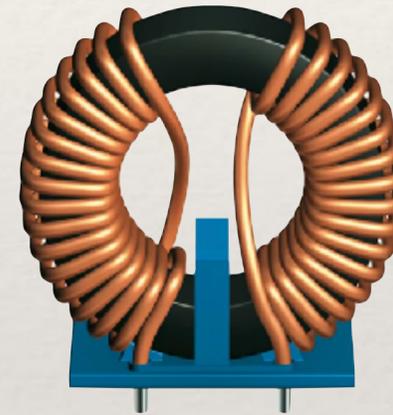


J.COURTIN

PSI — LYCÉE V.HUGO

Transformateur



Objectifs :

- Modèle du transformateur idéal
- Pertes cuivre et fer. Solutions
- Applications

Pré-requis : Tout le cours de 1ère année sur le transformateur

- Induction propre et mutuelle
- Modèle du transformateur idéal
- Pertes cuivre et fer. Solutions
- Applications

I - Le transformateur

1 - Présentation générale

On considère (ci-contre) un circuit magnétique en boucle, avec deux enroulements :

- l'entrée ou circuit **primaire** à gauche : N_1 enroulements
- la sortie ou circuit **secondaire** à droite : N_2 enroulements

Convention d'orientation : on note que les circuits sont ici orientés pour qu'un courant positif au primaire donne un flux orienté positif dans le circuit magnétique et que c'est la même chose au secondaire. C'est la signification des points verts :

$$i_k > 0 \Rightarrow \varphi_k > 0$$

Cette convention dépend de la façon dont le fil a été enroulé ce qui ne peut être représenté en 2D, d'où les points sur le schéma du bas.

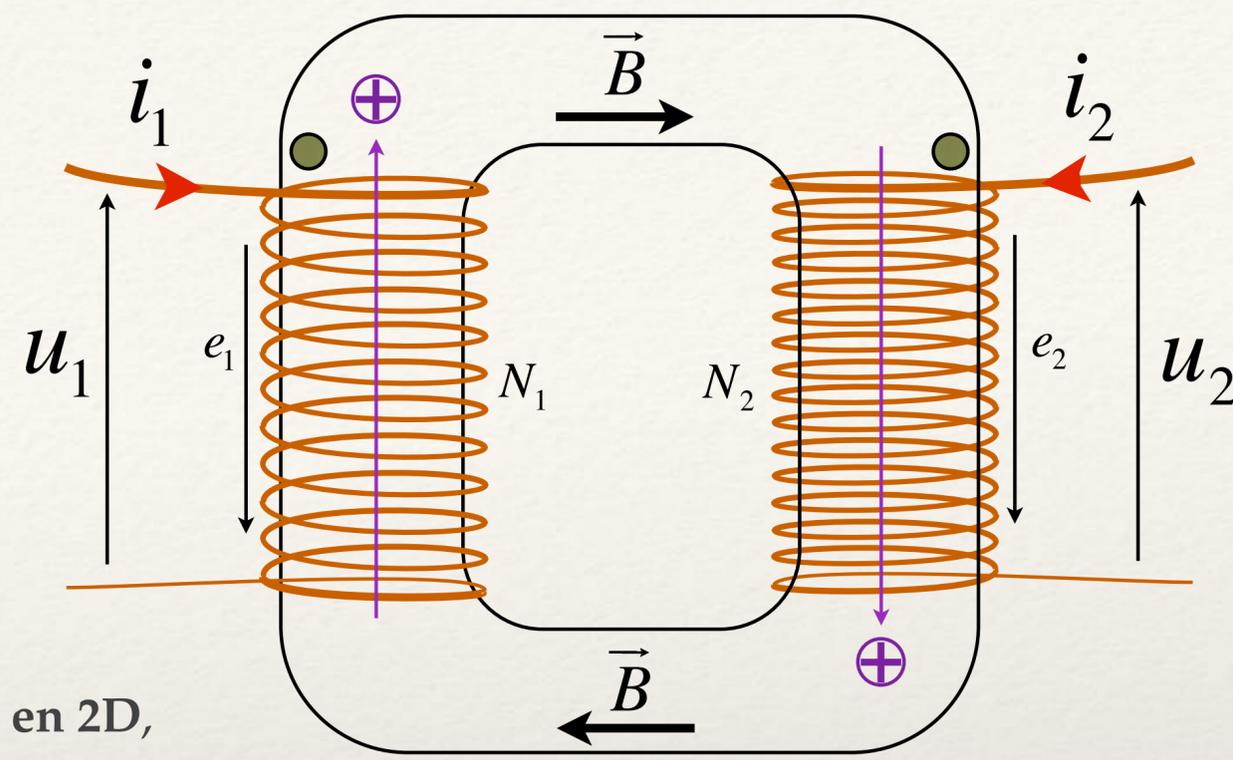


Schéma avec enroulements

2 - Rapport de transformation

Notons que les sens des contours Γ_1 et Γ_2 sont donnés par e_1 et e_2 . Soit φ_0 le flux de section.

