

**Figure. 1 :** Voyage de l'électricité à travers les réseaux électriques de la centrale qui la produit à l'endroit où on l'utilise.

### 2.1 : Le réseau électrique

Après avoir produit l'électricité par un des procédés présentés au chapitre 1, il faut encore la transporter vers les maisons (les usines ou autres) à l'aide d'un réseau d'énergie électrique - système qui comprend le transport, la répartition et la distribution de l'énergie.

Historiquement, les réseaux électriques sont apparus vers la fin XIXe siècle avec Thomas Edison qui a réalisé un réseau de distribution en courant continu. Lucien Gaulard et John Gibbs ont mis au point en 1884 un transformateur de forte puissance utilisant du courant alternatif triphasé, permettant de changer facilement le niveau de tension. George Westinghouse, ingénieur et entrepreneur américain, a acheté en 1887 les brevets du transformateur de Gaulard et embauché Nikola Tesla qui inventa l'alternateur triphasé en 1891.

A cette période, aux états unis, un conflit a opposé Thomas Edison à Nikola Tesla. Edison a développé des systèmes en courant continu à 110 V qu'il estimait être plus sûr que l'alternatif. Tesla, défenseur du courant alternatif, a préféré la tension de 240 V, meilleur pour le transport sur de longues distances. Il a aussi estimé que la fréquence de 60 Hz était celle qui permettait d'obtenir le meilleur rendement pour les générateurs de courant alternatif. En Europe, la compagnie allemande AEG qui a mis en place le premier service de production d'électricité a opté pour le 50 Hz. Bénéficiant du monopole, elle a diffusé ce standard sur tout continent. Et jusqu'à la deuxième guerre mondiale on utilisait le 110 V en Europe, au Japon et aux États-Unis.

Depuis les années 1960, les pays européens utilisent le 220V sous 50Hz, alors qu'aux états unis, c'est toujours le 110V à 60Hz qui est en service. Ainsi, il apparaît que les

valeurs de la tension et de la fréquence de distribution de l'électricité sont dues davantage à la tradition qu'à des considérations techniques.

### 2.2 : Transport de l'énergie électrique

La puissance transportée par une ligne électrique est proportionnelle au courant électrique et à la tension :

$$P = U.I$$

Mais les lignes s'échauffent sous l'action du courant qui les traverse et de la résistance des câbles. La puissance de la chaleur  $P_c$  produite par effet Joule vaut :

$$P_j = R.I^2$$

Les producteurs d'électricité comme Sonelgaz doivent transporter le maximum de puissance dans une ligne électrique pour ne pas multiplier les infrastructures. Ils peuvent choisir entre des lignes à haut courant ou des lignes à haute tension.

Si on considère le transport de 200 MW requis pour alimenter une ville de 100 000 foyers, il faudrait pour une ligne de très haute tension à 400 kV un courant de 500A. Pour une ligne de moyenne tension à 20 kV, il aurait fallu un courant de 10 000 A.

Les câbles métalliques utilisés dans les lignes haute tension ont une résistance d'environ 0.05 Ω/km, soit 5Ω pour 100 km. La puissance dissipée sous forme de chaleur au bout de 100 km serait donc :

$$\text{À très haute tension : } 5 \times (500)^2 = 1,25 \text{ MW}$$

À moyenne tension :  $5 \times 10^8 = 500 \text{ MW}$ , ce qui n'a pas de sens puisque toute l'énergie aurait été transformée en chaleur après 50 km seulement, et, sous l'action de cette

chaleur, les câbles auraient tous fondu !

Sur les lignes haute tension utilisées par Sonelgaz, on perd 1,25 MW au bout de 100 km, soit près de 0.7 % de l'énergie totale (et la température des câbles peut s'élever jusqu'à 80°C).

L'exemple précédent montre pourquoi on utilise des lignes à très haute tension (400.000 Volts) reliées entre elles pour former le réseau de transport d'électricité qui couvre tout le pays.

