerre qu'on entend I loin et de la foudre lorsqu'un éclair touche le sol.

- Toute forme géométrique pointue attire la foudre

Définition

Est un phénomène naturel de décharge électrique disruptive de grande intensité qui se produit dans l'atmosphère entre des régions chargées électriquement, qui peut aussi (la foudre) se produire soit :

- Entre deux blocs de nuages :

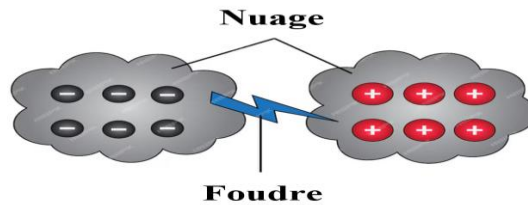


Figure 35 : La foudre entre deux blocs de nuages

- À l'intérieur d'un même nuage :

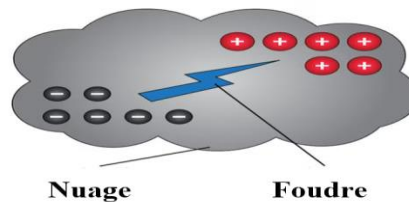


Figure 35 : La foudre à l'intérieur d'un même nuage

- Ou entre un nuage et le sol :

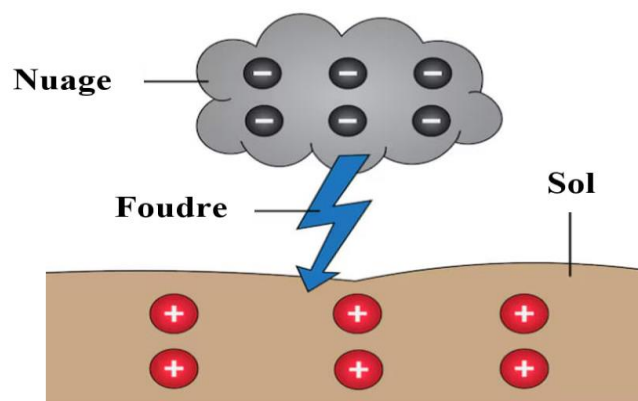


Figure 36 : La foudre entre un nuage et le sol

- La foudre est toujours accompagnée d'un ou plusieurs éclairs (l'éclair est une émission intense de rayonnements électromagnétiques visible est aussi d'émissions sonores (Tonnerre)

- Pendant le transport de l'énergie électrique les lignes et les postes d'extrémité seront confrontés à la foudre (phénomène atmosphérique constituant une contrainte majeure) :

Conséquences → défaut → déclenchement de la ligne → perturbations fréquentes → dégâts humains et matériels

Formation des nuages

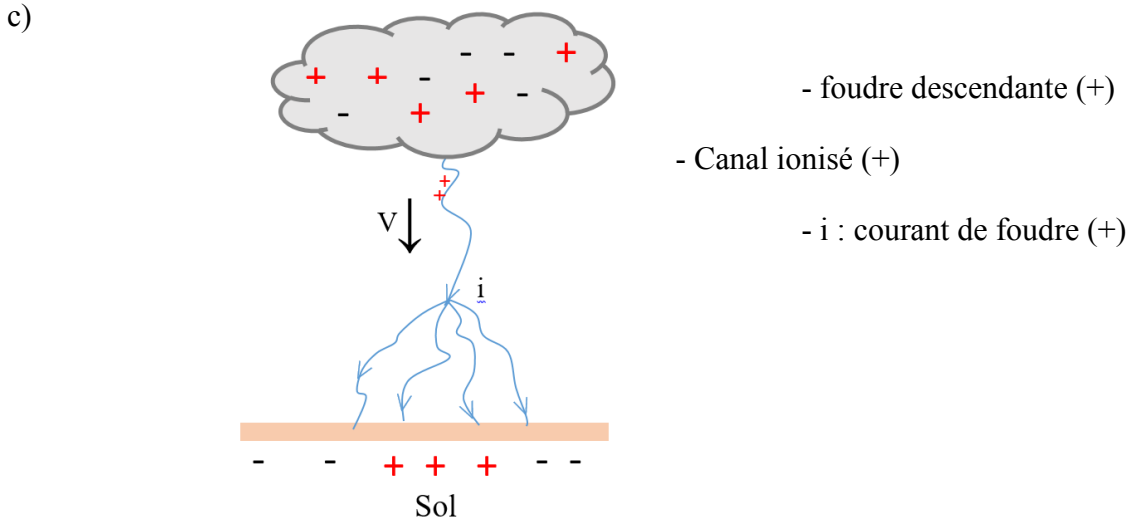
Ce sont d'énormes masses (cumulo-nimbus) occupant une surface de plusieurs dizaines de Km^2 et d'une épaisseur de plusieurs Km à une hauteur du sol 2 Km et un volume de plus (+) de 100Km^3

Les masses de quelques centaines de milliers de tonnes d'eau constituées de gouttes d'eau dans la partie inférieure et de glace à la partie supérieure.

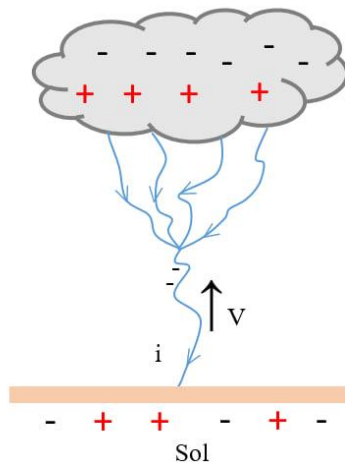
* La formation des nuages orageux est due à l'apparition des courants atmosphériques ascendants dont la vitesse est de $+20\text{m/s}$

* Formation de charges électriques :

Parallèlement à ces phénomènes on observe une séparation des charges électriques au sein du

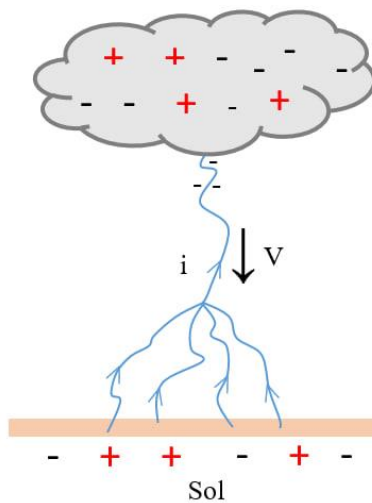


d)



- foudre ascendante (-)
- canal ionisé (-)
- i : courant de foudre (+)

e)



- foudre descendante (-)
- canal ionisé (-)
- i courant de foudre (-)

Figure 37 : Formation de charges électrique

Effets de la foudre

Les effets sont liés aux caractéristiques du courant de foudre :

Nuage : - les porteurs de charge (+) légers sont entraînés par les courants ascendants.

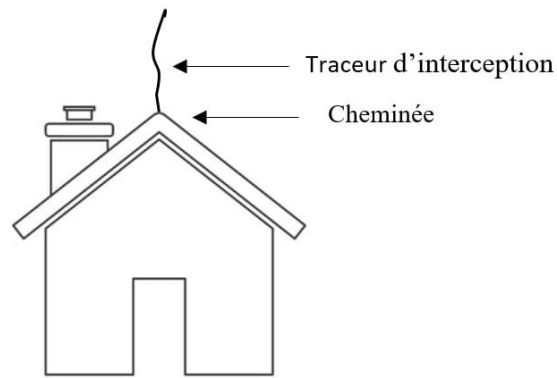
- les porteurs de charge (-) lourds tombent malgré l'existence des courant

Développement de la foudre

C'est avec un moyen des caméras " ultra rapide " que l'on peut observer le développement de la décharge de foudre dans le temps et dans l'espace.

a) Eclair : il apparait comme une lumière (flash) au moment de la rencontre de traceur d'interception et du traceur principale (figure) sa durée est de $100 - 200\mu s$

a)



b)

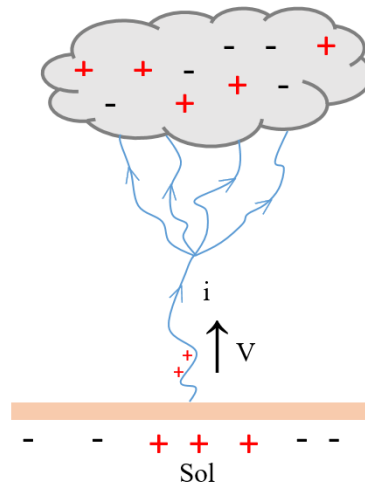


Figure 38 : Développement de la foudre.

a) Effet thermique : que permet de calculer l'énergie libérée dans une charge située au point de chute de la foudre selon l'expression :

$$G = \int_{T_i}^{T_f} i^2 dt$$

T_i : temps initial

T_f : temps final

b) Effet dynamique :

Dû aux effets électrodynamiques régnant dans le passage d'un courant de foudre élevé.