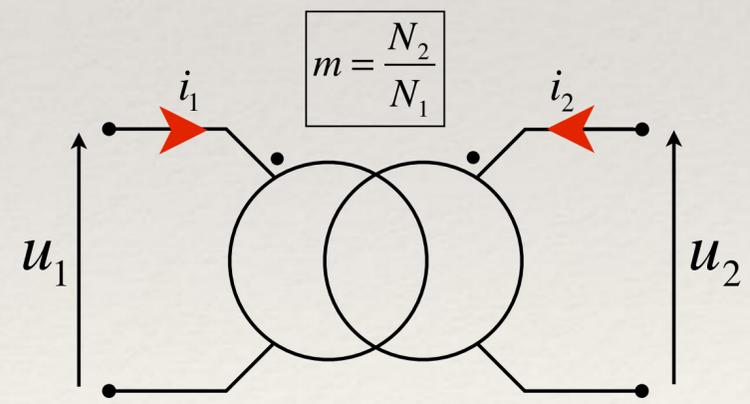
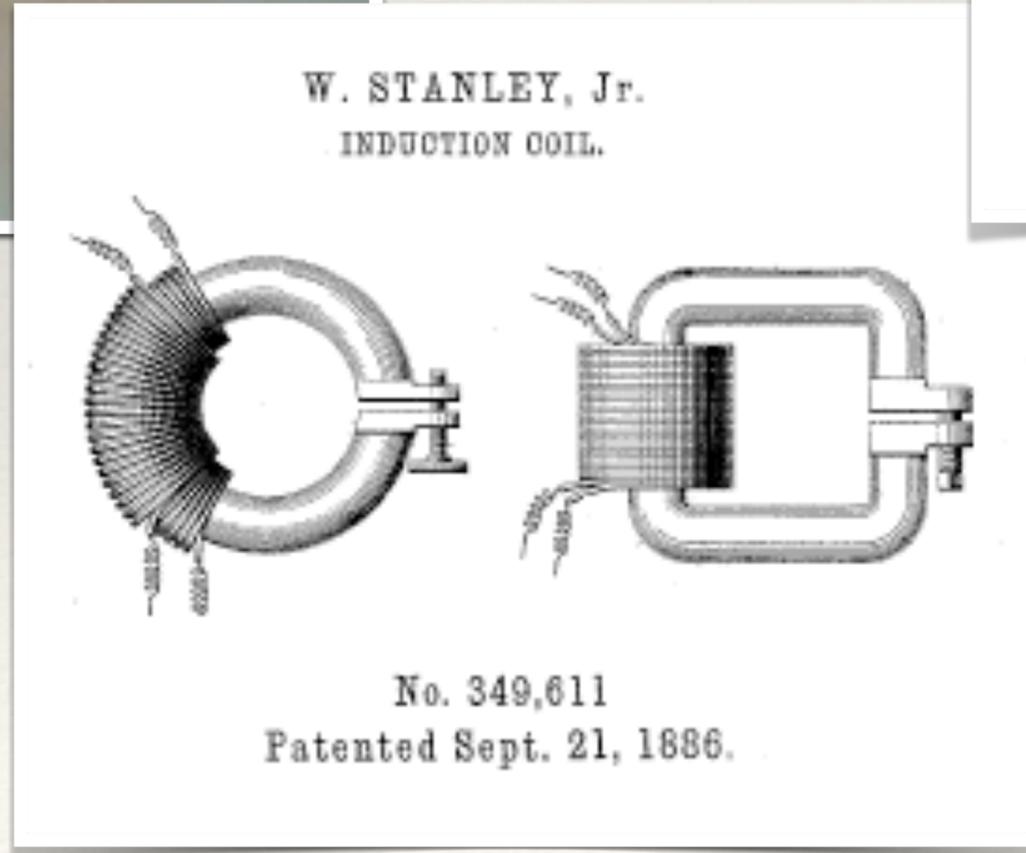
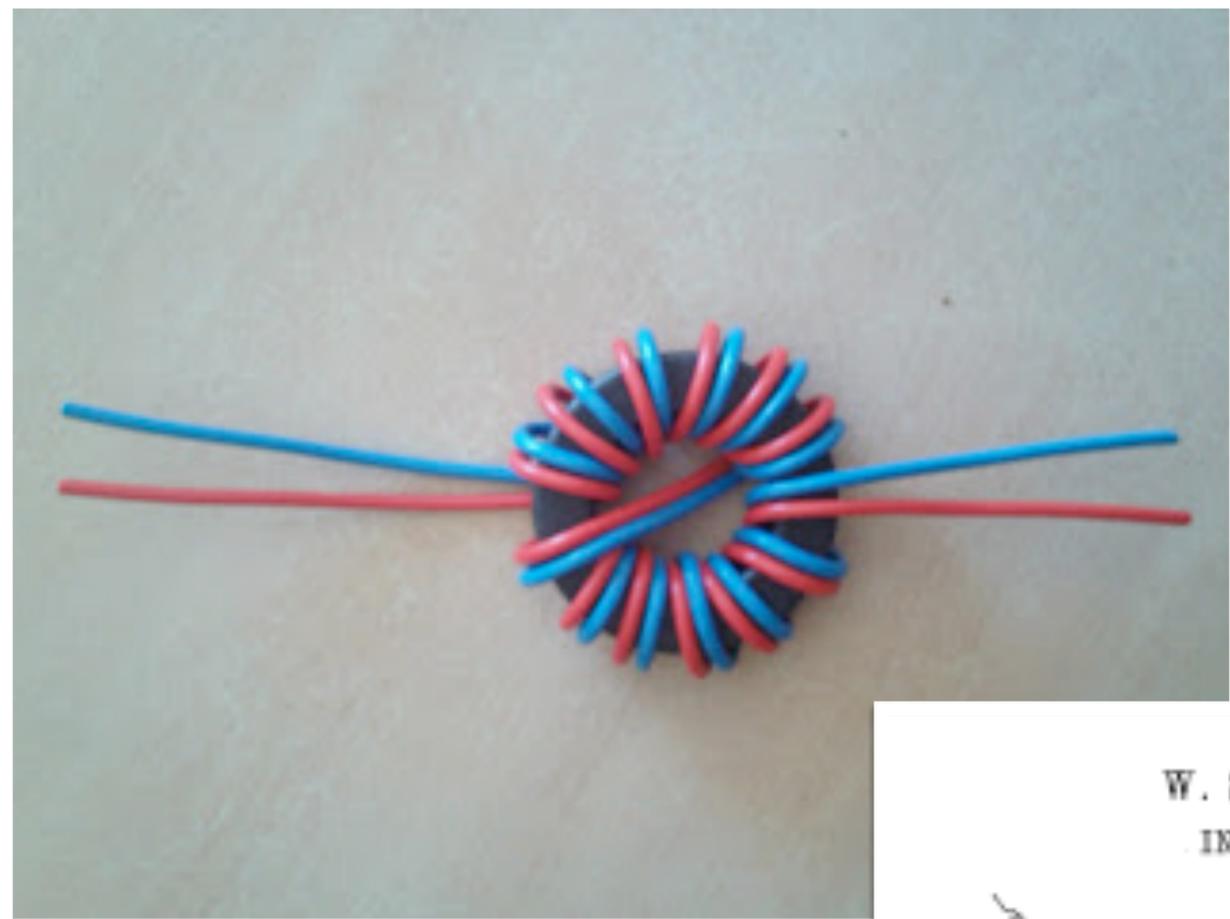
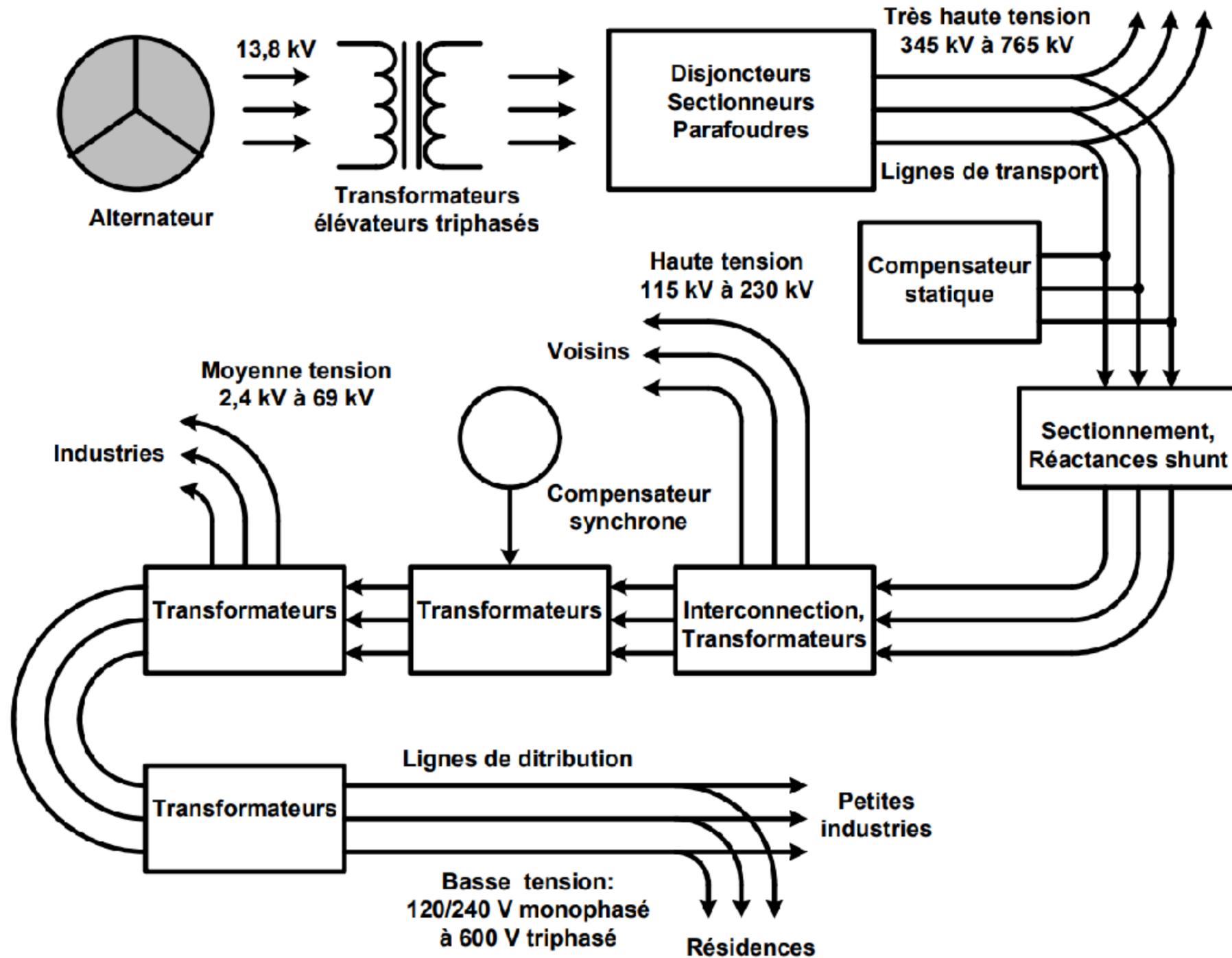