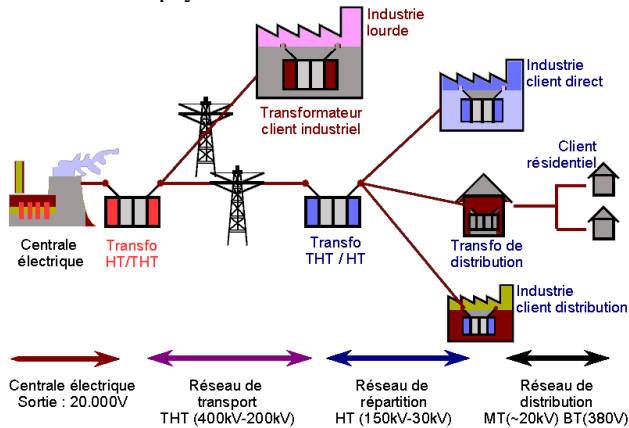


Figure 2 : Transport et distribution de l'électricité

Comme on ne peut pas utiliser de l'électricité à THT directement dans les usines ou les maisons, on abaisse de façon progressive la tension tout au long du trajet à travers des transformateurs répartis sur le réseau (figure 2). Les valeurs des THT utilisées pour le transport de l'électricité varient d'un pays à l'autre. Au Canada, on utilise du 800 kV, en Chine 1100 kV et en Inde 1200 kV. En Russie, des essais de transport en «Ultra Haute Tension» ont été effectués en 1 500 kV (mais cela n'a pas été mis en service pour des questions de rentabilité). On distingue le réseau national de transport à (400kV-200kV), des réseaux de répartition régionaux (150kV-30kV) et des réseaux de distribution de l'énergie aux clients.

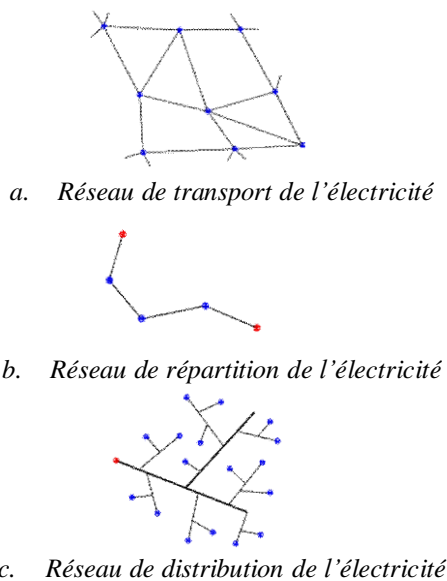


Figure 3 : Principaux types de réseaux

Le réseau de transport permet d'acheminer à l'échelle nationale des quantités importantes d'énergie sur des grandes distances. Il est basé sur une structure maillée

(figure 3.a) qui garantit une très bonne sécurité d'alimentation : la perte de n'importe quel élément qu'il soit ligne électrique, transformateur ou groupe de production, n'entraîne aucune coupure d'électricité.

Les réseaux de répartition assurent à l'échelle régionale la fourniture d'électricité, soit à partir du réseau de transport via des transformateurs, soit à partir de centrales électriques de moyennes puissances (<100 MW). Ils sont distribués de manière assez homogène sur le territoire d'une région et ont une structure bouclée (figure 3.b).

Les réseaux de distribution servent à alimenter les clients. Pour la consommation industrielle, on a un réseau MT (moyenne tension : 3 à 33 kV) et pour la consommation domestique on a un réseau à basse tension (220V). Ces réseaux ont une structure arborescente (figure 3.c) : à partir d'un poste source (alimenté par le réseau de répartition), l'électricité parcourt une artère sur laquelle sont reliées des branches de dérivation qui conduisent aux postes MT/BT de distribution publique, qui alimentent les réseaux basses tensions sur lesquels sont raccordés les plus petits consommateurs. La structure arborescente de ces réseaux implique qu'un défaut sur une ligne électrique MT entraîne la coupure des clients alimentés par cette ligne, même si des possibilités de secours plus ou moins rapides existent.



Figure 4 : Réseau de distribution vers les foyers

Les réseaux BT résultant de la structure des réseaux MT, pour la distribution du 220V dans les foyers, on ces réseaux utilisent souvent une distribution triphasée avec neutre : 3 câbles de phase et 1 câble de neutre (figure 4).

L'électricité produite par les centrales ne se stocke pas. Aussi, pour ajuster très précisément la production à la demande, le réseau s'appuie sur des dispatchings, centres de répartition de l'électricité. Des prévisions de consommation définissent les besoins théoriques et des ajustements ont lieu en permanence pendant la journée.

