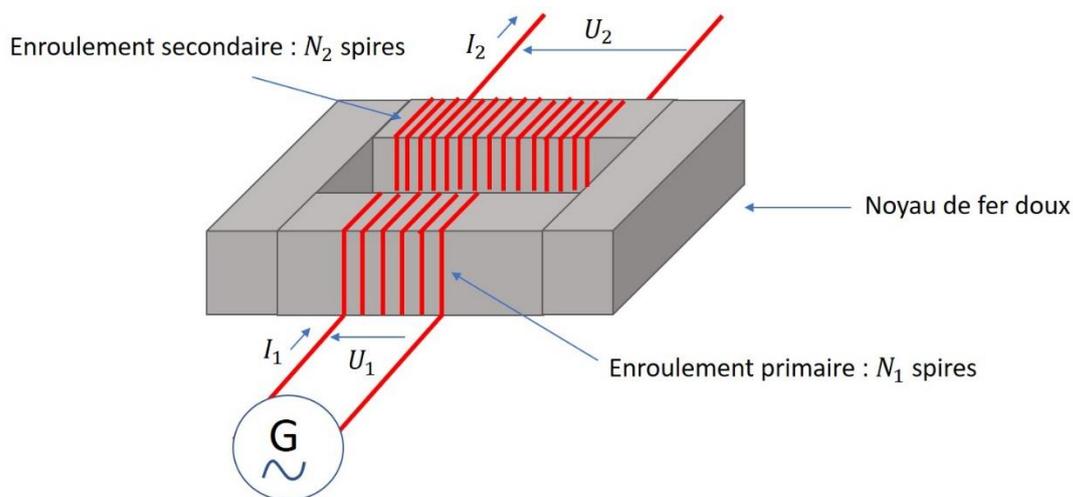


Le transformateur et son intérêt pour le transport de l'électricité

I Le principe d'un transformateur

Un transformateur est constitué de deux **enroulements** réalisés sur une même pièce appelée **fer**. L'enroulement qualifié de **primaire** est celui relié à la source de courant alternatif, l'autre enroulement, qualifié de **secondaire** étant celui relié à la charge. Nous considérerons ici un transformateur élévateur de tension, où l'enroulement primaire est celui ayant le plus petit nombre de spires.

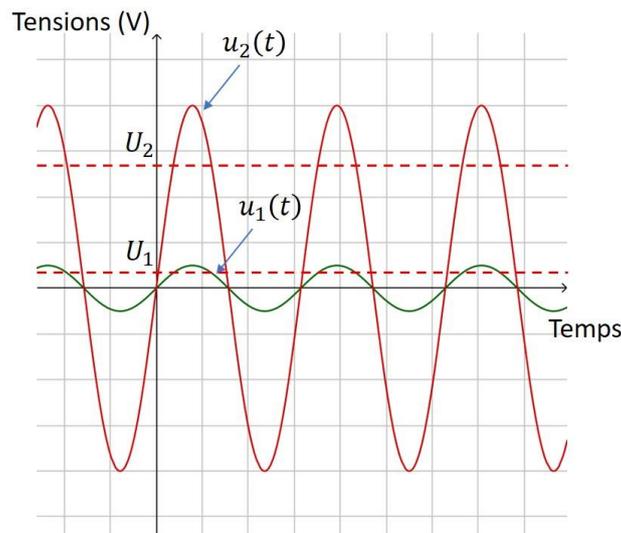


Lorsqu'on fait passer un courant dans l'enroulement primaire en le reliant à un générateur, cela a pour effet de magnétiser le fer, comme dans le cas d'un électroaimant. Le noyau de fer a alors pour rôle de propager instantanément (quasiment) cette aimantation jusqu'à la région comprenant le second enroulement.

