

LP25 – TRANSPORT DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

8 février 2022

Jean-Maxime Schlachter & Léa Bessonart

Niveau : L2

Bibliographie

- ⚡ *Électrotechnique*, **Lasne** → Excellent livre qui fait apprécier l'électrotechnique (!) et agréable à lire. Chapitres 2,3,5,6,9.
- ⚡ *Génie électrotechnique*, **Mérat** → Moins bien écrit que le premier.
- ⚡ *Physique tout-en-un* PSI – PSI*, **Cardini** → Bouquin de prépa comme alternative, pas utilisé.
- ⚡ *Réseau électrique*, **Wikipédia** → Description du réseau électrique. Donne un historique sympa et ce qui est fait aujourd'hui.
- ⚡ *Ligne à haute tension*, **Wikipédia** → Précisions historiques sur le réseau français.
- ⚡ *Courant triphasé*, **Wikipédia** → Voir l'intérêt du triphasé : dans le réseau, le neutre n'apparaît qu'à partir du dernier transformateur (aussi précisé de façon détournée dans le livre de Lasne)
- ⚡ *Effet de peau*, **Wikipédia** → Modélisation en géométrie cylindrique. Augmente la résistance effective des fils en régime harmonique.
- ⚡ *Effet corona*, **Wikipédia** → Type de pertes sur une ligne qui ne sont pas évoquées ici.
- ⚡ *Loi de Paschen*, **Wikipédia** → Paramètres physiques pour la formation d'un arc électrique.
- ⚡ *Les transports électriques à longue distance*, **La houille blanche** → Vieil article de 1913 sur la comparaison des lignes aériennes et souterraines.
- ⚡ *La Chine adopte l'ultra-haute-tension pour optimiser le transport de l'électricité*, **PICTET** → <https://am.pictet/fr/france/mega/chine-le-courant-continu-a-ultra-haute-tension>. Article en ligne sur l'utilisation actuelle du courant continu en place de l'alternatif en Chine.

Prérequis

- Électrocinétique
- Représentation de Fresnel
- Puissances (instantanée, apparente, active, réactive)
- Milieux magnétiques
- Induction
- Théorème d'Ampère

Expériences

- 🔌 Transformateur

Table des matières

I Stratégie du transport de l'énergie électrique	2
I.A Réseau triphasé	2
I.B Tension de ligne	4
II Le transformateur	4
II.A Analogie circuit magnétique / circuit électrique	4
II.B Transformateur idéal	6
II.C Transformateur réel	7
III Réseau électrique français	8
III.A Historique	8
III.B Structure actuelle	9

Introduction

Nous allons parler d'un sujet primordial de la société actuelle : le transport de l'énergie électrique. Cette énergie est utilisée dans tous les appareils du quotidien, et si on ne savait pas la transporter, tout le monde devrait se rendre à la centrale de Cusset au moins une fois par jour ne serait-ce que pour charger son portable et son ordinateur, ce qui représenterait un grand défi d'organisation. Le réseau électrique en France permet de fournir toute la population en énergie électrique sans discontinuer, pour que chacun puisse satisfaire ses besoins. Pour ce faire, il faut remplir deux conditions : produire suffisamment d'énergie électrique, et une fois produite, ne pas perdre cette énergie au cours de son transport. Nous allons voir quelle stratégie est adoptée en France pour acheminer l'électricité au consommateur.

I Stratégie du transport de l'énergie électrique

I.A Réseau triphasé

Si vous êtes à la campagne et que vous regardez un pylône électrique, vous pouvez apercevoir sur certains d'entre eux des faisceaux de câbles arrangés par trois. Ceci correspond à un système comportant non pas un seul fil pour véhiculer le courant, mais **trois**. On appelle les trois fils transportant l'électricité les **phases** et parle alors de système **triphasé**.¹