Il est à noter que la demande en électricité varie constamment au cours d'une journée en fonction des horaires de travail, du jour et de la température. D'autres critères entrent également en ligne de compte comme les périodes de congé, les jours de la semaine, la saison en cours et des événements du calendrier.

### 2.3 Les postes électriques

Un poste électrique est un élément du réseau électrique servant à la fois à la transmission et à la distribution d'électricité. Il permet d'élever la tension électrique pour

## Module : Etat de l'art de Génie Electrique

sa transmission, puis de la redescendre en vue de sa consommation par les utilisateurs. Les postes électriques se trouvent aux extrémités des lignes de transmission ou de distribution. On trouve 5 types de postes électriques comme schématisé sur la figure 6 .

- Le poste de sortie de centrale (P1) sert à raccorder la centrale de production électrique au réseau.
- Les postes d'interconnexion (P-2) ont pour fonction d'interconnecter plusieurs lignes électriques.
- Les postes élévateurs (P-3) ont pour but de monter le niveau de tension, à l'aide d'un transformateur
- Les postes de répartition (P-4) et les postes de distribution (P-5) servent à abaisser le niveau de tension pour distribuer l'énergie électrique aux clients résidentiels ou industriels.

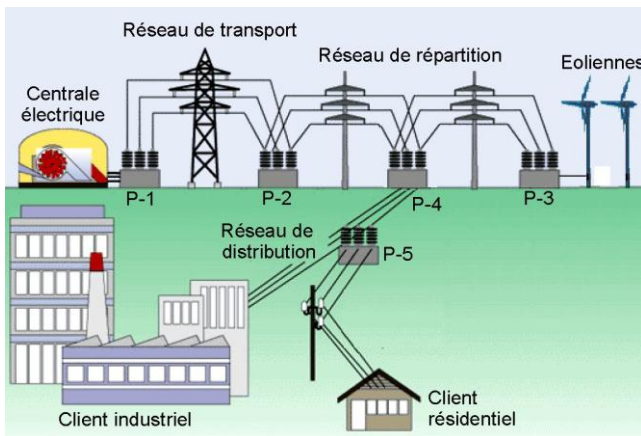


Figure 6 : Les différents postes électriques

- P1 : Poste de sortie de centrale
- P-2 : Poste d'interconnexion
- P-3 : Poste élévateur
- P-4 : Poste de répartition
- P-5 : Poste de distribution

### 2.4 Les lignes électriques

Les lignes électriques assurent la fonction "transport de l'énergie" sur les longues distances. Elles peuvent être aériennes ou souterraines. L'enfouissement permet de protéger les lignes des effets du climat (tempêtes ou chutes de neige) et de respecter l'environnement. Le parcours d'une ligne électrique aérienne suit rarement une ligne droite car il tient compte des paramètres environnementaux (forêts, chotts, dunes, habitations...). Une ligne électrique aérienne est constituée de un ou plusieurs ternes (un terna est un ensemble de 3 câbles transportant chacun une phase électrique). La ligne représentée sur la figure 7 comporte 2 ternes (1 et 2) qui transportent chacun les phases A, B et C. Dans certains pays comme le Japon ou l'Allemagne, les pylônes électriques supportent jusqu'à 8 ternes. Sur la fig-14, les pylônes qui supportent la ligne ont un 7 câble : le câble de garde G attaché directement au pylône. Ce câble qui relié à la terre, ne transporte pas de courant et est situé au-dessus des conducteurs. C'est une sorte de paratonnerre qui sert à attirer la foudre quand elle tombe pour qu'elle

## Cour : distribution de l'électricité

ne frappe pas les 3 phases de la ligne. De même, pour éviter les accidents aériens, des dispositifs lumineux sont placés sur les lignes pour les signaler aux pilotes d'avions ou d'hélicoptères.

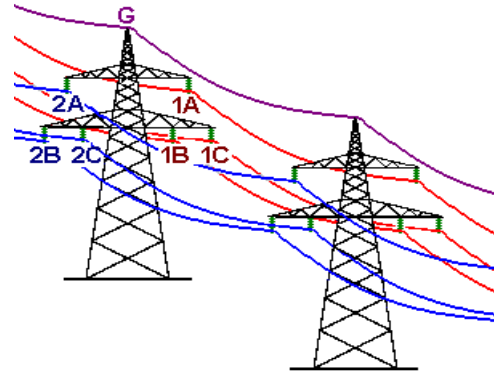


Figure 7 : Ligne à 2 ternes.