Schéma de principe du Transformateur idéal

Conceptuellement très simple :

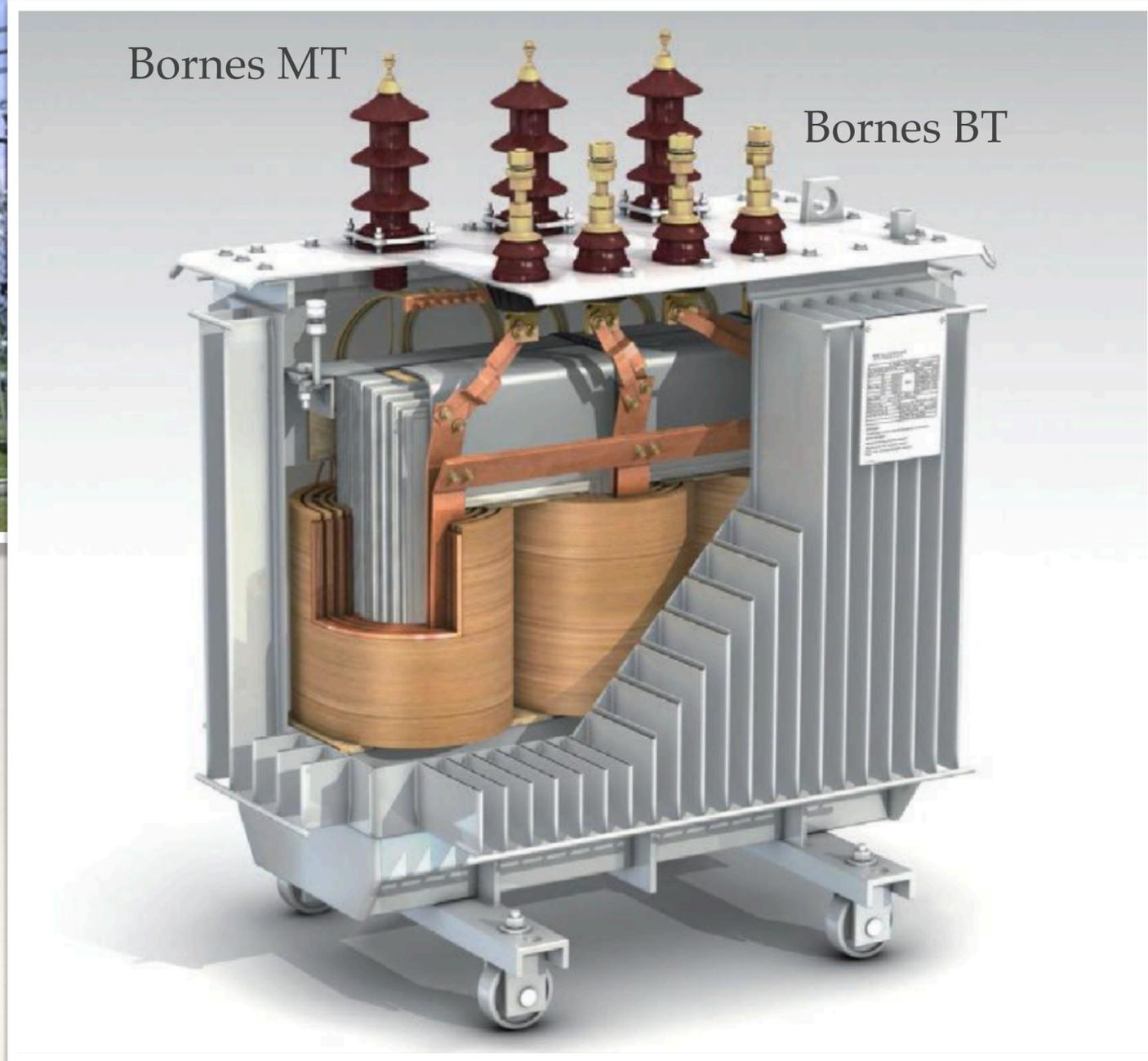


Configuration générale d'un réseau électrique