Dû aussi aux effets d'élévation de température et de pression.

c) Effet électromagnétique :

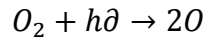
La foudre génère des ondes électromagnétiques à large spectre (KHz $\rightarrow$ MHz) provoquant aussi des perturbations radio phoniques.

d) Effet acoustique :

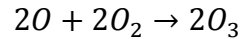
C'est le canal de la foudre ou onde sonore dont son axe est le canal de la foudre

e) Effet chimique :

La décharge électrique apporté une énergie suffisante pour que la relation chimique aura à partir de l'oxygéné (O_2)



Et



Avec :

h : constante de Planck $6,63 \times 10^{34} J$

∂ : fréquence de l'onde de lumière

O_2 : oxygéné

O_3 : ozone dont l'odeur est piquante qu'accompagne toute la décharge

f) Effet de danger pour les personnes :

On peut à titre d'exemple recenser par an les dégâts causés par la foudre en suisse en 10 ans $\rightarrow$ 2,2 cas mortels et 9 cas blessés (Voir site internet).

Protection contre la Foudre

Les moyens de protection contre la foudre dépendent du courant qui s'écoule vers la terre ; à savoir que les coups de foudre provoquent des perturbations dans les réseaux électriques (déclenchement et réenclenchèrent des disjoncteurs).

A-/ Paratonnerre

Le paratonnerre est un conducteur relié au sol dont le sommet est pointu. Il est placé sur ou à côté de l'appareil à protéger. (Figure 39)

La décharge générée au sommet du paratonnerre continuera à rencontrer et à capturer le traceur de foudre, dirigeant le courant vers le sol.

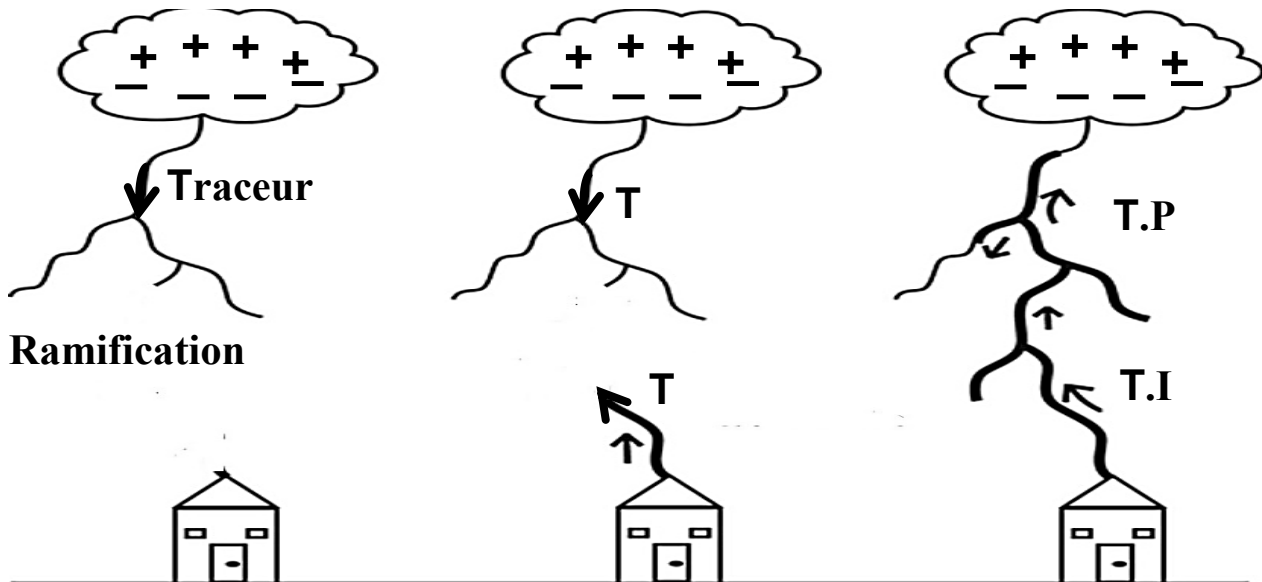


Figure 39.a

Figure 39.b

Figure 39.c

TP : traceur principal

TI : traceur intercepteur

- Le paratonnerre protège les structures contre les coups de foudre directs.
- Le paratonnerre est le matériel disposé à l'extérieur sur le point le plus haut d'une structure.
- Le paratonnerre a pour fonction de capter les coups de foudre qui sont susceptibles de frapper directement la structure qu'il protège.

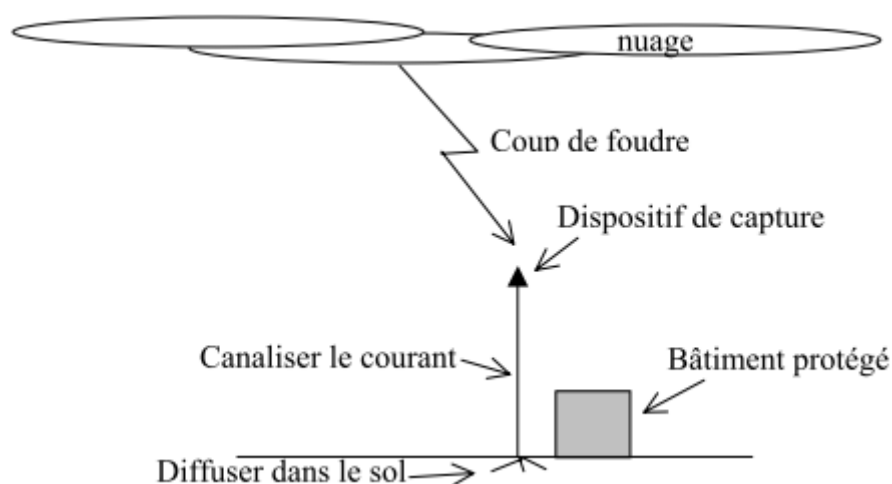


Figure 40 : Paratonnerre

B-/ Eclateur : L'éclateur se compose de deux électrodes pointues, l'une reliée à la terre et l'autre connectée à la ligne électrique ou à l'équipement à protéger (**figure 36**).



Figure 41 : L'éclateur

C-/Câbles de garde

Parmi les moyens de protection contre la foudre il existe le câble de garde qui empêche les coups de foudre de tomber directement sur les appareils (isolateurs, lignes; ...) car il doit être placé au-dessus des lignes électriques afin de les protéger contre toute éventuelle chute de foudre.

Le câble de garde son rôle est de transmettre le courant électrique vers le sol travers le pylône ou bien à la limite de réduire l'intensité du courant de foudre.

Remarque : l'entreprise nationale de l'électricité Algérienne (Sonelgaz) emploie le câble de garde comme un moyen de transmission HF par une fibre coaxiale.

D-/Cage maillée (Cage de Faraday)

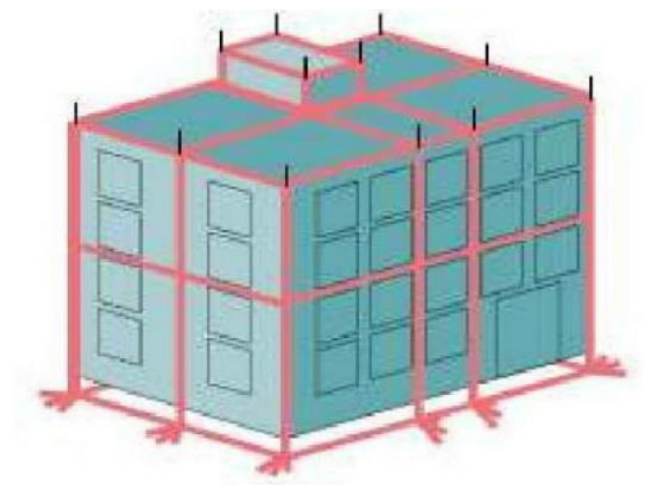
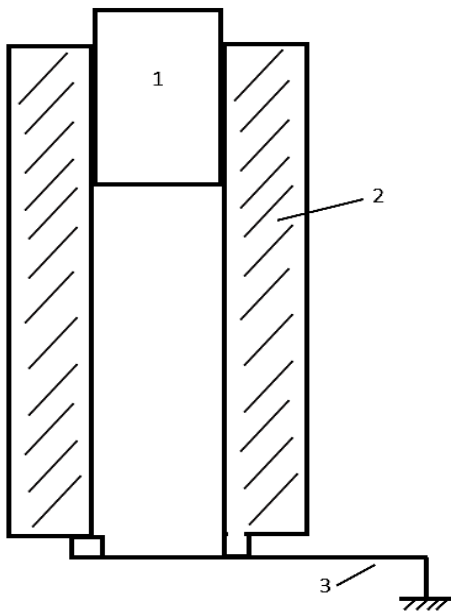


Figure 42 : Bâtiment maillé

E-/ Parafoudres à explosion:

Leur principe est de permettre d'écouler à la terre l'onde de surtension (du défaut) qui apparaît sur une ligne électrique. Et qui doivent (les parafoudres) s'amorcer pour une tension déterminée → une tension d'amorçage $\sim 2 U_n > \text{valeur nominale } U_n$

- Leur rôle est de limiter cette tension à une valeur non dangereuse de : $1.1 \rightarrow 1.2 U_n$



1 : Piston coulissant dans le tube HT

2 : Tube (gazogène)

3 : Terre pour écouler le courant de foudre

Figure 43 : Parafoudres à explosion

- Entre les deux électrodes 1 et 3 il se trouve un tube 2 en matière gazogène fibres dégageant des gaz deionisants au contact de l'arc et soufflant celui-ci vers le bas (à la terre)

- Le parafoudre à explosion est efficace que d'autres.