Maintenant, pourquoi est-ce que les gérants du réseau s'embêtent à utiliser trois câbles pour transporter l'énergie électrique plutôt qu'un seul ? La première question qu'on peut se poser est de savoir quelle quantité de fils est utilisée dans les deux cas. Pour cela, représentons les circuits électriques : dans un cas idéal, on a en premier un monophasé alimenté par une tension efficace V et débitant sur une résistance R , ensuite un triphasé dont chaque phase est alimentée par la même tension efficace V et débitant dans une résistance $3R$. Vous êtes alors d'accord avec moi que par la loi d'Ohm, au vu des résistances, l'intensité circulant dans chaque phase du triphasé est le tiers de celle circulant dans le monophasé ? On peut alors écrire la puissance active consommée dans chaque cas, qui je le rappelle est la puissance effectivement consommée par la charge. Dans le cas du monophasé, la puissance active est $\mathcal{P}_{J,mono} = RI_{mono}^2$ et pour le triphasé, la puissance active totale est $\mathcal{P}_{J,tri} = 3 \times 3RI_{mono}^2/9 = RI_{mono}^2 = \mathcal{P}_{J,mono}$. Ainsi, la puissance active fournie par le réseau et consommée par la résistance est identique dans les deux cas. Donc il y a une équivalence de puissance fournie monophasé/triphasé. Seulement, les câbles électriques ne supportent pas une densité de courant infinie, sinon l'échauffement des fils les dégrade : il faut une section de fil minimale pour supporter un courant donné. La relation entre les courants montre alors que la section des fils peut être diminuée par 3 quand on passe d'un système monophasé à un système triphasé. Pour voir si cette diminution de la section représente une économie d'argent pour le constructeur, il faut encore comparer les longueurs des câbles de ces deux systèmes. Dans le cas du monophasé, le câble a une longueur $2L$, tandis que la longueur totale est $3L$ pour le triphasé. Il y a donc un rapport de volume de câble de 2 entre les systèmes monophasé et triphasé, ce qui représente un gain économique conséquent sur l'ensemble du réseau. Maintenant, si on considère le dernier maillon du réseau, il est constitué d'un système triphasé basse tension de l'ordre de 12 V efficace, plus un fil de neutre. Chaque phase est connectée à un ménage. Ici, les résistances sur le triphasé ne sont pas les mêmes : par exemple, un ménage branche un four et les deux autres n'utilisent rien. Il y a alors un déséquilibre des courants entre les phases qui fait que le neutre est parcouru par le courant dans la première phase. Le neutre est donc en pratique un fil identique à celui des phases. Il n'y a pas de gain de matière pour le triphasé sur cette partie du réseau.²

Deux autres raisons en faveur de l'utilisation du triphasé sont que la puissance instantanée fournie pour un système triphasé est constante dans le temps, contrairement au cas d'un système monophasé. Ceci évite la détérioration mécanique des convertisseurs électromécaniques par l'oscillation de la puissance électrique. D'autre part, expérimentalement, le rendement des machines est plus important en triphasé qu'en monophasé.

Dans la suite, on va considérer le cas idéal d'un système triphasé équilibré direct, qui correspond à un système de **trois tensions identiques déphasées de $2\pi/3$** débitant sur des **charges identiques**. Les tensions de chaque phase sont alors :

$$v_1(t) = \sqrt{2}V \sin(\omega t) \quad ; \quad v_2(t) = \sqrt{2}V \sin(\omega t - 2\pi/3) \quad ; \quad v_3(t) = \sqrt{2}V \sin(\omega t - 4\pi/3)$$

Il s'agit d'un système de tensions alternatives ; historiquement les premiers réseaux fonctionnaient avec du continu, comme par exemple celui de New-York en 1882 par Thomas Edison. Le problème rencontré à l'époque était que l'électricité ne pouvait être transportée que sur quelques kilomètres depuis la centrale de production. Pour des raisons

1. Dans une prise de moteur, les autres fils correspondent à ce qu'on appelle le **neutre** qui sert de référence de tension entre les phases, et la **terre**, qui est un conducteur relié au sol qui permet d'imposer le potentiel électrique de la carcasse à celui du sol, ce qui réduit significativement les risques d'électrocution lorsqu'on touche l'appareil en marche.

2. Cette discussion n'est pas faite dans le livre de L. Lasne au chapitre 3. On peut sauter cette discussion car elle ne concerne que la dernière partie du réseau.