Les pylônes sont réalisés en treillis d'acier (figure 8). Ils servent à supporter et à maintenir les conducteurs à une distance suffisante du sol et des obstacles : ceci permet de garantir la sécurité et l'isolement par rapport à la terre.

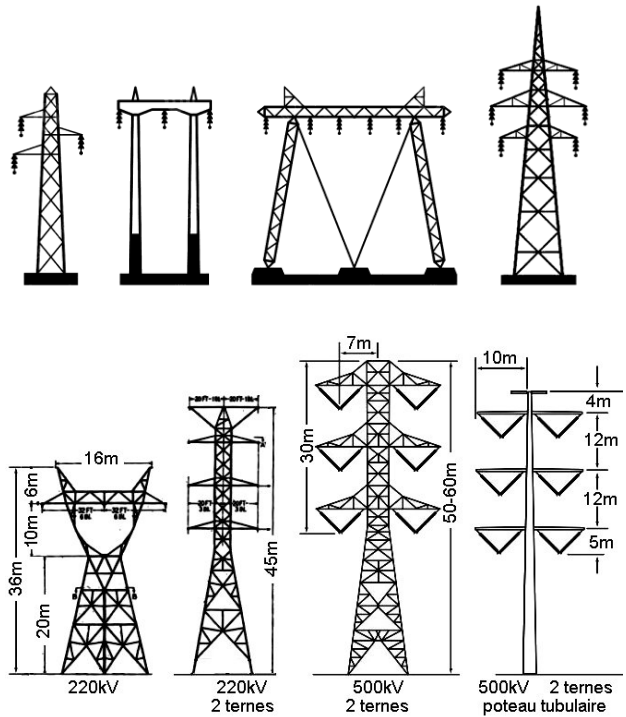


Figure 8 : Aspect des pylônes pour différentes lignes.

Distances en mètres	Tension			
	70 kV	150 kV	220 kV	380kV
Au-dessus du sol	6.20	7.0	7.70	9.30
Le long d'une route	7.20	8.0	8.70	10.30
Traversée d'une route	8.20	9.0	9.70	11.30
Croisement d'une ligne B.T., H.T.	2.20	3.0	3.70	5.30
Surplomb d'une maison	3.70	4.50	5.20	6.80
Surplomb d'une antenne	3.20	4.0	4.70	6.30
Surplomb de chemin de fer électrifié	13	13	13	13

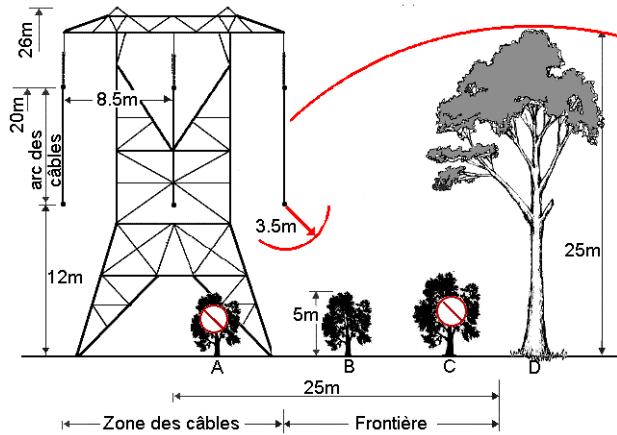


Figure 9 : Distance de sécurité entre la ligne et un obstacle

Des isolateurs en verre, en céramique ou en matériau synthétique résistant aux tensions élevées, permettent de relier les câbles conducteurs aux pylônes. Les isolateurs sont munis d'éclateurs constitués de 2 pointes métalliques se faisant face à une distance suffisante pour garantir la tenue de tension en régime normal. Si la foudre frappe la ligne électrique : un arc électrique va s'établir au niveau de l'éclateur et contourner l'isolateur. Sans l'éclateur, la surtension entre le pylône et la ligne électrique foudroyée détruirait l'isolateur. Les isolateurs qui ont la forme d'une assiette, sont associés pour former des chaînes d'isolateurs (figure 10). Plus la tension de la ligne est élevée, plus le nombre d'isolateurs dans la chaîne est important. Sur une ligne 400kV, les chaînes d'isolateurs comportent 19 assiettes. En regardant une ligne, on peut estimer la tension qu'elle transporte en multipliant le nombre d'isolateurs par ~20kV.