Toutefois, si on se fait passer un courant continu dans l'enroulement primaire, il n'apparaîtra aucun courant dans l'enroulement secondaire en supposant ce dernier fermé sur un dipôle. En effet, c'est le même phénomène que l'on observe lorsqu'un aimant est maintenu immobile devant ou au sein d'une bobine fermée sur un galvanomètre. Pour qu'un courant apparaisse dans ce dernier cas, il faut faire bouger l'aimant devant ou au sein de la bobine. Mais on peut aussi placer une seconde bobine fixe devant la première et l'alimenter avec une tension variable. Cela aura aussi pour effet de faire varier le flux magnétique à travers la première bobine et d'y induire un courant.

Un transformateur ne peut donc transférer une tension à l'enroulement secondaire que si l'enroulement primaire se trouve soumis à une **tension variable**. Le plus souvent, cette tension est sinusoïdale. On observe alors que la tension aux bornes de l'enroulement secondaire est égale à tout instant à celle de l'enroulement primaire multipliée par un **facteur m appelé rapport de transformation** et que ce rapport de transformation n'est autre que le rapport du nombre de spires de l'enroulement secondaire au primaire. Soit mathématiquement :

$$m = \frac{N_2}{N_1}, \quad u_2(t) = m u_1(t)$$



On rappelle qu'en régime de tensions sinusoïdales (il suffit pour cela que le générateur produise une tension sinusoïdale), les intensités sont également sinusoïdales dans toutes les branches, et on raisonne comme si on avait affaire à des tensions et des intensités continues qu'on dit efficaces.

La **tension efficace** associée à une tension sinusoïdale est la tension continue qu'il faudrait appliquer à un résistor pour obtenir la même dissipation énergétique sur une période que celle que donnerait la tension sinusoïdale. On démontre que cette tension vaut :

$$U = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}}$$

Où U_{max} est la valeur maximum de la tension sinusoïdale encore appelée **tension crête**.

Dans le cas du transformateur, c'est le même facteur qui opère sur les tensions efficaces de l'enroulement primaire et de l'enroulement secondaire, soit :

$$U_2 = m U_1$$

La puissance fournie par le générateur (énergie électrique par unité de temps exprimée en watts) et transmise à l'enroulement primaire (à ses porteurs de charges mobiles que sont les électrons) est :

$$P_1 = U_1 I_1$$

La puissance fournie par l'enroulement secondaire, qui se comporte comme un second générateur, au reste du circuit secondaire est :

$$P_2 = U_2 I_2$$

Le rendement du transformateur est alors :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I_2}{U_1 I_1} = m \frac{I_2}{I_1}$$

Toutefois, une partie de l'énergie reçue par les électrons de l'enroulement primaire via le générateur se trouve dissipée dans le transformateur sous forme de :

- **Pertes cuivres** : c'est l'effet Joule dans les enroulements de cuivre
- **Pertes fer** : Le noyau de fer est le siège de courants induits lesquels s'opposent à la cause qui leur a donné naissance (loi de Lenz) en freinant les électrons de l'enroulement primaire. Le noyau de fer s'échauffe sous l'action de ces courants induits, **dissipant** ainsi de l'énergie.

On peut résumer le bilan de puissance sous la forme suivante :

$$P_1 = P_2 + P_{cuivre} + P_{Fer}$$

Où P_{cuivre} est la puissance dissipée sous forme thermique dans les enroulements primaires et secondaires et P_{Fer} la puissance dissipée sous forme thermique dans le noyau de fer.

Expérience faite au lycée pour mesurer le rendement de deux transformateurs 6 V- 48 V.