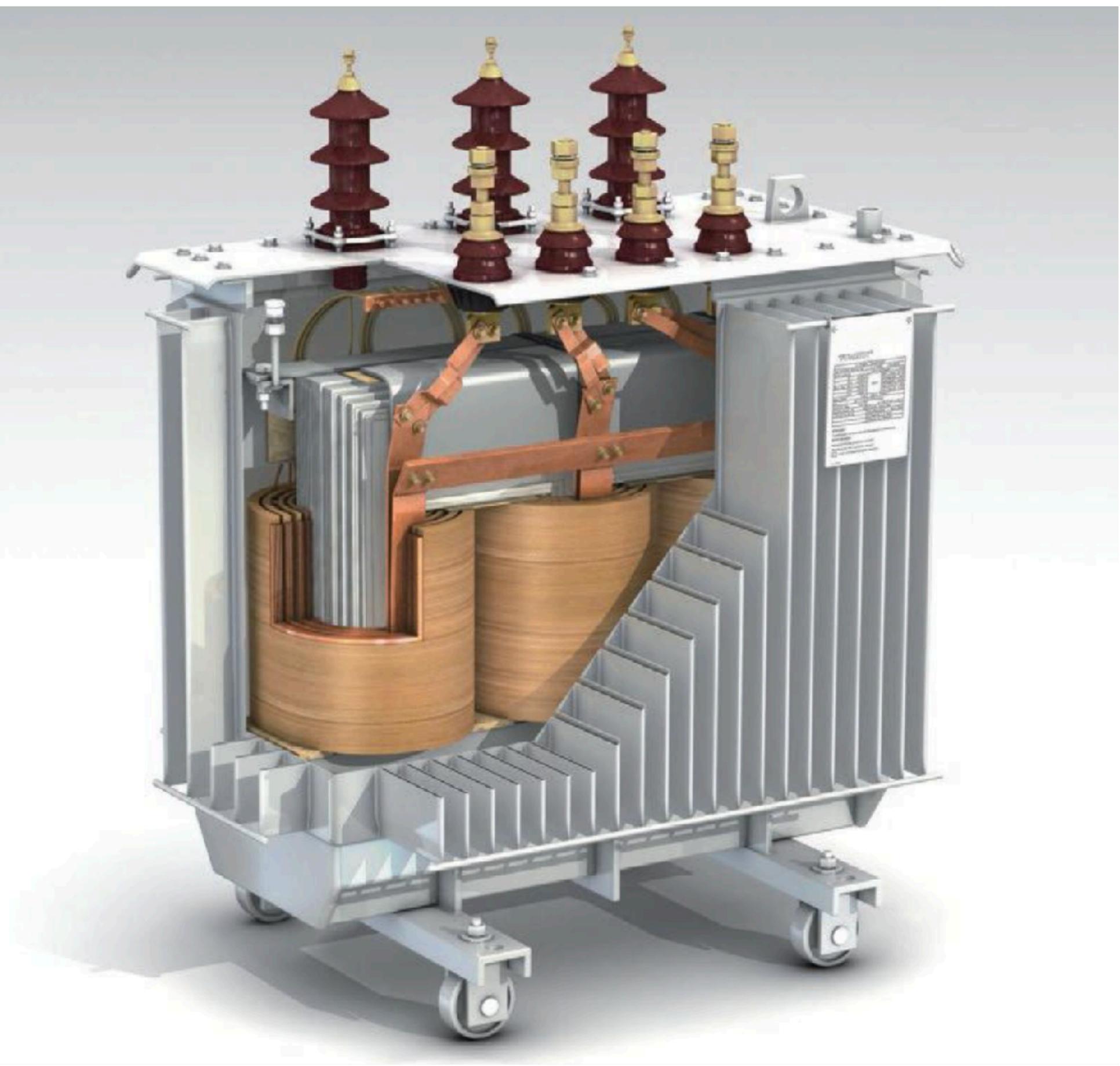




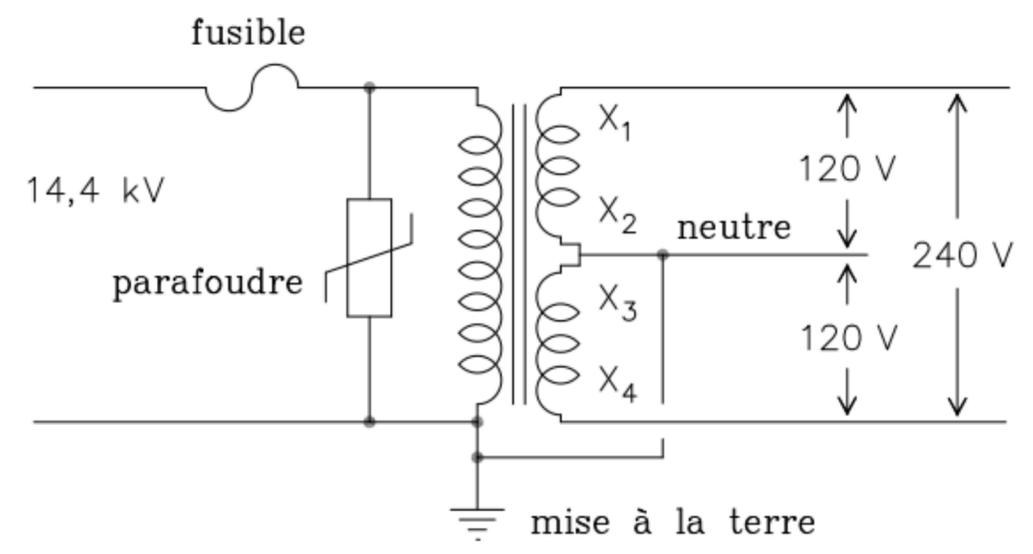
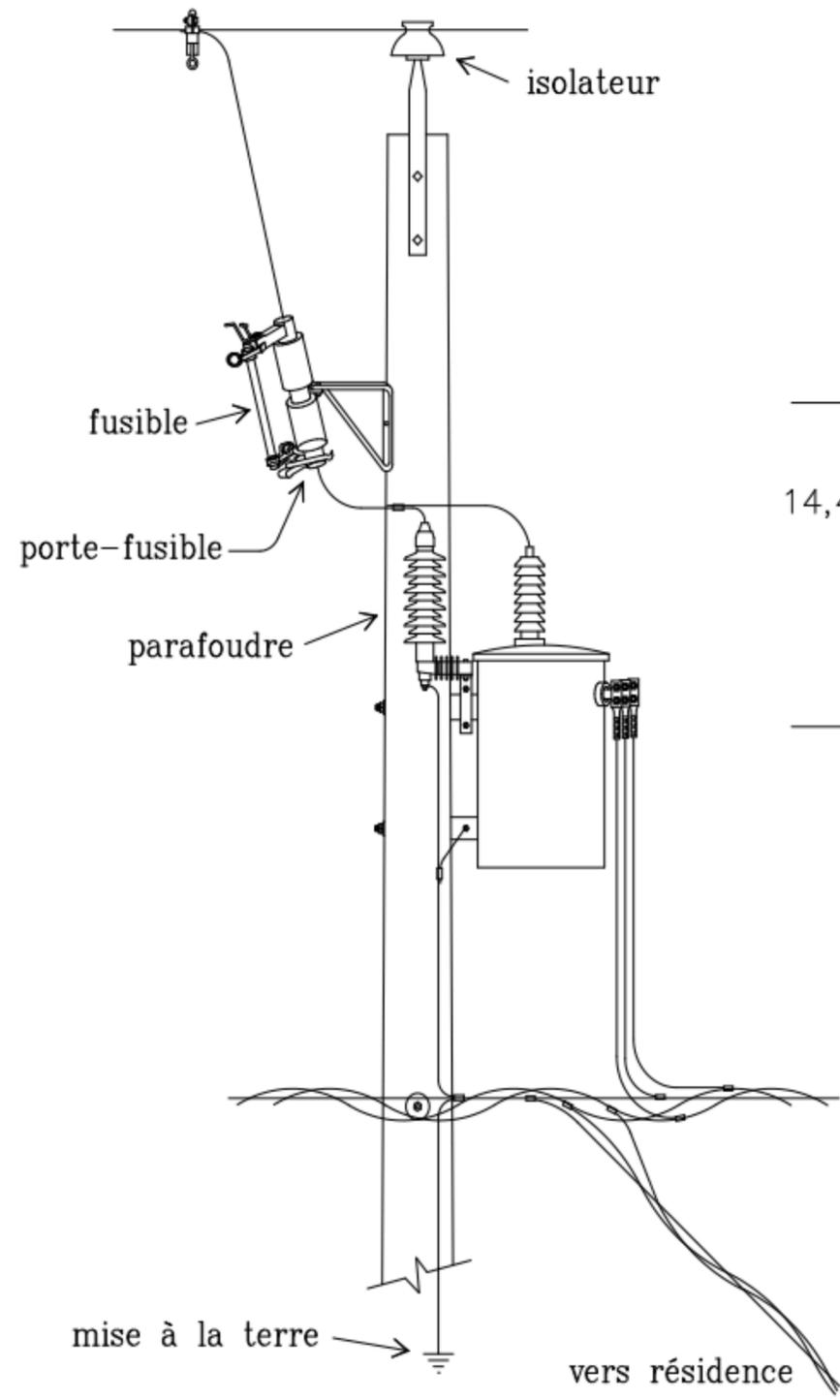
Le courant est produit et transporté en triphasé [HP]