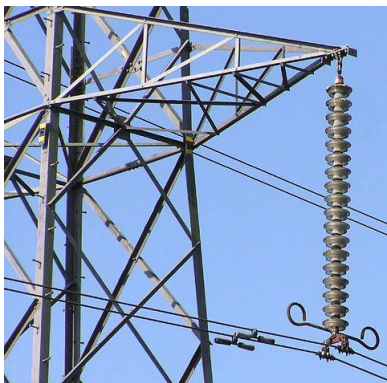


Figure 10 : Chaîne d'isolateurs sur un pylône de THT.

L'amortisseur de Stockbridge est un dispositif en forme d'haltère composé de deux masses (1) aux extrémités d'un morceau de câble (2) serrée en son milieu sur le câble principal (3). Cet amortisseur sert à dissiper l'énergie des oscillations produite par le vent dans le câble principal. On le surnomme "dog-bone damper" (amortisseur os de chien).

L'effet corona ou effet couronne est une décharge électrique entraînée par l'ionisation du milieu entourant un conducteur. Il se produit lorsque le potentiel électrique dépasse une valeur critique sans que les conditions ne permettent l'apparition d'un arc électrique. Les décharges de corona peuvent produire des bruits audibles et des

perturbations sur les fréquences radio, en particulier à proximité des lignes à haute tension. Elles représentent également une perte de puissance. Par ailleurs, les réactions qu'elles provoquent dans l'atmosphère pourraient avoir un impact sur la santé. Dans les installations électriques (transformateurs, machines, moteurs, elles endommagent progressivement les isolants amenant à une détérioration prématurée des équipements C'est pourquoi les installations de transmission électrique sont conçues pour minimiser la formation des décharges de corona.

Sur les lignes, la réduction de la décharge corona n'est requise que si le niveau de tension de la ligne dépasse 345 kV, principalement pour réduire le coût économique des pertes en ligne. On y arrive en utilisant des faisceaux de plusieurs conducteurs comme montré sur la figure 11. Un câble conducteur peut être constitué d'un ensemble de 1 à 4 faisceaux comportant chacun plusieurs conducteurs. Le câble schématisé sur la figure 11 comporte 3 faisceaux électriques séparés de quelques centimètres par un isolant pour limiter l'effet couronne (qui génère des pertes en lignes).

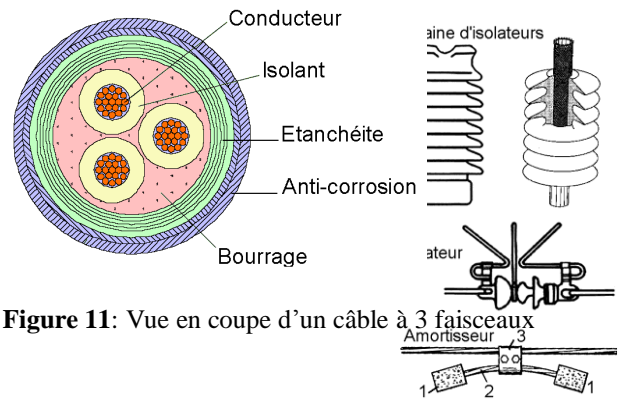


Figure 11: Vue en coupe d'un câble à 3 faisceaux

Les câbles utilisés dans les lignes actuelles sont à base d'alliage d'aluminium en remplacement du cuivre utilisé dans les vieilles installations pour 3 raisons principales :

- du point de vue économique, il est plus disponible et coûte moins cher que le cuivre.
- du point de vue mécanique, il est 3 fois plus léger que le cuivre et sa résistance mécanique est meilleure.
- du point de vue chimique, il résiste mieux à la corrosion que le cuivre.

Le diamètre des câbles de haute tension vaut 3 cm et celui des câbles de garde qui servent de protection contre la foudre, 15 mm. A proximité des aéroports, ces câbles doivent rester visibles de jour comme de nuit. En journée, il suffit d'accrocher le long du câble des boules aux couleurs vives. Ces balises alternativement rouges ou blanches, sont en fibre de verre, avec un diamètre

## Module : Etat de l'art de Génie Electrique

compris entre 60 cm et plus de 1.2m parfois.