F-/ Parafoudres à résistance

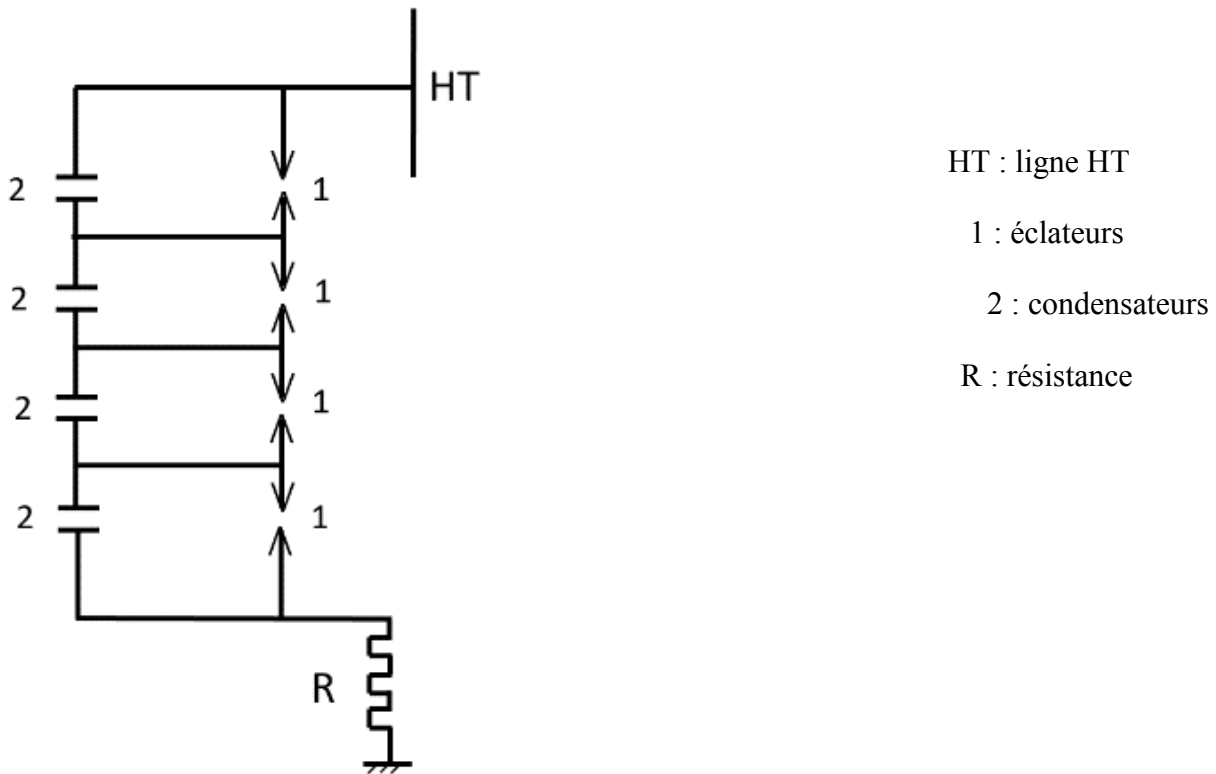


Figure 44 : Parafoudres à résistance

Ce mécanisme comporte en série un certain nombre d'éclateurs 1 et un même nombre de condensateurs 2 et une résistance R. que d'une valeur ohmique elle décroît quand la tension augmente et elle laisse écouler facilement les surtensions, mais elle facilite la coupure du courant d'écoulement par les éclateurs 1 quand la tension décroît.

- Le rôle des condensateurs 2 assurent l'équipotentialité (équi-répartition) de la tension entre les éclateurs 1.
- Ce dispositif est conçu pour la HT et THT.

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

Remarque :

Le paratonnerre et le parafoudre sont des matériels de protection contre la foudre qui ont des fonctionnalités différentes face au phénomène du coup de foudre.

L'installation Intérieure de Protection contre la Foudre est composée d'un ou de plusieurs systèmes de parafoudres.

Les parafoudres agissent comme des interrupteurs, Les parafoudres ferment leur circuit lorsqu'une surtension apparaît sur le réseau et ils dévient le courant à la prise de terre.

L'installation intérieure de Protection contre la Foudre conduit et écoule les surtensions et les courants dans la prise de terre électrique.

L'installation extérieure de protection contre la foudre :

- L'Installation extérieure de protection contre la foudre est composée d'un capteur appelé paratonnerre, d'au moins un conducteur et d'une prise de terre dédiée à chaque conducteur.
- Les prises de terre doivent-être reliées entre-elles ainsi que toutes les masses métalliques se trouvant à proximité.
- L'installation Extérieure de Protection contre la Foudre capte, conduit et écoule dans le sol le courant électrique de la foudre.

Parafoudre :

- Le parafoudre protège contre les effets indirects des coups de foudre.
- Le parafoudre est le matériel disposé à l'intérieur d'une structure sur les réseaux qui transportent de l'électricité (énergie, communications, données...).
- Le parafoudre a pour fonction d'éviter les surtensions dans le réseau qu'il protège.

L'installation intérieure de protection contre la foudre :

- L'installation Intérieure de Protection contre la Foudre est composée d'un ou de plusieurs systèmes de parafoudres.
- Les parafoudres agissent comme des interrupteurs. Les parafoudres ferment leur circuit lorsqu'une surtension apparaît sur le réseau et ils dévient le courant à la prise de terre.
- L'installation intérieure de Protection contre la Foudre conduit et écoule les surtensions et les courants dans la prise de terre électrique.

Cette technique est employée dans les infrastructures importantes (militaires, tours de contrôle dans les aéroports, équipements informatiques...)

Par le fait de l'équipotentialité dans les mailles de la cage, le courant de foudre sera réduit ainsi que le champ électromagnétique et l'induction.

• Effets :

- Incendies.
- Destruction des équipements électriques.
- Blessures humaines dues aux surtensions ou aux arcs électriques.

9. Protection contre la Foudre

1. Objectifs de la protection

La protection contre la foudre vise à :

1. Protéger les bâtiments et les infrastructures.
2. Garantir la sécurité des personnes.
3. Préserver les équipements sensibles contre les surtensions.

2. Systèmes de Protection

2.1 Paratonnerres

Le paratonnerre capte la foudre et dirige le courant vers la terre. Il repose sur la théorie de l'effet de pointe, selon laquelle une pointe conductrice amplifie le champ électrique :

2.2 Système de mise à la terre

Permet de dissiper le courant de la foudre dans le sol :

- Résistance de mise à la terre R_g minimale pour éviter les surtensions : $R_g < 10 \Omega$.

2.3 Dispositifs de Protection contre les Surtensions (DPS)

Protègent les équipements contre les surtensions dues à la foudre. Le comportement d'un DPS peut être modélisé par une caractéristique non linéaire :

$$V = k \cdot I^n$$

où :

- V est la tension aux bornes.
- I est le courant traversant.
- $n > 1$ caractérise la non-linéarité.

3. Étude de Cas

Exemple : Protection d'un bâtiment industriel

1. **Analyse des risques :**
 - Localisation géographique.
 - Présence de structures métalliques.
2. **Installation :**
 - Paratonnerre à capture optimisée.

- Réseau de mise à la terre avec une résistance $R_g=5\ \Omega$
- DPS sur les lignes électriques.

3. **Simulation :**

Supposons une décharge de 50 kA. L'énergie dissipée dans la mise à la terre est calculée :

$$W=R_g \cdot I^2=12.5\text{MJ}.$$

Ce système protège efficacement les équipements.

V. **Compatibilité électromagnétique**

Introduction

La **compatibilité électromagnétique** (CEM) désigne la capacité d'un appareil ou d'un système à fonctionner correctement dans son environnement électromagnétique sans provoquer d'interférences électromagnétiques excessives (EMI) ou être affecté par des sources externes de perturbations électromagnétiques. Cela implique l'étude et la gestion des phénomènes électriques et magnétiques pour éviter la dégradation des performances des appareils électroniques ou des systèmes de communication.

Les objectifs principaux de la CEM sont :

1. **Émission** : Minimiser les interférences émises par l'équipement.
2. **Immunité** : Maximiser la résistance de l'équipement aux interférences externes.

1. Fondamentaux de l'électromagnétisme

Les champs électromagnétiques (CEM) sont générés par des charges électriques en mouvement (courants). Ces champs peuvent être soit **électrostatiques** (créés par des charges statiques) soit **électromagnétiques** (créés par des courants variables et des champs magnétiques).