Rq : les circuits magnétiques baignent dans l'huile pour le refroidissement

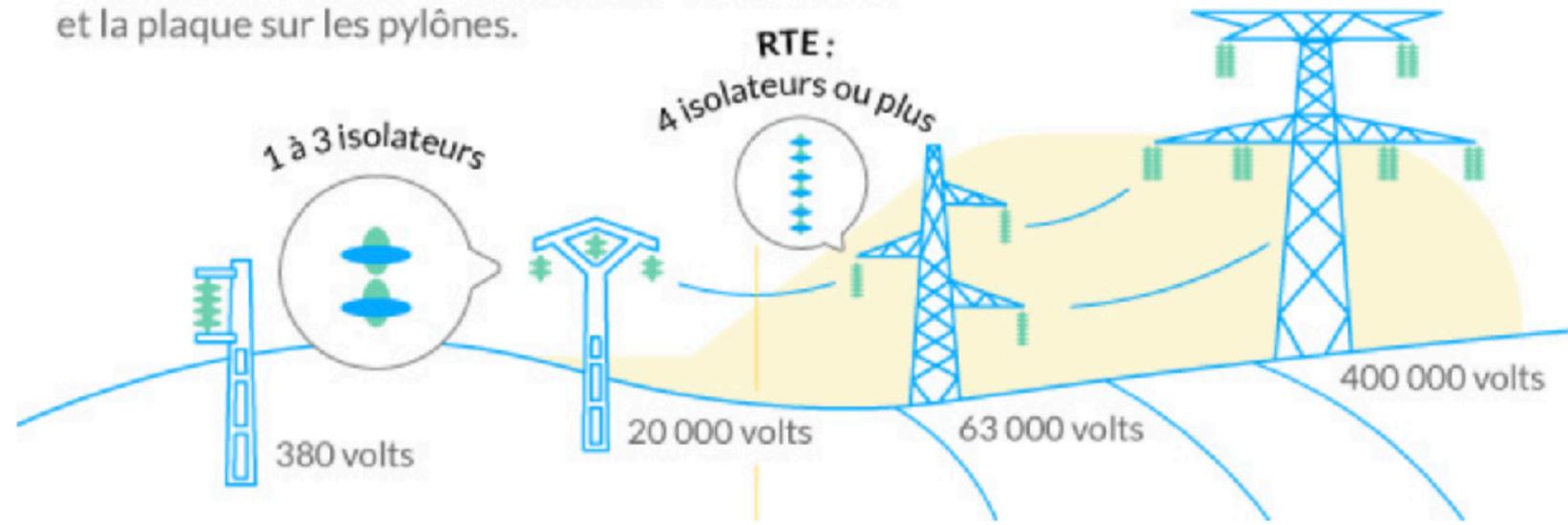


Installation d'un transformateur 14,4 kV/120-240 V

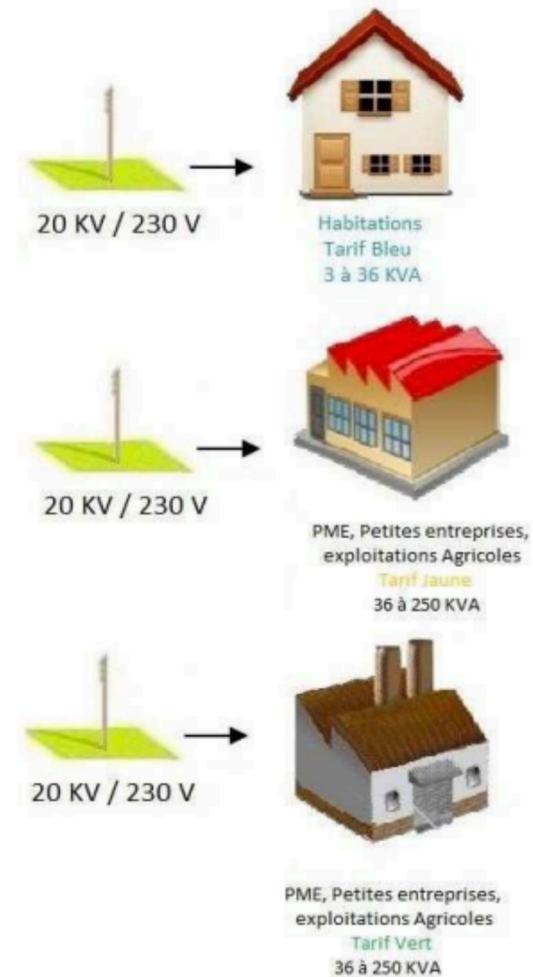
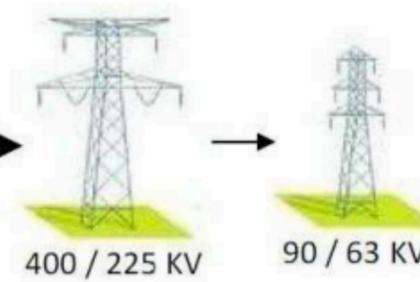


A quoi ressemblent les lignes à Haute Tension en France ?

Les lignes aériennes s'identifient par les isolateurs et la plaque sur les pylônes.