Ces deux transformateurs sont identiques avec un rapport de transformation de 8. Nous avons réalisé le montage suivant, qui sera repris plus loin pour expliquer l'intérêt du transport de l'électricité à haute tension :

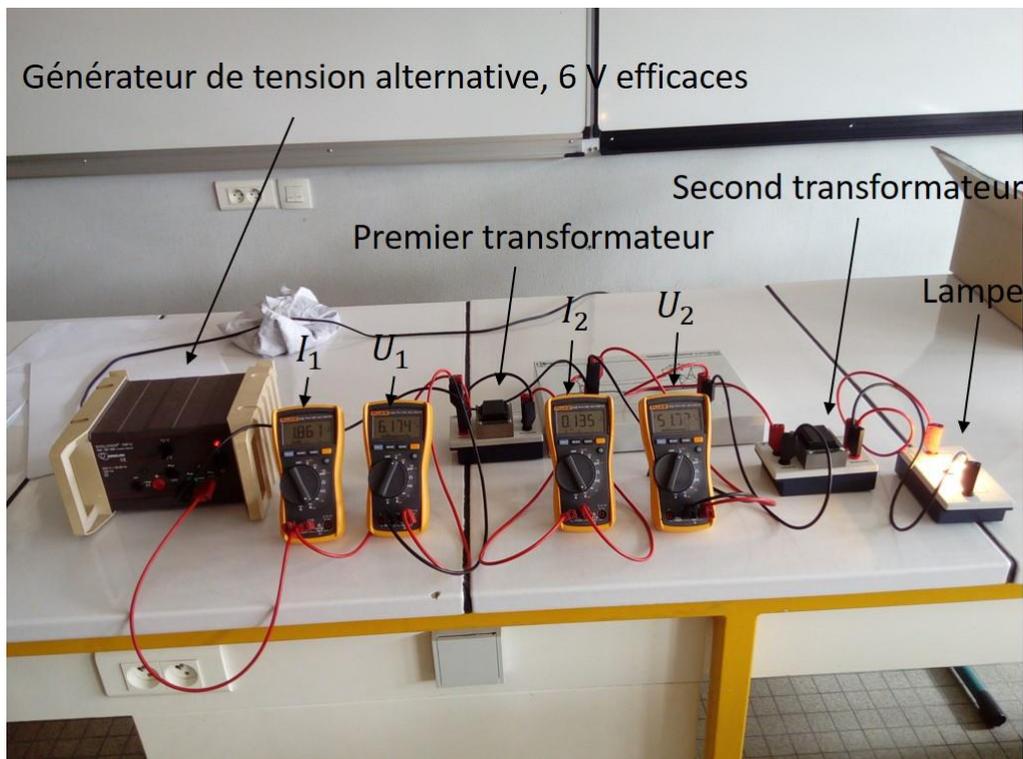


Figure 1

Pour le premier transformateur, nous avons observé (voir indication des multimètres) :

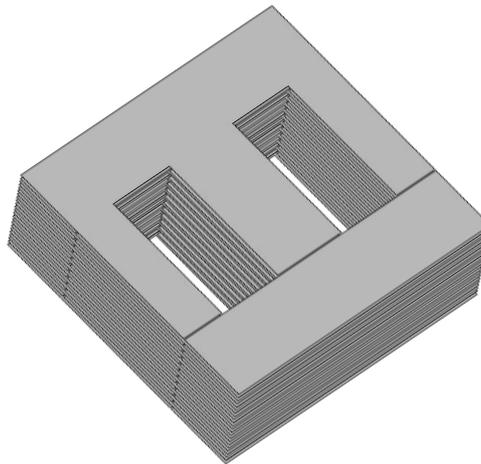
$$U_1 = 6,174, I_1 = 1,861, U_2 = 51,73, I_2 = 0,135$$

D'où le rendement :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I_2}{U_1 I_1} = 61 \%$$

Pour le second, nous avons observé un rendement plus élevé de 71 %. Cela s'explique par le fait que les intensités étaient de l'ordre de dix fois plus faibles que pour le premier, ce qui engendre moins de pertes cuivres et améliore le rendement.

Afin d'améliorer le rendement des transformateurs, on réalise le noyau de fer par empilement de lamelles séparées les unes des autres par un isolant, ce qui permet de limiter très fortement les pertes fer par courants induits.