Les **équations de Maxwell** décrivent les phénomènes électromagnétiques. Ces équations, qui sont à la base de la CEM, sont les suivantes :

1. **Loi de Gauss pour l'électricité :**

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

où $\mathbf{E}$ est le champ électrique, ρ est la densité de charge électrique et ϵ_0 est la permittivité du vide.

2. **Loi de Gauss pour le magnétisme :**

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

où $\mathbf{B}$ est le champ magnétique.

3. **Loi de Faraday (induction électromagnétique) :**

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

Cette équation exprime la relation entre un champ électrique variable et un champ magnétique induit.

4. Loi d'Ampère-Maxwell (loi de l'induction électromagnétique) :

$$\nabla \times E = \mu_0 \cdot J + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$$

où J est la densité de courant et μ_0 est la perméabilité du vide.

2. Sources de Perturbations Électromagnétiques

Les sources de perturbations peuvent être **internes** (à l'intérieur d'un système, par exemple des composants électroniques) ou **externes** (des sources externes comme des lignes électriques à haute tension ou des émetteurs radio).

Les perturbations sont généralement classées en deux catégories :

1. **Émissions conduites** : Les perturbations se propagent par les câbles ou lignes d'alimentation.
2. **Émissions rayonnées** : Les perturbations se propagent sous forme d'ondes électromagnétiques.

3. Atténuation et Blindage

Pour minimiser les effets des perturbations électromagnétiques, plusieurs techniques sont utilisées :

- **Blindage électromagnétique** : Utilisation de matériaux conducteurs ou ferromagnétiques pour interférer avec les champs électromagnétiques, réduisant ainsi l'impact des interférences.
- **Filtrage** : Utilisation de filtres passifs (par exemple, filtres RC ou LC) pour atténuer les perturbations conduites.
- **Mise à la terre** : Pour éviter l'accumulation de charges électrostatiques et réduire les risques d'interférences.

4. Tests de CEM

Les tests de CEM sont essentiels pour vérifier qu'un appareil ou système respecte les normes de compatibilité électromagnétique. Ces tests incluent :

- **Mesure des émissions rayonnées et conduites** : Utilisation d'antennes et de récepteurs pour mesurer les émissions.
- **Immunité aux perturbations externes** : Soumettre l'équipement à diverses sources de perturbations pour tester sa résistance.

Les **normes CEM** les plus courantes sont établies par des organismes comme l'IEC (International Electrotechnical Commission) et la norme **IEC 61000**.

5. Exemples d'application de la CEM

1. **Appareils électroniques grand public** : Les télévisions, radios, et téléphones mobiles doivent être conçus pour fonctionner sans interférer avec d'autres équipements (comme des appareils médicaux ou des dispositifs de communication).
2. **Systèmes de communication** : Les systèmes radio et de communication sans fil, comme les Wi-Fi ou les satellites, doivent respecter des limites d'émission pour éviter des interférences avec d'autres canaux.
3. **Équipements industriels** : Les machines industrielles et les équipements électromécaniques doivent être protégés contre les perturbations électromagnétiques afin de garantir la sécurité et l'efficacité des opérations.

6. Modélisation des perturbations électromagnétiques

La propagation des champs électromagnétiques peut être modélisée à l'aide des équations de Maxwell. Par exemple, dans une situation où un dispositif émet un champ magnétique, on peut utiliser l'équation d'Ampère pour calculer le champ généré en fonction des caractéristiques géométriques de l'équipement et de la fréquence des perturbations.

Exemple de calcul du champ magnétique d'une ligne conductrice

Pour une ligne conductrice transportant un courant I à une distance r , le champ magnétique peut être calculé à l'aide de la loi de Biot-Savart :

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

où μ_0 est la perméabilité du vide.

VI. Impact de la haute tension sur l'environnement

Définition

Les lignes électriques et les pylônes haute et très haute tension représentent une nuisance visuelle indéniable. Leur présence dégrade la qualité et l'esthétique des paysages. Le recours à l'enfouissement des lignes reste limité par les producteurs d'électricité, principalement en raison de son coût élevé.

1. Impacts sur le Milieu Physique

Les lignes à haute tension peuvent rencontrer des risques physiques tels que les **éboulements** et les **glissements de terrain**. Par exemple, dans les régions montagneuses ou instables, les pylônes peuvent être

affectés par des **chutes de blocs** ou des **érosions** naturelles. Un exemple de cela est l'incident survenu en 2010 dans les Alpes françaises, où des pylônes ont été endommagés à cause de coulées de débris. Cela montre l'importance de bien choisir l'emplacement des lignes et d'éviter les zones géologiquement instables.

2. Impacts sur la Flore

Le **débroussaillage** nécessaire pour installer les pylônes ou les voies d'accès peut entraîner la coupe d'arbres de valeur patrimoniale, comme des chênes ou des pins dans les forêts anciennes. Par exemple, la construction de lignes à haute tension dans des zones comme la forêt de Fontainebleau peut poser des problèmes de déforestation. Cependant, dans le cas des vergers, il est possible de faire passer les lignes par-dessus sans interférer avec la végétation, en utilisant des pylônes surélevés.

3. Impacts sur l'Habitat

Les **lignes aériennes à très haute tension (THT)** ont un **impact visuel** significatif, notamment à cause de la hauteur des pylônes, qui peuvent être visibles de plusieurs kilomètres à la ronde. Par exemple, dans le cas de la ligne THT traversant les zones résidentielles à proximité de la ville de Lyon, les pylônes sont visibles depuis de nombreux quartiers, créant une gêne esthétique pour les habitants. L'impact est moins important dans les zones rurales, où les lignes sont plus éloignées des habitations.

4. Impacts sur les Activités Économiques

Les **champs magnétiques** générés par les lignes peuvent interférer avec le fonctionnement des équipements électroniques, bien que les technologies modernes aient réduit ces effets. Par exemple, dans une usine où des écrans d'ordinateurs sont utilisés pour surveiller la production, un champ magnétique généré par une ligne haute tension à proximité peut déformer les images affichées sur les écrans. Cependant, ces effets sont maintenant atténués grâce à des équipements informatiques conçus pour supporter de tels champs.

5. Impacts sur la Santé : Champs Électromagnétiques (CEM)

Les **champs électromagnétiques** produits par les lignes à haute tension ont fait l'objet de nombreuses études épidémiologiques. Par exemple, une étude réalisée en 2002 en Californie a montré une augmentation du risque de leucémie chez les enfants vivant à proximité de lignes à haute tension. Les effets de ces champs sont plus marqués lorsque l'exposition est prolongée, comme dans le cas des habitations proches des pylônes. Ces effets ont conduit à la mise en place de réglementations plus strictes concernant l'exposition aux CEM.

6. Impacts du Bruit

Les **bruits** générés par les équipements des stations de transformation, tels que les **bobinages des transformateurs** et les **ventilateurs des radiateurs d'huile**, peuvent affecter les zones résidentielles proches. Dans des régions comme le sud de la France, où plusieurs stations de transformation sont situées près de zones résidentielles, le bruit peut être perceptible la nuit, affectant ainsi la qualité de vie des habitants.

7. Impacts sur l'Aménagement du Territoire

Lors de la planification de nouveaux projets de lignes haute tension, les zones résidentielles doivent être protégées. Par exemple, dans les zones urbaines en développement comme celle de **Toulouse**, une ligne THT peut impacter l'aménagement du territoire en réduisant la possibilité d'extension urbaine ou en compromettant l'esthétique des zones d'habitation. Les zones naturelles, telles que les parcs et les réserves naturelles, sont également sensibles aux projets de ce type, bien qu'aucune loi spécifique n'interdise leur installation dans ces zones.

8. Impacts sur l'Environnement Humain

Les lignes à haute tension peuvent entraîner des **expropriations** de propriétés et de terrains agricoles. Par exemple, la construction de la ligne THT **Lyon-Marseille** a obligé plusieurs agriculteurs à vendre leurs terres pour faire place à l'infrastructure. Cela peut perturber l'agriculture locale et modifier les paysages ruraux en détruisant des surfaces cultivables.

9. Impacts sur le Milieu Physique : Risques de Pollution

Les **postes de transformation** peuvent présenter des risques de contamination des nappes phréatiques, surtout si des huiles utilisées pour les transformateurs fuient. Par exemple, un incident en 2008 en Allemagne a entraîné la pollution d'une nappe phréatique à la suite d'une fuite d'huile d'un transformateur. Bien que des produits biodégradables soient utilisés pour le désherbage des postes, l'emprise des installations peut perturber le **débit des eaux**, entraînant une mauvaise gestion de l'eau et affectant la biodiversité locale.