Transport





CÂBLES ET ACCESSOIRES
D'ÉNERGIE

87 / 150 (170)kV

**Conducteur cuivre à fils
de cuivre / ruban alu**



CÂBLES ET ACCESSOIRES
D'ÉNERGIE

127 / 220 (245)kV

**Conducteur aluminium
à fils de cuivre / ruban
alu**



3 - Transformateur idéal ou parfait

Il y a déjà plusieurs hypothèses à la base du calcul précédent :

- on se place en **régime variable**, en général sinusoïdal, car il ne saurait y avoir d'effet inductif en régime continu. (Division par zéro)
- on considère que le **circuit magnétique est parfait** : toute ligne passant au primaire passe également au secondaire et réciproquement.

On ajoute maintenant :

- qu'afin de **limiter les pertes fer par hystérésis** on suppose le **matériau très doux** soit $\mu_r \sim 10^5 \gg 1$ On a alors $B = \mu_0 \mu_r H$ et $\mu_r \rightarrow \infty$
- pour **limiter les pertes fer par courants de Foucault**, on suppose que le matériau est feuilleté et si possible peu conducteur électrique.
- Enfin **on néglige la dissipation par effet Joule dans les bobinages : pas de perte cuivre**. \Rightarrow très bons conducteurs, avec une forte section S .
Cette dernière hypothèse est toutefois la moins bien vérifiée. Les transformateurs de puissance baignent dans l'huile pour évacuer la chaleur.

Dans le cadre de ces hypothèses de modélisation, on parle de **transformateur idéal** ou **transformateur parfait**.

4 - transformation des courants

Appliquons le théorème d'Ampère sur le circuit magnétique :

ODG: $|i_1| \sim |i_2| \sim 1A$
 $l \sim 1m$ $N_1 \sim N_2 \sim 10.000$ $B \sim 1T$
 $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \sim 10^{-6}$ SI et $\mu_r \sim 10^5$
 $S \sim 0.01 m^2$

Loi d'Hoptkinson : $N_1 i_1 + N_2 i_2 = \mathcal{R} \varphi_0$

$$\mathcal{R} = \frac{l}{S \mu_0 \mu_r} \quad (\text{Reluctance magnétique})$$

5 - Transfert de puissance

6 - Conséquences énergétiques

7 - Applications du transformateur

α - Transformateur d'isolement

β - Transfert d'impédance

γ - Cycle d'hystérésis

Isolement médical

Les transformateurs d'isolement destinés aux applications médicales doivent répondre à des exigences plus strictes en matière de courants de fuite. Il existe des spécifications de courant de fuite maximum pour les fuites à la terre ou à la masse, les fuites liées au boîtier et les fuites liées au patient. La fuite à la terre fait référence aux courants de fuite dans le fil de terre d'un dispositif. Les courants de boîtier décrivent les courants qui circulent d'une surface conductrice exposée à la terre via un conducteur autre que le fil de terre. La fuite liée au patient est un courant qui traverse le corps d'un patient jusqu'à la terre en condition de connexion normale au dispositif. La plupart des dispositifs de cette catégorie sont certifiés selon UL/CEI 60601-1.

Le [modèle MD-500-U](#) de Triad Magnetics est un transformateur d'isolement de 500 VA répertorié pour les applications médicales (Figure 6). Ce transformateur est certifié par Underwriters Laboratories (UL) selon la spécification UL 60601-2 et a un courant de fuite de $10 \mu\text{A}$ typique et de moins de $50 \mu\text{A}$ maximum.