Feuilletage d'un noyau de fer par empilement de lamelles

Les transformateurs qui font partie du réseau de distribution de l'électricité produite par les centrales électriques ont **d'excellents rendements proches de 100%** (99 à 99,5 %). Dans ce cas, l'intensité au secondaire, est pratiquement divisée par le rapport de transformation et l'enroulement secondaire transfère au circuit secondaire quasiment l'intégralité de la puissance reçue par l'enroulement primaire.

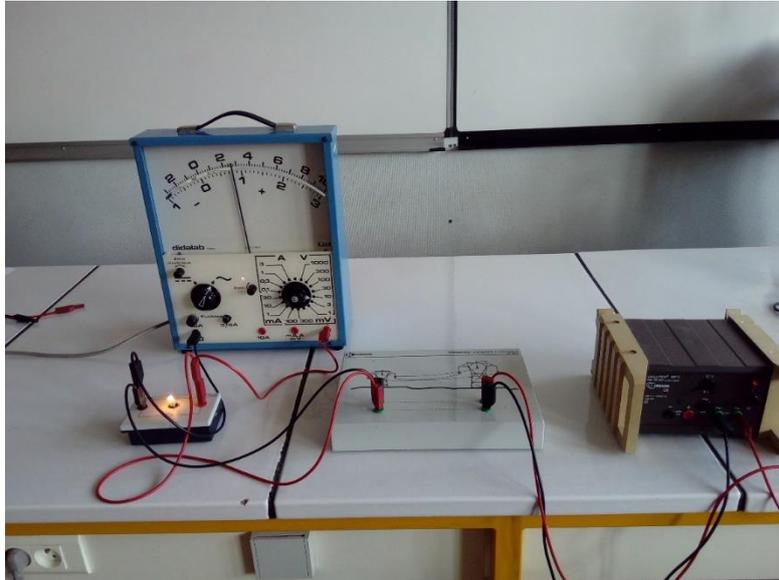
II Intérêt d'un transformateur pour le transport de l'électricité

Expérience :

On dispose d'un générateur de tension alternative de valeur efficace 6 V et d'une lampe. On réalise les deux montages suivants :

1^{er} montage : Les bornes de la lampe sont branchées directement aux bornes du générateur

2^{ème} montage : On intercale entre le générateur et la lampe un boîtier à quatre pôles pour représenter deux lignes de transport du courant électrique.



A l'aide d'un galvanomètre à cadre mobile, on observe la tension aux bornes du générateur puis celle aux bornes de la lampe pour les deux montages ainsi que l'éclat de la lampe

Observations :

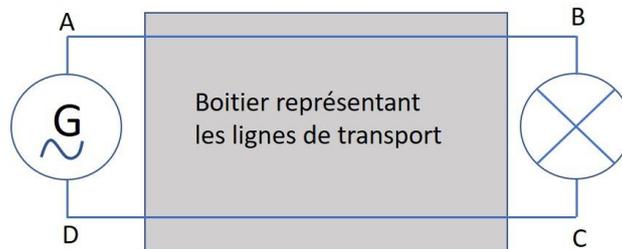
Dans le premier montage, l'éclat de la lampe est vif. La tension aux bornes du générateur est de 5,8 V est pratiquement la même que celle aux bornes de la lampe 5,7 V.

Dans le second montage, en revanche, l'éclat de la lampe est faible, la tension aux bornes de la lampe étant cette fois-ci environ moitié de celle du générateur (voir indication du galvanomètre sur la photo ci-dessus, environ 2,8 V) ce qui engendre une perte de puissance d'environ moitié pour la lampe et donc un éclat bien moins vif.

Il y a donc une perte conséquente de tension aux bornes de la lampe par le fait d'intercaler un résistor, ce qui est l'effet produit par les lignes électriques servant à transporter le courant depuis sa production jusqu'à son utilisation.