10. Impacts sur le Milieu Agricole

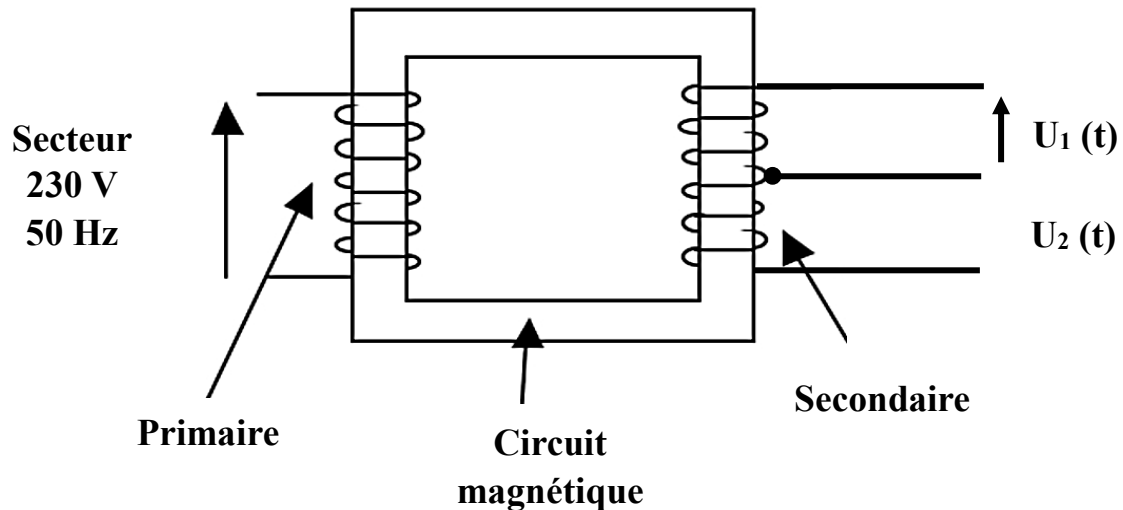
Le **changement d'affectation des terres agricoles** pour installer des pylônes et des lignes à haute tension représente un impact majeur. Par exemple, l'installation d'une ligne haute tension en Bretagne a nécessité la réaffectation de plusieurs centaines d'hectares de terres agricoles, perturbant ainsi les cycles de culture des agriculteurs locaux. De plus, la construction de postes de transformation nécessite souvent des ajustements dans les parcelles agricoles, impactant la rentabilité des exploitations.

Exercices avec solutions

Série N°01

Exercice 01:

Soit un transformateur à point milieu possédant au secondaire 2 enroulements ayant le même nombre de spires : (voir figure)



- Définir le rôle du circuit magnétique ?
- Montrer que : $U_2(t) = - U_1(t)$.
- Déterminer le nombre de spires des enroulements du secondaire pour que la valeur efficace des tensions $u_1(t)$ et $u_2(t)$ soit égale 10 volts.

On donne : nombre de spires du primaire : 460.

Solution :

- Le circuit magnétique d'un transformateur permet de canaliser les lignes de champ magnétique entre le primaire et le secondaire.
- Les 2 enroulements du secondaire ayant le même nombre de spires, donc les 2 tensions $u_1(t)$ et $u_2(t)$ ont la même amplitude. Aussi elles sont en opposition de phase (à cause de la convention de signe pour les tensions)
Donc : $u_2(t) = - u_1(t)$
- Puisque les 2 enroulements du secondaire sont identiques donc on détermine un seul :

$$n = 460 \times \left(\frac{10}{230}\right) = 20$$

Exercice 02 :

Un transformateur monophasé présente sur la plaque signalétique les caractéristiques suivantes :

230V / 24V; 63 VA ; 50Hz

Lors de la mise sous tension, il se produit un courant d'appel important de l'ordre de 25 I_{1N} pendant quelques millisecondes.

- Calculer le courant primaire nominal I_{1N} et le courant secondaire nominal I_{2N} .
- Estimer le courant de mise sous tension ?

Solution :

- Courant nominal du primaire et secondaire :

$$I_{1N} = S_N / U_{1N} = 63 / 230 = 0,27 \text{ A}$$

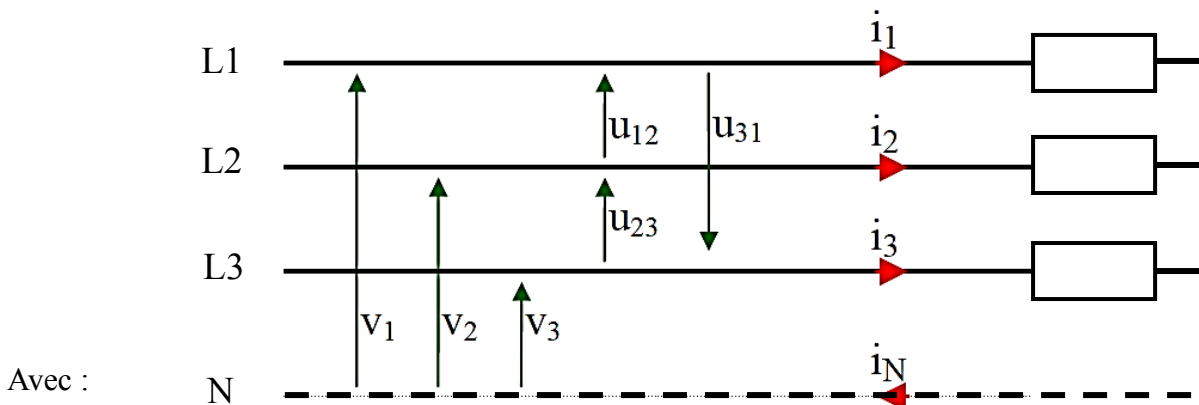
$$I_{2N} = S_N / U_{2N} = 63 / 24 = 2,6 \text{ A}$$

- Evaluation du courant d'appel :

$$0,27 \times 25 = 6,8 \text{ A}$$

Exercice 03 :

Soit une ligne triphasé équilibrée 230/400V alimentant une machine M1 triphasé équilibré dont la plaque signalétique indique 400/700V, (voir figure).



$$U_{12}(t) = 400 \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(\omega t)$$

$$U_{23}(t) = 400 \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3})$$

$$U_{31}(t) = 400 \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3})$$

- Préciser le mode de branchement de la machine (Modélisée par une résistance $= 20\sqrt{3}$) en série avec une inductance d'impédance $L\omega = 20\Omega$.
- Exprimer l'impédance complexe de chaque dipôle sous la forme $\bar{Z} = Z \cdot e^{i\theta}$

c) Calculer la valeur efficace I_{eff} des courants de ligne et déterminer $i_1(t)$.

Solution :

a) comme la plaque indique les valeurs nominales (400V/700V) cela signifie que la machine peut fonctionner sous tensions nominales :

- Sur un réseau alternatif sinusoïdal triphasé équilibré dont les tensions efficaces entre deux phases sont de 400V (avec les 3 dipôles de la machine en triangles).

- Sur un réseau alternatif sinusoïdal triphasé équilibré dont les tensions efficaces entre deux phases sont de $400.\sqrt{3} \cong 700V$ (avec les 3 dipôles en étoile).

- Dans les 2 cas, la valeur efficace de la tension aux bornes d'un dipôle de la machine est : 400 V.

- Comme $U_{12}(t) = 400.\sqrt{2}.\cos(\omega t) \rightarrow U_{12max} = 400.\sqrt{2}$

$$\text{Soit } U_{12eff} = 400V$$

Donc on couple la machine en triangle

b) impédance complexe : $\bar{Z} = R + jL\omega = 20\sqrt{3} + j20$

$$= 40 \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2} \right) = 40.e^{i\frac{\pi}{6}}$$

$$\text{c) } |\bar{Z}| = 40 = \frac{U_{max}}{I_{max}} \rightarrow I_{max} = \frac{U_{max}}{40} = \frac{400.\sqrt{2}}{40}$$

Série N°02

Exercice 01:

Rappel : Le transport de l'énergie électrique se fait en HT pour minimiser les pertes.

Soit la composition des lignes aériennes par des alliages (Al-acier) car ils sont plus légers que le cuivre dont la résistivité de ces alliages est de $30.10^{-9}\Omega m$

- On assimile le faisceau des conducteurs à 1 unique conducteur de section S.

- L'énergie est transportée par une ligne triphasée (400V/50Hz) pour alimenter des habitants sur une longueur de 200m dans 3 conducteurs de section $185mm^2$ (adaptée à l'intensité) et une puissance apparente $S = 90KVA$

a) Calculer l'intensité I du courant en ligne ?

b) La ligne est alimentée de 20KV (20KV ;50Hz) et les conducteurs ont une section de $54,6mm^2$.

1 - Calculer la résistance de chaque fil ?

2 - Estimer les pertes joules dans la ligne triphasée ?

c) Déterminer l'intensité I du courant en ligne ?

d) Que conclure ?