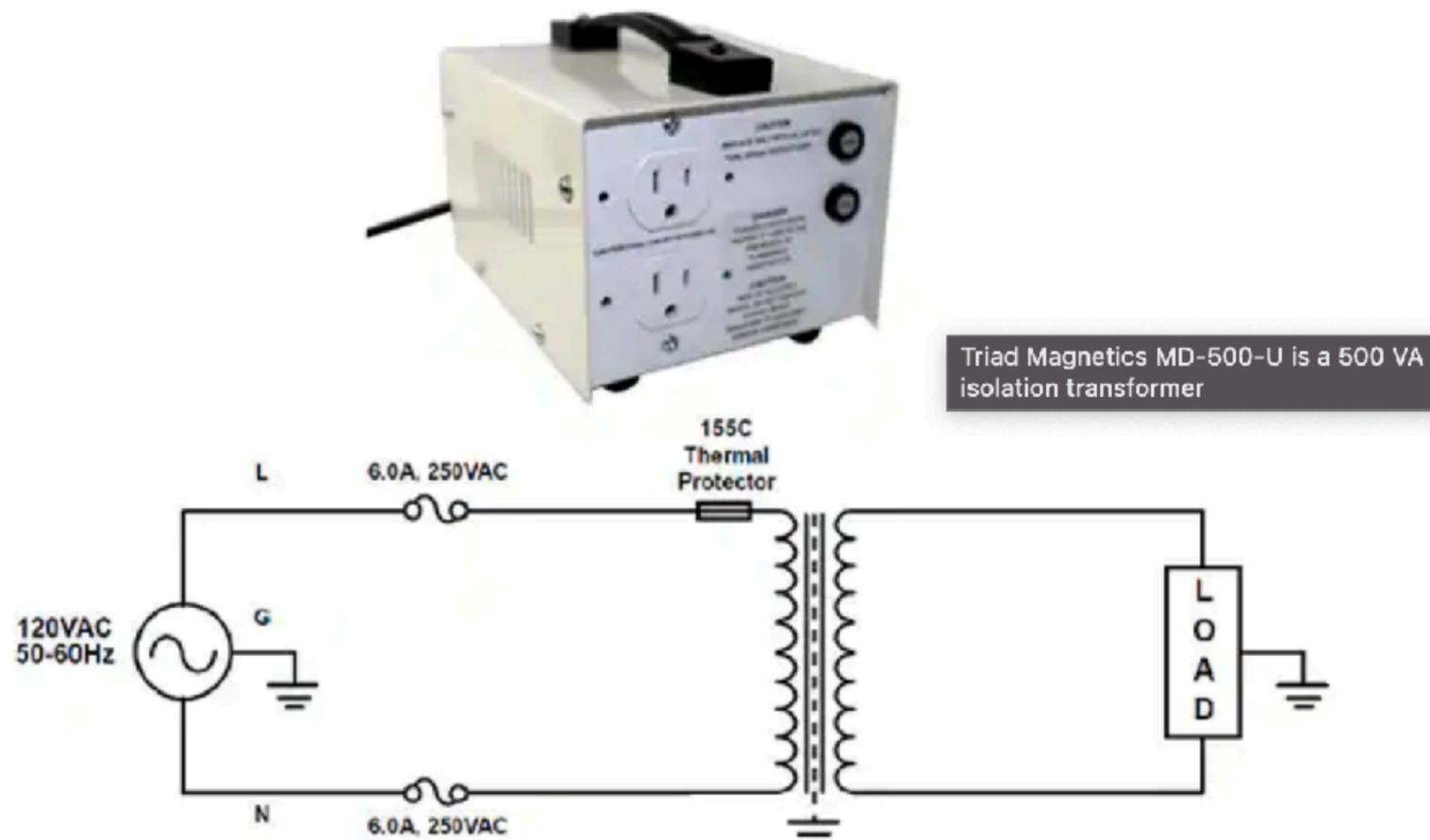
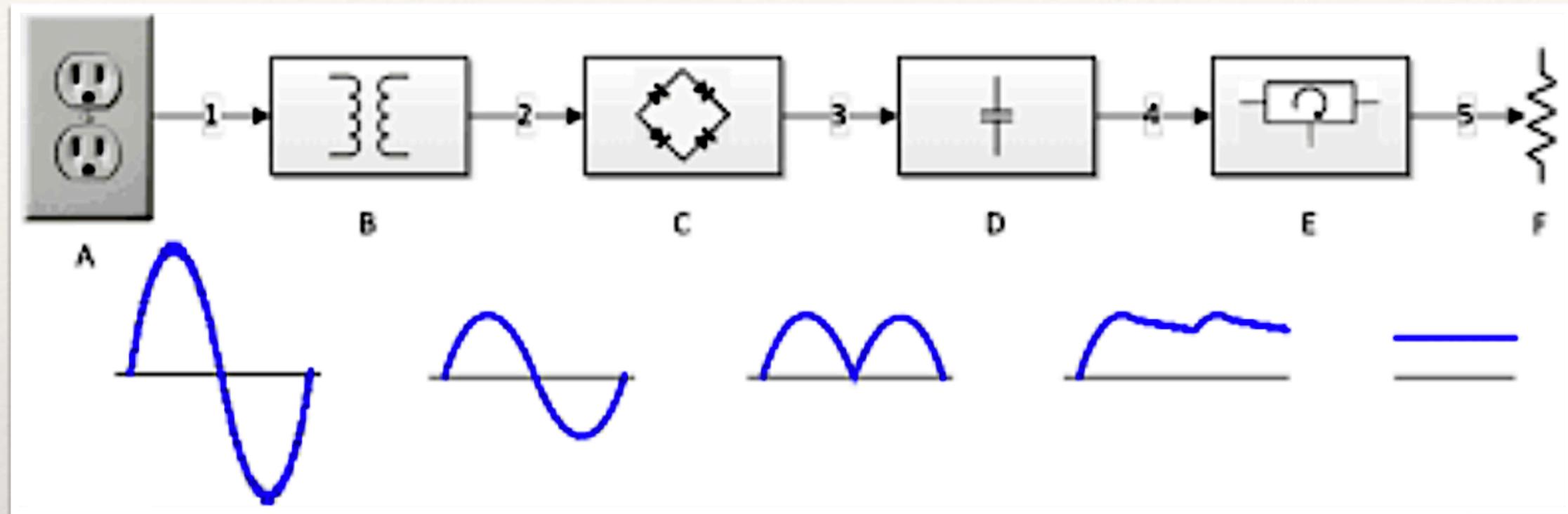
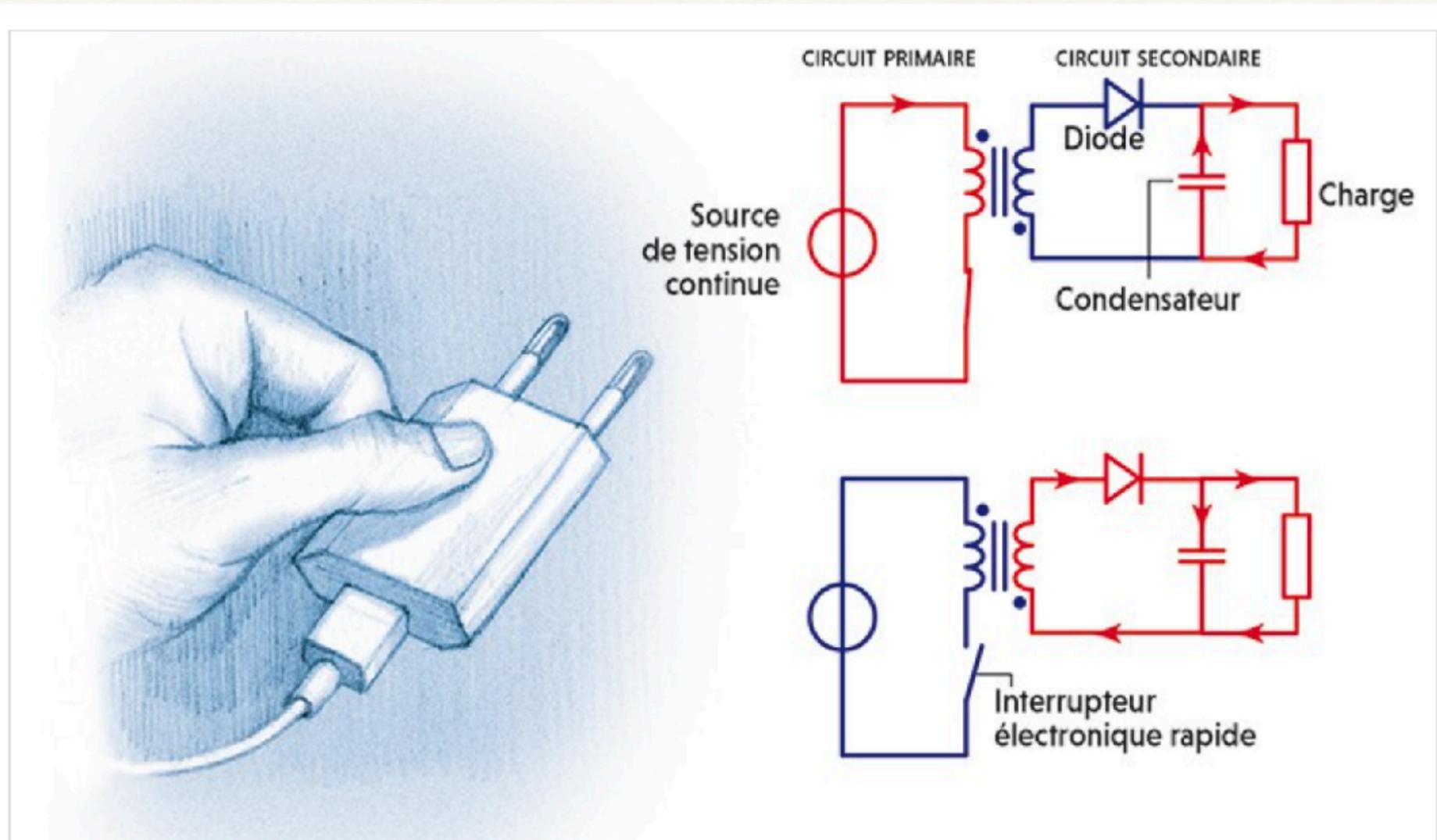


Figure 6 : Le MD-500-U est un transformateur d'isolement de 500 VA répertorié pour les applications médicales. Il présente un courant de fuite de $10 \mu\text{A}$ (typique) et utilise un transformateur torique pour maintenir un format compact et minimiser les champs parasites. (Source de l'image : Triad Magnetics)

Le MD-500-U utilise un transformateur torique qui minimise les champs parasites et maximise le rendement tout en réduisant le format. Comme la plupart des transformateurs médicaux autonomes, il est logé de manière sécurisée dans un boîtier en acier avec des fusibles intégrés et un commutateur de blocage thermique.