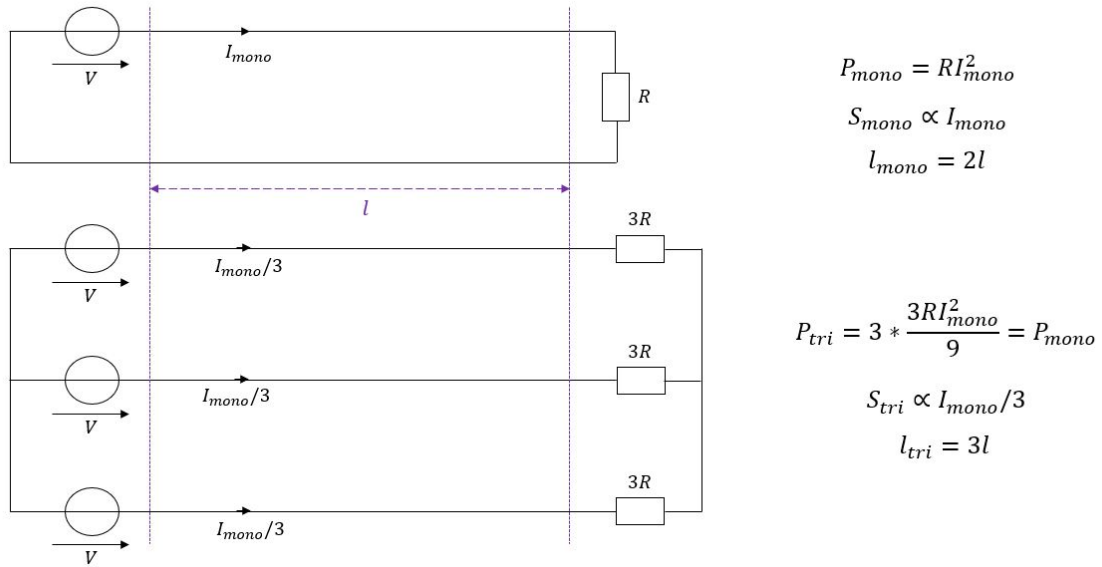


FIGURE 1 – Comparaison du circuit monophasé et du circuit triphasé.

que nous évoquerons dans la suite, c'est le courant alternatif, défendu notamment par George Westinghouse et Nikola Tesla. Le système triphasé s'obtient un pratique en branchant les phases de deux façons différentes :

- *Couplage en étoile (Y)* : Les trois phases sont reliées entre elles par un fil nommé **neutre**. Les tensions entre chaque phase et le neutre sont appelées **tensions simples**. Les tensions entre les phases sont les **tensions composées** définies par (en souligné, les grandeurs en complexe)

$$\underline{U}_{ik} = \underline{V}_i - \underline{V}_k$$

De façon conventionnelle, V renvoie aux tensions simples et U aux tensions composées. Le système de tensions composées correspond à un nouveau système triphasé, et on montre, par calcul ou en utilisant la représentation de Fresnel, que les valeurs efficaces sont liées par

$$U = \sqrt{3}V$$

Remarque : Le triphasé qui arrive au consommateur λ est 230 V/400 V, ce qui correspond aux valeurs efficaces de la tension simple et de la tension composée respectivement.

- *Couplage en triangle (D)* : Les générateurs de tension sont associés en série, ou schématiquement en triangle. Ce couplage est caractérisé par les tensions simples $\underline{U}_{ik}$, ainsi que les **courant de phase** $\underline{J}_{ik}$ et les **courant de ligne** $\underline{I}_k$. Par exemple, $\underline{I}_1 = \underline{J}_{31} - \underline{J}_{12}$. On trouve de même dans le cas du couplage en triangle

$$I = \sqrt{3}J$$

Ces couplages sont possibles tant au niveau de la source que de la charge. Si le couplage est en étoile des deux côtés, on peut choisir de relier leurs neutres ou non.

Considérer le circuit triphasé équilibré (charges identiques sur les trois phases) permet une simplification de l'étude de ces systèmes. Chaque phase ayant un comportement équivalent, on peut ne s'intéresser à ce qu'il se passe sur une seule phase. Ceci revient à étudier des système monophasés.

Maintenant que nous avons compris pourquoi il y a trois fils sur un pylône électrique, on va s'intéresser aux caractéristiques des tensions aux bornes des phases.