Solution :

a) Intensité I du courant en ligne :

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{90.10^3}{\sqrt{3} \times 400} = 130A$$

b)

1- Résistance de chaque fil :

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} = \frac{30.10^{-9} \times 200}{185} = 32m\Omega$$

2- les Pertes joules dans la ligne triphasée :

$$Pj = 3RI^2 = 3 \times 32 \times 10^{-3} \times 130^2 = 1622KW$$

c) Intensité I du courant en ligne :

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{90 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 20 \times 10^3} = 2,6A$$

Calcul de la résistance de chaque fils :

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} = \frac{30 \times 10^{-9} \times 200}{54,6} = 110m\Omega$$

d) En conclusion on constate que le transport de l'énergie doit se faire en HT qu'en basse Tension BT suite à la différence des pertes

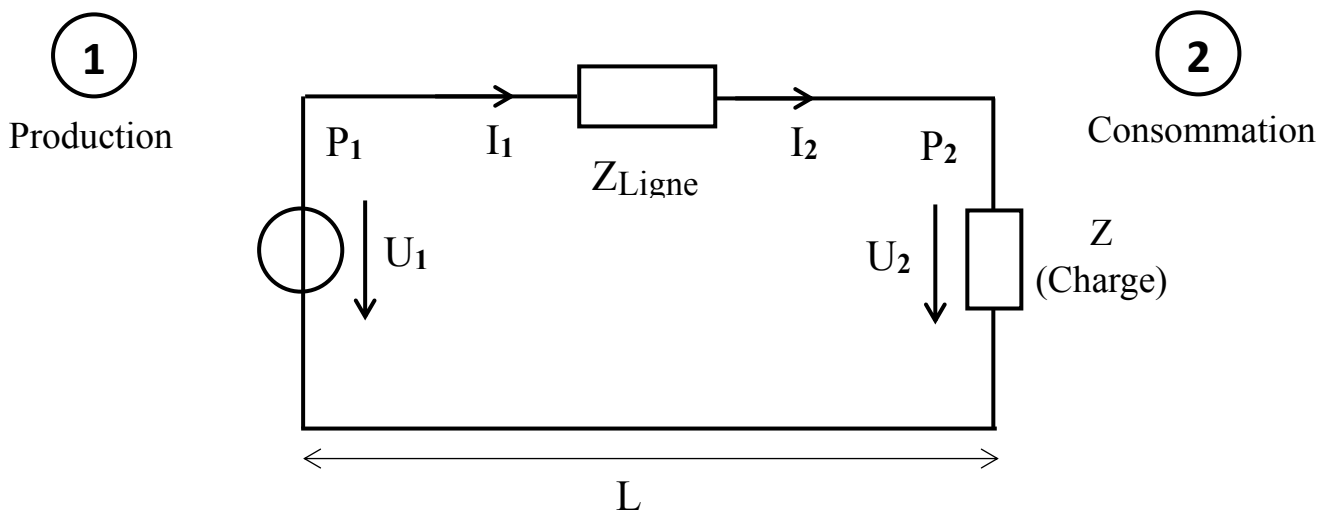
- Car les pertes joules pour la ligne triphasé 20KV

$$\rightarrow P_j = 3RI^2 = 3 \times 110 \times 2,6^2 = 2,2W$$

Exercice 02:

Soit une ligne monophasée de transport d'énergie électrique, (voir figure).

La puissance P_2 (active) délivrée en un point de consommation 2 est située à une distance L du centre de production 1.



- Déterminer l'impédance de ligne Z_L ?
- Déterminer l'impédance de la charge Z ?
- Estimer P_2 et I_2 ?
- Que conclure ?

Solution :

- l'impédance Z_L :

$$Z_L = R'_L L + j\omega L'_L L$$

- l'impédance de charge Z :

$$Z = R + j\omega L$$

- Calcul de P_2 et I_2 :

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \theta_2 \quad \dots\dots\dots [\text{W}]$$

$$I_2 = I_1 = I \quad \dots\dots\dots [\text{A}]$$

Remarque : θ_2 = déphasage entre tension-courant

d) Conclusion

- en régime continu $\rightarrow \theta_2 = 0$
- en régime sinusoïdale $\rightarrow \theta_2 = \alpha_2 - \beta_2$

Avec :

R_L = Résistance linéique.

R = Résistance de la charge.

L = inductance de la charge

Aussi comme

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \theta_2$$

Donc 2 variables rentrent en jeu pour augmenter la puissance :

Soit le courant Soit la tension

* Il est impossible d'augmenter le courant I_2 car il est lié aux dimensionnements thermiques (effet joule).

Exercice 03: Transport d'énergie électrique

L'énergie électrique transportée par le réseau électrique national s'élevait à 450 TWh (à savoir 1 TWh = 10^6 MWh).

Cette énergie servait à alimenter les installations électriques. Dont une partie de cette énergie est utilisée pour compenser les pertes du réseau de distribution (Ces pertes ont été de 10 TWh).

- a) Calculer le pourcentage d'énergie perdue / à l'énergie transportée ?
- b) Estimer le rendement du réseau de distribution ?
- c) Déterminer la puissance électrique distribuée ?
- d) Déterminer la puissance moyenne perdue lors de la distribution ?

Solution :

- a) Pour 450 TWh transportée on a enregistré 10 TWh perdue : donc le pourcentage sera $10/450 = 2.2\%$
- b) Soit η le rendement du réseau :

$$\frac{(450 - 10)}{450} = 97.7\%$$

c) La puissance distribuée sera :

$$P_d = \frac{W_d}{365 \times 24} \cong 50,22 \text{ GW}$$

P_d : puissance distribuée

W_d : énergie distribuée

d) Puissance moyenne perdue :

$$P_p = \frac{W_p}{365 \times 24} = 1.1 \text{ GW}$$

P_p : puissance perdue

W_d : énergie perdue

Série N°03

Exercice 01:

Sur un réseau électrique (230/400V, 50Hz) Sans neutre, on branche en étoile 3 récepteurs capacitifs identiques de résistance $R = 20\Omega$ en série avec une capacité $C = 20\mu F$

- 1) Déterminer l'impédance complexe de chaque récepteur (module et argument).
- 2) Estimer la valeur efficace des courants en ligne et leur déphasage par rapport aux tensions simples.
- 3) Calculer les puissances active, réactive consommées par le récepteur triphasé puis la puissance apparente.

Solution :

- 1) L'impédance complexe

$$Z = R - j \frac{1}{C\omega}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{C\omega}\right)^2} = 160.4\Omega$$

$$\arg(Z) = \arctg - \frac{1}{RC\omega} = -82,8^\circ$$

- 2) Valeur efficace des courants en ligne

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{230}{160,4} = 1,43A$$

$$\phi = -82.8^\circ \quad (\text{Déphasage})$$

- 3) Puissance active, réactive et apparente

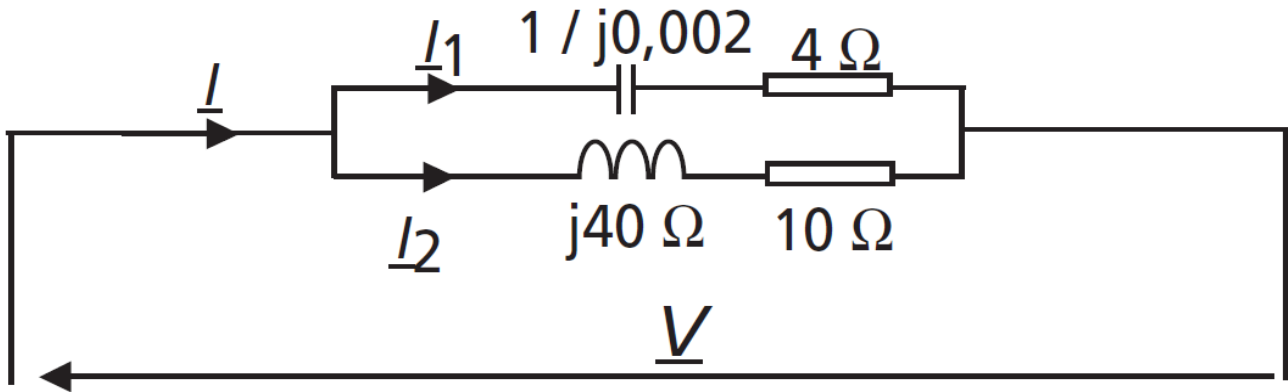
$$P = 3RI^2 = 123.3W$$

$$Q = -\frac{3I^2}{C\omega} = -981,6 \text{ VAR}$$

$$S = 3ZI^2 = 989,3VA$$

Exercice 02:

Sur la figure suivante on indique la valeur du courant absorbé $I = 2,5A$ et les valeurs des impédances :



- 1) Déterminer la valeur efficace V appliquée.
- 2) Déduire les valeurs I_1 et I_2 .
- 3) Déduire l'expression de la puissance active P et la puissance réactive Q consommées.