Participe à la chaine de redressement AC / DC





Les tout petits chargeurs de téléphones disponibles aujourd'hui intègrent un « convertisseur Flyback », un transformateur fonctionnant à très haute fréquence. Le circuit primaire, alimenté par une tension continue, est muni d'un interrupteur électronique qui s'ouvre et se ferme à haute cadence. Dans la phase où cet interrupteur est fermé, la tension appliquée entraîne l'augmentation progressive du courant (symbolisé en rouge) dans le circuit primaire. Le circuit secondaire est alors ouvert, car le courant induit est bloqué par une diode. Par conséquent, le champ magnétique augmente et le matériau magnétique accumule de l'énergie. Dans la seconde phase, l'interrupteur s'ouvre. Le courant s'annule (en bleu) dans le bobinage primaire et le secondaire prend le relais : le courant induit dans le secondaire circule dans le sens passant de la diode. Le matériau magnétique cède alors son énergie au circuit secondaire.

L'application la plus fréquente d'un transformateur d'isolement consiste à isoler un dispositif de la terre de la ligne CA. Pour illustrer pourquoi cela peut être nécessaire, prenons l'exemple de l'alimentation à découpage (SMPS). Une alimentation à découpage sur secteur typique pose plusieurs problèmes de sécurité (Figure 7).

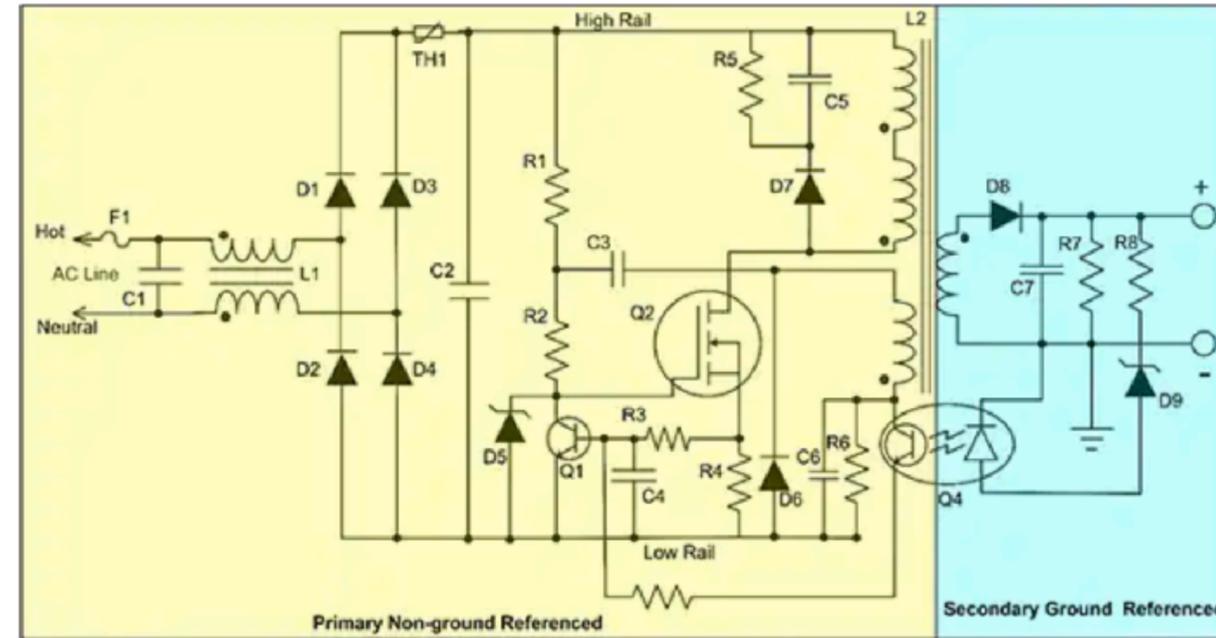


Figure 7 : Schéma d'une alimentation à découpage montrant les zones de circuit référencées à la terre et celles qui ne le sont pas. (Source de l'image : Digi-Key Electronics)

Il s'agit d'une alimentation sur secteur utilisant la topologie flyback. Le côté primaire du circuit, représenté en jaune, effectue un redressement des deux alternances de l'entrée de la ligne (secteur) et l'applique aux rails primaires. Cela signifie que les niveaux de tension se produisant entre les rails haute tension et basse tension sont d'environ 170 V pour une ligne de 120 V, et d'environ 340 V pour une ligne de 240 V. Cette tension de ligne redressée est stockée dans le condensateur de stockage primaire, C2.

Notez que les sections primaire et secondaire de l'alimentation sont électriquement isolées par le transformateur de retour, L2, et le coupleur optiquement isolé, Q4. Alors que la section secondaire est connectée à la terre au niveau de la borne de sortie négative (-), la section primaire n'est pas mise à la terre. Cette condition devient problématique lorsque l'on utilise des instruments d'entrée mis à la terre tels que des oscilloscopes pour le dépannage. Le raccordement de la connexion à la terre d'une sonde d'oscilloscope aux composants du côté primaire de l'alimentation peut entraîner un court-circuit avec les dommages qui en découlent pour les composants primaires ainsi que pour l'oscilloscope.

Le rail primaire bas de l'alimentation est connecté au neutre de la ligne CA. Bien que la ligne neutre soit connectée à la terre à l'entrée de service, lorsqu'elle atteint l'entrée de l'alimentation à découpage, elle peut se trouver à plusieurs volts au-dessus de la terre, ce qui en fait un point de connexion dangereux pour la mise à la terre d'une sonde d'oscilloscope.

Le but du transformateur d'isolement est d'isoler électriquement la section primaire de l'alimentation à découpage. Une fois cette section isolée, il est possible de connecter le côté terre d'une sonde à n'importe quel point du circuit primaire. Cela place la référence de terre au point auquel la pince de terre est connectée, éliminant ainsi la possibilité de court-circuiter le primaire.

Cette même capacité d'isolement de la masse rend les transformateurs d'isolement utiles pour diagnostiquer et corriger les boucles de masse lorsque plusieurs dispositifs, chacun avec son propre chemin de retour à la terre, sont connectés ensemble.

Le(s) transformateur(s) permet(tent) d'isoler la masse pour voir quels dispositifs sont à l'origine du courant de fuite à la terre.

Les transformateurs d'isolement réduisent également le bruit haute fréquence transféré soit de la ligne au dispositif connecté, soit du dispositif à la ligne. Cela est dû à l'inductance série du transformateur et à l'écran de Faraday mis à la terre qui réduit le couplage capacitif dans le transformateur.