Figure 12 : Balises diurnes

De nuit on utilise des balises qui émettent une lueur rouge (teinte normalisée en aviation pour ce type d'usage). Leur principe de fonctionnement schématisé ci-dessous utilise un phénomène habituellement considéré comme un défaut.

## Cour : distribution de l'électricité

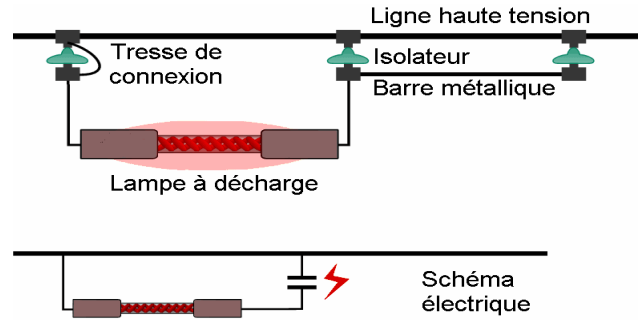


Figure 13 : Balises nocturnes

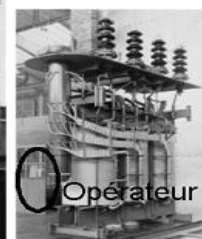
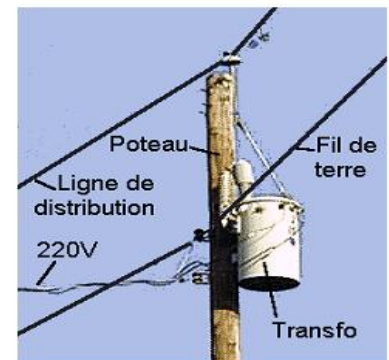
Les câbles à haute tension créent un champ électrique autour d'eux. Quand un conducteur de quelques mètres de longueur, isolé est disposé de parallèlement au câble haute tension, il aura un potentiel différent de celui de la ligne. L'ensemble constitue un condensateur chargé à travers l'air (fuites à travers son diélectrique). On exploite la charge accumulée pour enclencher une lampe à décharge. La particularité du système est sa façon de s'alimenter directement depuis le seul câble où il a été posé. Ce balisage fiable et durable produit une luminosité insuffisante de jour mais très visible de nuit.



Transformateur 400kV / 130kV



230kV / 13.8kV



33 / 11kV



20 / 0.4kV

Figure 5 : Les dimensions et l'aspect des postes électriques varie fortement suivant leurs fonctions. Les postes peuvent être en surface à l'intérieur d'une enceinte, souterrains, dans des bâtiments qu'ils desservent, ou sur des

### 2.5 Transformateurs spéciaux

Dans les applications industrielles, on rencontre un grand nombre de transformateurs de construction spéciale. La plupart possèdent les propriétés de base que nous avons étudiées dans le chapitre précédent :

1. La tension induite dans un enroulement est proportionnelle au nombre de spires ;
2. Lorsque le transformateur est en charge, les ampères-tours du primaire sont égaux aux ampères-tours du secondaire ;
3. Le courant d'excitation est négligeable par rapport à la valeur du courant de pleine charge du primaire.

Cependant, lorsque le couplage entre le primaire et le secondaire est relativement faible, et lorsque le courant d'excitation est élevé, ces relations ne tiennent plus.

Dans ces circonstances, on doit utiliser le circuit équivalent complet pour décrire le comportement du transformateur. Nous étudierons vers la fin de ce chapitre les propriétés de ce type de transformateur. Cette analyse est particulièrement utile car elle nous permettra de comprendre les circuits couplés quelconques.

2.5.1 Transformateur à secondaire double

La plupart des transformateurs destinés à la distribution de l'énergie électrique chez les clients domiciliaires ont un enroulement à haute tension (le primaire) et un double enroulement à basse tension. Les deux secondaires sont raccordés en série de sorte que la tension entre chacun des fils extérieurs et le fil central est de 120 V, tandis qu'elle est de 240 V entre les deux fils extérieurs figure 6.