Solution :

1) On peut écrire les impédances complexes des branches comme suit :

$$Z_1 = 4 + \frac{1}{j0,002} = 4 - j50$$

$$Z_2 = 10 + j40$$

- On déduit l'impédance équivalente Z_{eq} :

$$Z_{eq} = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{2040 - j340}{14 - j10} = 107,8 + j52,7$$

On peut écrire :

$$V = Z_{eq} \times I = |Z_{eq}| \cdot I = \sqrt{107,8^2 + 52,7^2} \cdot I = 300V$$

2) C'est ainsi que l'on déduit :

$$I_1 = \frac{V}{Z_1} = \frac{300}{\sqrt{4^2 + 50^2}} = 6A$$

$$I_2 = \frac{V}{Z_2} = \frac{300}{\sqrt{10^2 + 40^2}} = 7,3A$$

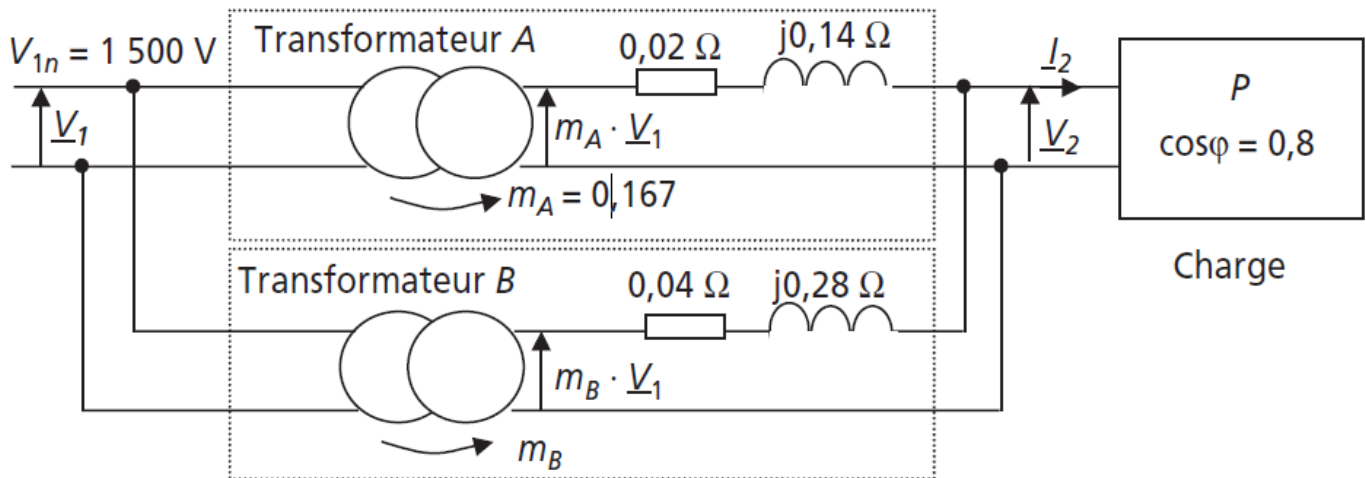
3) Calcul de P et Q :

$$P = 4 \cdot I_1^2 + 10 \cdot I_2^2 = 4 \times 6^2 + 10 \times 7,3^2 = 677W$$

$$Q = -50 \cdot I_1^2 + 40 \cdot I_2^2 = -50 \times 6^2 + 40 \times 7,3^2 = 311,5VAR$$

Exercice 03:

L'alimentation d'une charge demande plus de puissance alors le transformateur A ne peut en fournir pour cela on lui assure un autre transformateur B (figure) en parallèle.



- les deux transformateurs A et B présentent des puissances apparentes nominales :

$$S_{AN} = 24KVA \quad ; \quad S_{BN} = 12KVA$$

- 1) Lire et comprendre le schéma.
- 2) Quelle est la relation entre m_A et m_B (pour que aucun des deux transfo ne débite de courant à vide sans la charge).
- 3) Calculer les courant primaire nominaux I_{A1N} et I_{B1N}
- 4) Déduire les courants secondaires I_{A2N} et I_{B2N}

Solution :

- 1) Interpréter la figure.
- 2) Pour que aucun courant ne circule dans les secondaires de T_1 et T_2 (c'est-à-dire sans charge).

$$\rightarrow m_A \cdot V_1 = m_B \cdot V_1 \rightarrow m_A = m_B = 0,167$$

3)

$$I_{A1N} = \frac{S_{AN}}{V_{1N}} = \frac{24000}{1500} = 16A$$

$$I_{B1N} = \frac{S_{BN}}{V_{1N}} = \frac{12000}{1500} = 8A$$

4)

$$I_{A2N} = \frac{1}{m} I_{A1N} = 95,8A$$

$$I_{B2N} = \frac{1}{m} I_{B1N} = 47,9A$$

Série N°04

Exercice 01:

Sur un réseau électrique (230/400V, 50Hz) sans neutre, on branche en étoile 3 récepteurs capacitifs identiques de résistance $R = 20\Omega$ en série avec une capacité $C = 20 \mu\text{F}$

- a) Présenter le schéma représentatif ?
- b) Calculer l'impédance complexe de chaque récepteur (module et argument).
- c) Déterminer la valeur efficace des courants en ligne, et leur déphasage à la tension simple.
- d) Déterminer les puissances active et réactive consommées par le récepteur triphasé et la puissance apparente ?

Solution :

b) l'impédance complexe Z

$$Z = R - \frac{j}{\omega C}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} = 160.4\Omega$$

$$\arg(Z) = \arctg - \frac{1}{\omega RC} = -82.8^\circ$$

c) Valeur efficace des courants

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{230}{160.4} = 1.43A$$

Déphasage / tension simple

$$\phi_{V/I} = -82.8^\circ$$

d) Calcul des Puissance :

- Puissance active

$$P = 3RI^2 = 123.3W$$

- Puissance réactive :

$$Q = -3 \frac{I^2}{\omega C} = -3 \frac{I^2}{2\pi f C} = -98.5 \text{ VAR}$$

- Puissance apparente :

$$S = 3ZI^2 = 989.2 \text{ VA}$$

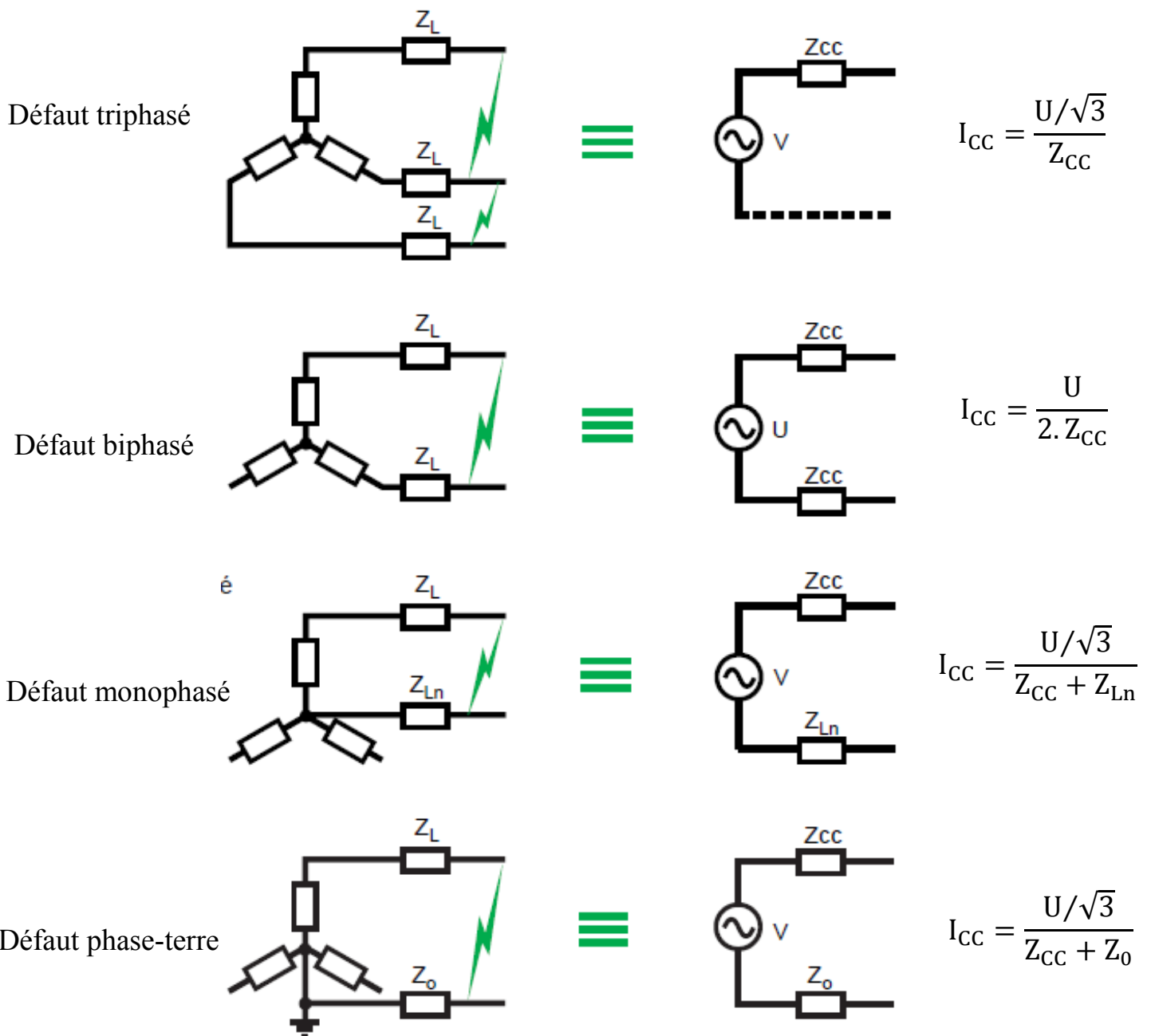
Titre indicatif : Calcul des I_{CC} par la méthode des impédances.