Explication par la loi d'Ohm :

Faisons un schéma du dispositif :



La loi d'additivité des tensions permet d'écrire, pour les valeurs efficaces :

$$U_{AD} = U_{AB} + U_{BC} + U_{CD}$$

La loi d'Ohm pour les deux résistors donne, en notant I la valeur efficace de l'intensité du courant délivré par le générateur, R la résistance de la ligne entre A et B , R' , celle de la ligne entre C et D :

$$U_{AB} = R I , \quad U_{CD} = R' I$$

La tension aux bornes de la lampe est donc :

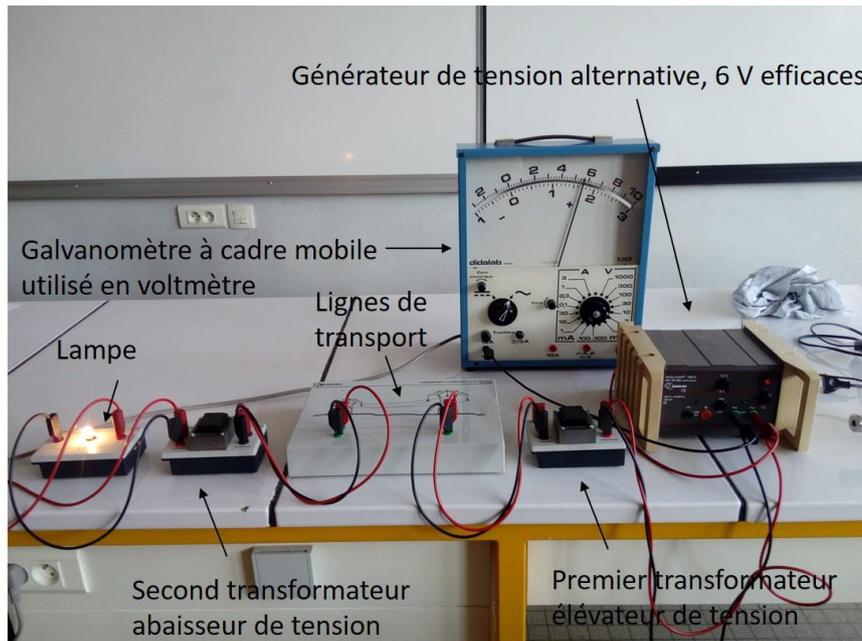
$$U_{BC} = U_{AD} - (R + R') I$$

La perte de tension aux bornes de la lampe est donc due au terme $(R + R') I$. Pour rendre ce terme le plus petit possible, il convient donc d'abaisser l'intensité I circulant dans les résistors. Nous allons voir que cela peut se faire au moyen de deux transformateurs.

Expérience 2 :

On reprend le dispositif du montage 2 mais on intercale entre le générateur et le boitier, un transformateur 6 V – 48 V qui va avoir pour effet d'élever la tension du générateur d'un facteur 8 tout en abaissant l'intensité qu'il débite d'un facteur du même ordre (en fait supérieur à cause du rendement du transformateur qui n'est pas égal à 1).

On intercale également un transformateur identique entre la sortie du boitier et la lampe mais branché de telle sorte à abaisser la tension d'un facteur 8 tout en augmentant l'intensité d'un facteur du même ordre.



Observation :

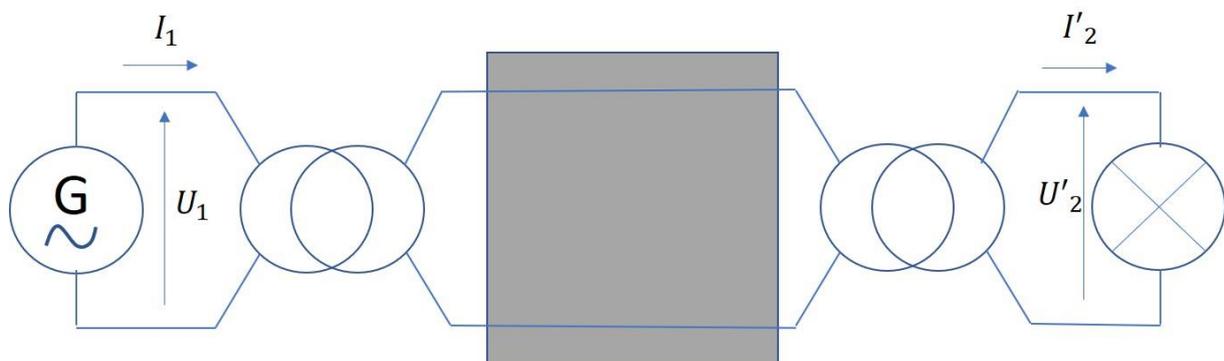
La lampe retrouve un éclat presque comparable au montage 1. On constate que la tension à ses bornes n'est plus de de 13 % inférieure à celle du générateur.