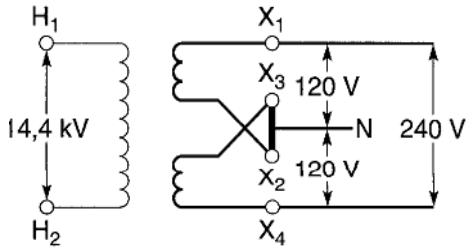


Figure 6 : Transformateur de distribution à secondaire double de 14,4 kV à 240/120 V

2.5.2 Autotransformateurs

On appelle autotransformateur, un transformateur composé d'un enroulement unique monté sur un noyau d'acier. La haute tension est appliquée à l'enroulement complet et la basse tension est obtenue entre une extrémité de l'enroulement et une prise intermédiaire.

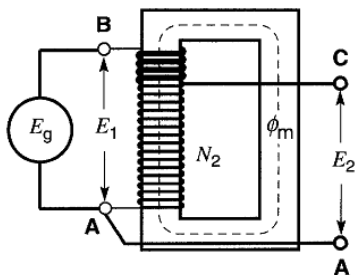


Figure 7 : autotransformateur

2.5.3 Transformateur de tension

Les transformateurs de tension sont des transformateurs de haute précision dont le rapport de transformation varie très peu avec la charge. De plus, la tension secondaire est en phase avec la tension au primaire à une fraction de degré près. Les transformateurs de tension sont utilisés sur les lignes à haute tension pour alimenter des appareils de mesure (voltmètres, wattmètres, etc.) ou de protection (relais). Ils servent (1) à isoler ces appareils de la haute tension et (2) à les alimenter à des tensions appropriées. Le rapport de transformation est choisi de façon que la tension secondaire soit d'une centaine de volts, ce qui permet l'utilisation d'instruments de fabrication courante (0-150 V) pour la mesure de tensions élevées (figure 8).

Le primaire des transformateurs de tension est branché en parallèle avec le circuit dont on veut connaître la tension.

Cour : distribution de l'électricité

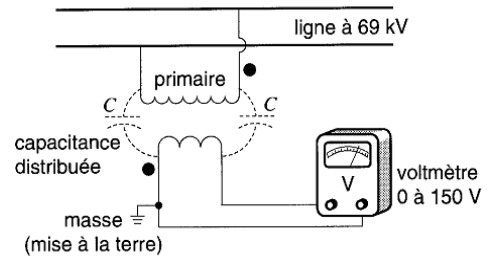


Figure 8. transformateur de tension

2.5.4 Transformateur de courant

Les transformateurs de courant sont des transformateurs de haute précision dont le rapport de transformation demeure essentiellement constant même lorsque la charge au secondaire varie. On atteint un haut niveau de précision en réduisant au minimum le courant d'excitation. Les transformateurs de courant sont utilisés pour ramener à une valeur facilement mesurable les courants intenses des lignes à haute ou à basse tension. Ils servent aussi à isoler les appareils de mesure ou de protection des lignes à haute tension. Le primaire de ces transformateurs est monté en série avec la ligne dont on veut mesurer le courant (figure 9).

Ces transformateurs sont employés seulement pour fins de mesure et de protection ; donc leur capacité est faible et est normalement de l'ordre de 15 à 200 VA.

Comme pour les transformateurs conventionnels, le rapport de transformation du courant est inversement proportionnel au rapport des nombres de spires du primaire et du secondaire. Un transformateur de courant ayant un rapport de 150 A/5 A a donc 30 fois plus de spires au secondaire qu'au primaire. Le courant nominal du secondaire est généralement de 5 A ou 1 A.

L'emploi des transformateurs de courant sur les lignes à haute tension est indispensable pour des raisons de sécurité.

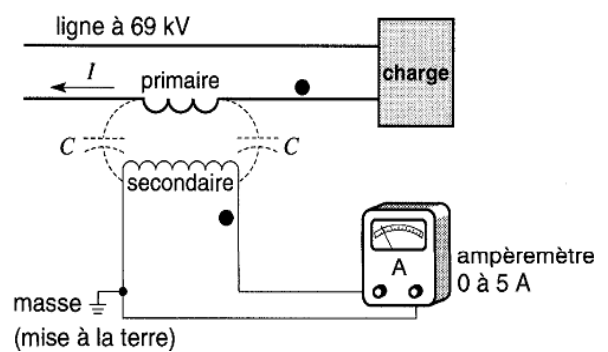


Figure 9 : transformateur de courant