Avec : Z_L = impédance de la ligne

Z_{CC} = impédance de court-circuit

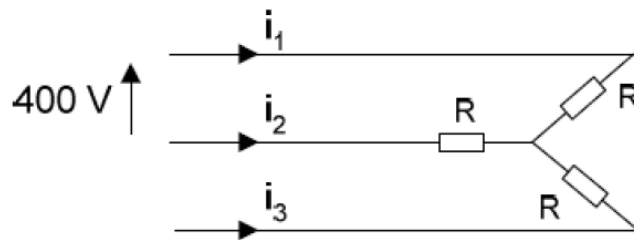
Z_0 = impédance de terre

Z_{Ln} = impédance du neutre



Exercice 02:

Soit un réseau triphasé ($U=400V$ entre phases; 50 Hz) alimentant un récepteur résistif (étoile sans neutre) avec $R=50\Omega$.



- 1) Calculer les valeurs efficaces de I_1 ; I_2 et I_3 .
- 2) Calculer la puissance active consommée par les 3 résistances ?
- 3) Un court-circuit c'est produit sur la phase 3 → déterminer les valeurs efficaces des 3 courants ?

Solution :

- 1) Valeurs efficaces :

$$I_1 = \frac{V}{R} = \frac{400}{\sqrt{3} \times 50} = 4,62A$$

De même pour I_2 et I_3 :

- 2) Calcul de puissance active consommée :

$$P = \sqrt{3}UI \cos \theta = \sqrt{3} \times 400 \times 4,62 \times 1 = 3200W$$

- 3) Court-circuit sur la phase 3

→ Donc aucun courant dans cette phase

Calcul des courants I_1 et I_2 :

$$I_1 = \frac{U}{R} = \frac{400}{50} = 8A$$

$$I_2 = \frac{U}{R} = \frac{400}{50} = 8A$$

$$I_3 = 0A$$

En l'absence de la phase 3 → on aura

$$I_1 = \frac{U}{2R} = \frac{400}{2 \times 50} = 4A$$

$$I_2 = \frac{U}{2R} = \frac{400}{2 \times 50} = 4A$$

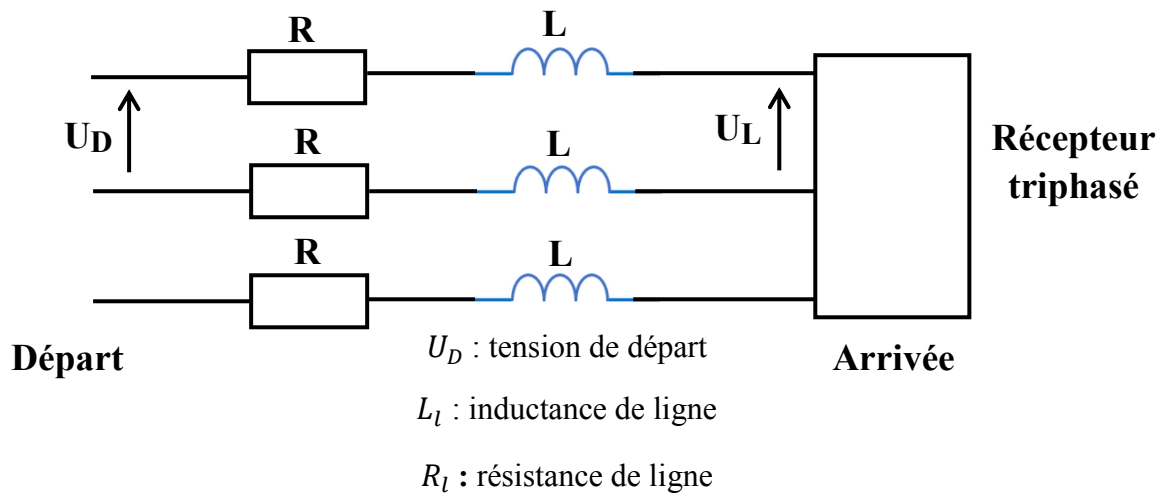
$$I_3 = 0A$$

Série N°05

Exercice 01: Chute de tension dans une ligne électrique.

Soit une ligne triphasée moyenne tension alimentant un récepteur triphasé équilibré qui consomme une puissance active $P = 4.20 \text{ MW}$ en imposant un facteur de puissance de 0.93.

- Chaque fil de ligne a une résistance $R = 2,43\Omega$ et une inductance $L = 11,2\text{mH}$
- la tension efficace entre phases à l'arrière de la ligne $U_A = 20\text{KV}$ ($f=50\text{Hz}$) (figure)



- 1) Calculer le courant efficace d'un fil de ligne.
- 2) Calculer pour la ligne la puissance active et réactive consommée.
- 3) "Pour l'ensemble (ligne +récepteur) calculer la puissance active, réactive et apparente consommée.
- 4) Calculer la chute de tension ΔU due à la ligne, puis tirer la valeur efficace de la tension entre phases (au départ).

Solution :

1)
$$P = \sqrt{3} UI \cos \theta$$

$$\rightarrow I_{eff} = \frac{P}{\sqrt{3} U \cos \theta} = \frac{4,2 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 20 \times 10^3 \times 0,93} = 129,25A$$

2) La puissance active :

$$P_L = 3RI^2 = 3 \times 2,43 \times 129,25 = 121,18KW$$

La puissance réactive :

$$Q_L = 3 \times 2\pi fLI^2 = 3 \times 2\pi \times 11,2 \times 10^{-3} \times 50 \times 129,25^2$$

$$Q_L = 176,358KVAR$$

3)

$$P_T = P_L + P = 121,8 + 4200 = 4,32MW$$

$$Q_T = Q_L + \sqrt{3}UI \sin \theta = 1728,5KVAR$$

$$S_T = \sqrt{P_T^2 + Q_T^2} = 4.65MVA$$

4)

$$S_T = \sqrt{3} U_D I \rightarrow U_D = \frac{S_T}{\sqrt{3} \cdot I} = 20792V$$

$$\text{D'où } \Delta U = U_D - U = 20792 - 20000 = 792V$$

Références bibliographiques :

1. Michel Aguet et Mircea Lanovici, "Haute Tension", Éditions Georgie Saint-Saphorin, Suisse, 1982.
2. A. Blajkine et Coll., "Electrotechnique Générale", Éditions Mir, Moscou, 1977.
3. E. Kuffel et Abdullah, "High Voltage Engineering", Pergamon Press Ltd, 1978.
4. Fred Gardiol, "Électromagnétisme", Éditions Georgie Saint-Saphorin, Suisse, 1979.
5. A. Timaltine, "Technique de la HT", Université Djillali Liabès, Sidi Bel Abbès, 1998.
6. FOFANA, "L'Ingénieur de la HT", Université du Québec, Canada, 2001.
7. D. Kind et H. Kärner, "High-Voltage Insulation Technology", Eriedr and Sohn, 1985.
8. P. Bergounioux, "Haute Tension", Éditions William Blake & Co., 1997.
9. M. Abdel-Salam et A. El-Morshedy, "High Voltage Engineering: Theory and Practice", Marcel Dekker, Inc., 2000.
10. R. Arora et W. Mosch, "High Voltage and Electrical Insulation Engineering", Wiley, 2011.
11. H. W. Dommel, "EMTP Theory Book", Microtran Power System Analysis Corporation, 1992.
12. C. L. Wadhwa, "High Voltage Engineering", New Age International, 2006.
13. J. Kuffel, E. Kuffel, and W. S. Zaengl, "High Voltage Engineering Fundamentals", Elsevier, 2nd Edition, 2000.
14. A. Haddad et D. Warne, "Advances in High Voltage Engineering", Institution of Engineering and Technology, 2004.
15. A. Greenwood, "Electrical Transients in Power Systems", Wiley-Interscience, 1991.
16. J. A. Martinez-Velasco, "Transient Analysis of Power Systems", Wiley-IEEE Press, 2008.
17. M. H. Rashid, "Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications", Pearson, 2013.
18. S. Rao, "EHV-AC, HVDC Transmission and Distribution Engineering", Khanna Publishers, 1999.
19. M. O. Durham et R. Brudzinski, "Electrical Systems for Power Utility Engineers", CRC Press, 2019.
20. A. Haddad, "High Voltage Engineering and Testing", 3rd Edition, Institution of Engineering and Technology, 2018.
21. A. Haddad et D. Warne, "Advances in High Voltage Engineering", 3rd Edition, Institution of Engineering and Technology, 2020.
22. M. Chiesa et S. Ceccarelli, "High Voltage Direct Current (HVDC) Power Transmission", Springer, 2021.

23. S. M. Shafiul Alam et R. Ampadu, "Insulation Coordination for Power Systems", Elsevier, 2021.
24. T. J. Gallagher et P. G. Ryan, "High Voltage Engineering and Testing", 4th Edition, Institution of Engineering and Technology, 2022.
25. X. Liu et al., "High Voltage DC Grid Technology and System Design", Academic Press, 2023.