Explication :

En élevant la tension du générateur, le premier transformateur permet un transport de l'électricité via le boîtier à intensité bien plus faible. Les pertes de tensions dues aux résistors représentant les lignes de transport sont donc bien plus faibles. Il faut cependant à la sortie du boîtier un second transformateur pour abaisser la tension à un niveau acceptable pour la lampe.

Si les transformateurs de notre expérience permettent de transférer la tension du générateur à la lampe, ils ne permettent en revanche pas d'en transférer toute la puissance du fait de leur rendement.

En effet, reprenant le dispositif de la figure 1 schématisé ci-dessous,



nous avons alors mesuré :

$$U_1 = 6,174 \text{ V}, \quad I_1 = 1,861 \text{ A}, \quad U'_2 = 5,382 \text{ V}, \quad I'_2 = 0,923 \text{ A}$$

Le générateur a donc fourni la puissance :

$$P_1 = U_1 I_1 = 11,5 \text{ W}$$

Et la lampe a consommé :

$$P'_2 = U'_2 I'_2 = 5,0 \text{ W}$$

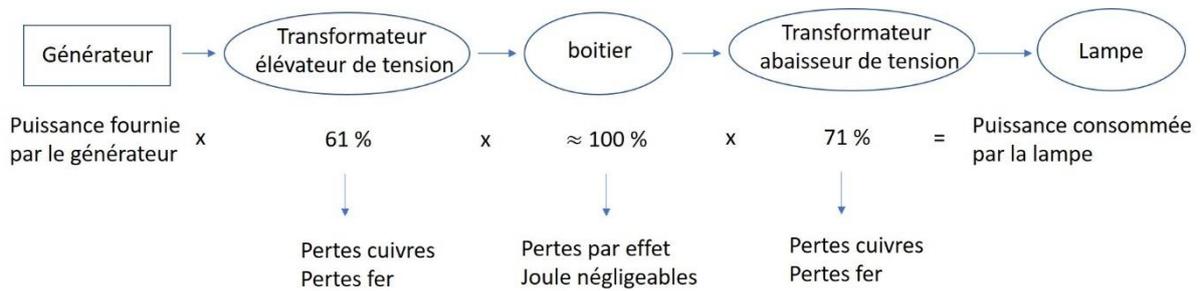
Le rendement de l'installation est donc :

$$\eta = \frac{P'_2}{P_1} = \frac{5,0}{11,5} = 43,5 \%$$

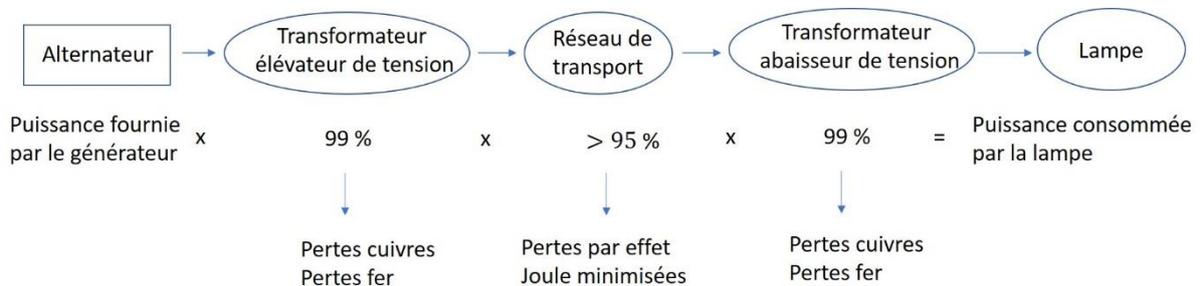
Il est à noter qu'il est, comme attendu, le produit des rendements des deux transformateurs :

$$0,61 \times 0,71 = 43,5 \%$$

On peut résumer la situation par un diagramme :



A comparer avec ce que cela donnerait pour le réseau électrique depuis l'alternateur de centrale électrique jusqu'à la lampe consommatrice en se limitant à deux transformateurs.

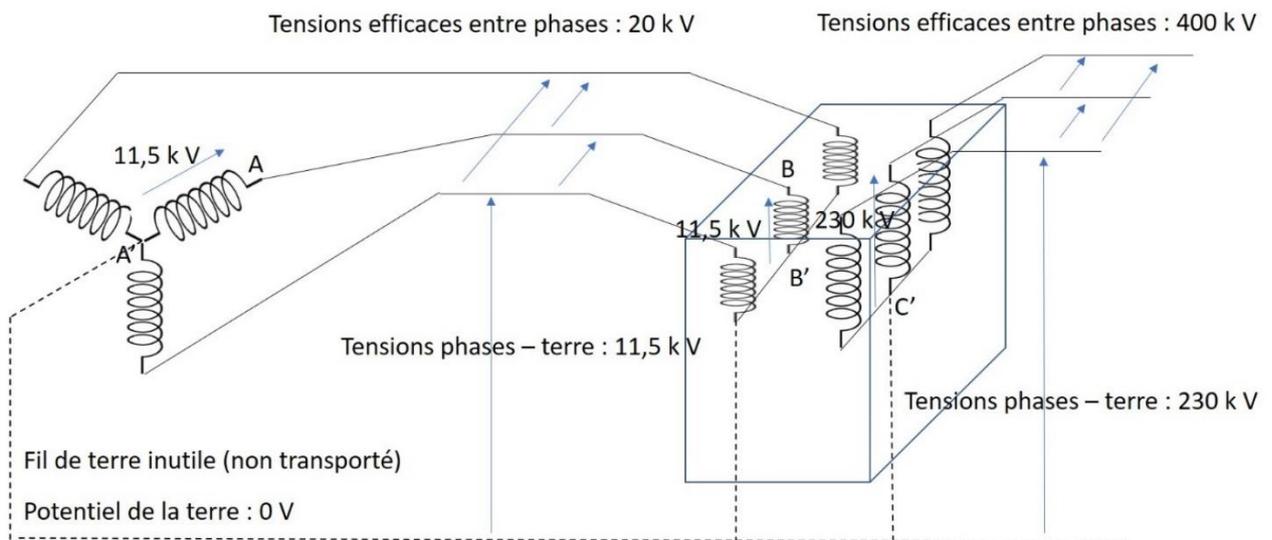


III Transport du courant en triphasé

Les alternateurs des centrales électriques à charbon, au fuel ou nucléaires, produisent un courant triphasé, c'est-à-dire qu'elles produisent trois tensions simples (aux bornes de leurs bobines) $u_1(t), u_2(t), u_3(t)$ de même valeur efficace, qui se traduisent par trois tensions entre phases également de même valeur efficace d'environ 20 kV dont la somme est nulle à tout instant et trois intensités $i_1(t), i_2(t), i_3(t)$ de même valeur efficace dont la somme est également nulle à chaque instant.

Cela a pour avantage qu'il n'est pas nécessaire d'avoir un fil de retour du courant. Seuls les phases sont transportées sans retour par fil de terre, ce qui fait économiser du câble de transport et réduit les pertes par effet Joule dans le transport.

Les tensions entre phases sont élevées d'environ 20 kV en sortie d'alternateur à 400 kV pour le transport à très haute tension sur le réseau national afin de minimiser les pertes par effet Joule.



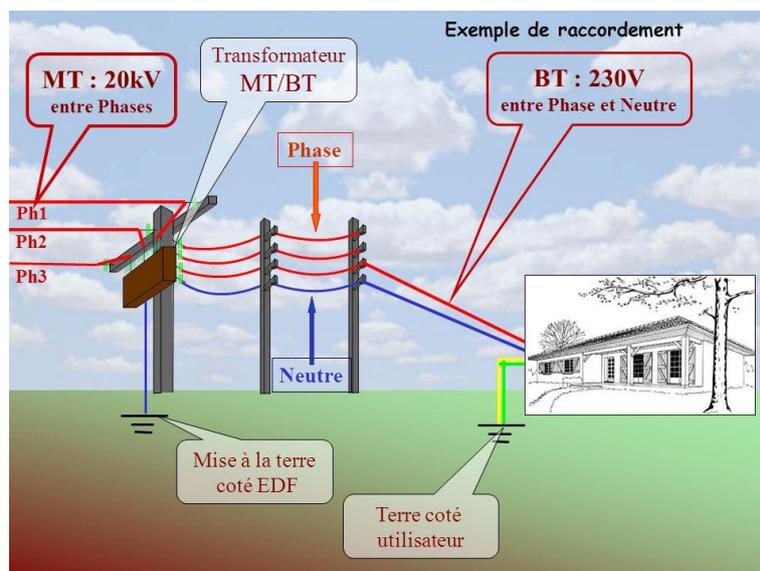
Alternateur de centrale électrique

Transformateur élévateur de tension 20 kV -> 400 kV

Les enroulements primaires et secondaires sont en fait imbriqués l'un dans l'autre mais isolés l'un de l'autre car les fils conducteurs sont entourés d'une gaine isolante, comme le montre la photo :



Afin d'assurer la distribution dans une région, la tension entre phases est abaissée à 20 kV (moyenne tension) par un transformateur, puis abaissée à nouveau à 400 V (basse tension) pour alimenter par exemple les particuliers, avec une tension entre phase et neutre de 230 V, mais il faut alors un fil retour (conventionnellement bleu) de l'utilisateur final jusqu'à un piquet de terre situé dans ce dernier transformateur, comme illustré ci-dessous.



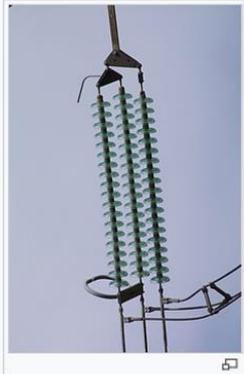
Types de lignes sur le réseau français :

Une ligne est désignée par deux tensions, la tension entre phase et neutre (ou terre) et la tension entre deux phases quelconques, les deux pouvant être utilisées selon les besoins. Ainsi par exemple :

Pour la ligne de type 230/400 kV, la tension entre chaque phase et la terre (neutre et terre sont au même potentiels) est de 230 kV et la tension entre deux phases est de 400 kV. Mais le nom donné à la ligne est celui de la tension entre phases, à savoir 400 kV. Il s'agit d'une ligne très haute tension utilisée pour le transport national (THTB)

Chez les particuliers, c'est généralement la tension entre phase et neutre de 230 V qui est utilisée.

Le tableau suivant récapitule les différents types de ligne sur le territoire français et comment les reconnaître avec le nombre d'isolateurs en verre (sorte de coupelles) utilisés.

type de ligne	230/400 (420) kV	130/225 (245) kV	52/90 (100) kV	36/63 (72,5) kV	12/20 (24) kV	230/400 V
appellation	400 kV	225 kV	90 kV	63 kV	15 kV ou 20 kV	400 V
classification ²⁷	THT (HTB transport national)		HT (HTB transport régional)		MT (HTA distribution)	BT (consommation)
nombre d'isolateurs ²⁸	19	12 à 14	9	4 à 6	2 à 3	1
illustrations						

Source : Wikipédia