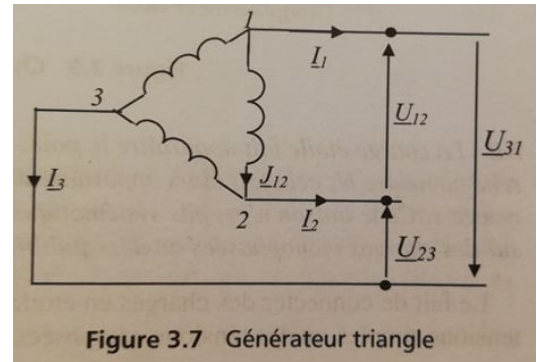
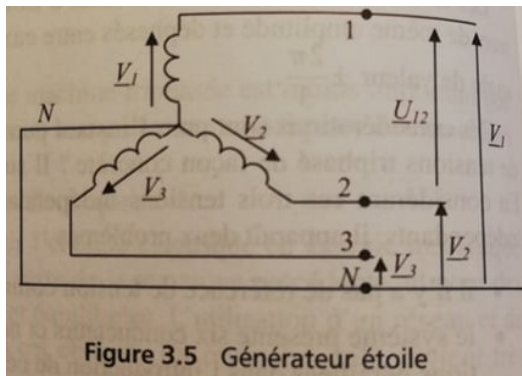


FIGURE 2 – Couplages étoile (à gauche) et triangle (à droite).



I.B Tension de ligne

Considérons un système triphasé équilibré, la charge sur chaque phase est constituée seulement du fil électrique. Chaque phase se comporte alors comme un système monophasé.

Soit V la valeur efficace de la tension, I celle de l'intensité, φ le déphasage entre tension et courant (dû à la réactance de la ligne), R_l la résistance de la ligne (partie réelle de l'impédance de la ligne). La puissance dissipée par effet Joule (ou puissance active) dans la ligne est donc

$$\mathcal{P}_{\text{Joules}} = R_l I^2 = R_l \left(\frac{\mathcal{P}_{\text{élec}}}{V \cos(\varphi)} \right)^2$$

où $\mathcal{P}_{\text{élec}}$ est la puissance électrique totale implémentée. Nous voyons qu'augmenter la valeur efficace de la tension diminue les pertes par effet Joule dans les lignes. Il faut donc privilégier les hautes tensions pour les transports sur de longues distances.

Il y a d'autres types de pertes sur une ligne électrique. La tension véhiculée par les fils est sinusoïdale. Ainsi, sur l'ensemble du réseau, la puissance réactive des fils est définie par les effets capacitifs dus à la mise en parallèle de fils sous tensions, et d'effets inductifs des fils. La puissance réactive totale diminue la puissance active à intensité et tension simple efficaces données. De plus, l'effet de peau qui résulte du courant alternatif concentre les courants en surface et contribue à une augmentation de la résistance effective de la phase, donc augmente la puissance Joule dissipée dans le fil de phase.

Privilégier l'utilisation du courant continu semble donc être le moyen de diminuer les pertes électriques sur le réseau. Cependant, les appareils électriques fonctionnent souvent en courant alternatif, d'où la nécessité d'acheminer ce type de courant au consommateur pour éviter des étapes de conversion continu vers alternatif qui augmentent les pertes globales. Surtout, et c'est une raison principale pour la victoire de l'alternatif sur le continu, les systèmes permettant l'élévation de la tension pour réduire les pertes Joule ne fonctionnent qu'avec du courant alternatif. Après avoir vu la nécessité d'augmenter la tension pour diminuer les pertes, nous allons aborder la façon dont cette élévation est produite.



II Le transformateur

II.A Analogie circuit magnétique / circuit électrique

L'objet qui permet l'élévation d'une tension sinusoïdale est le transformateur. Comme vous pouvez le voir, il est composé de deux bobines et d'un élément métallique, qui est un ferromagnétique doux. Le but du transformateur est de mettre en relation les deux bobines par le phénomène d'induction, qui impose l'utilisation du courant alternatif. En pratique, on alimente le premier bobinage qu'on appelle par conséquent le **primaire**, pour faire apparaître une tension au deuxième bobinage, qui est le **secondaire**. C'est donc le flux du champ magnétique créé par le primaire

qui va être à l'origine de la tension au secondaire. Si je plaçais les deux bobines une à côté de l'autre, dans l'air, qu'est-ce que vous pensez du flux du champ magnétique créé par le primaire au niveau du secondaire ? Vous avez vu que le champ magnétique d'un dipôle magnétique est proportionnel à $1/r^3$ avec r la distance au point d'application du champ, donc dans l'air libre le champ magnétique créé par le primaire sur le secondaire est nul et il n'y a pas de force électromotrice induite au secondaire. Pour que le champ magnétique soit non nul dans le secondaire, il faut guider les lignes de champ magnétique avec un matériau ferromagnétique, tout comme vous utilisez des conducteurs électriques pour guider un courant.

Vous aviez vu qu'un matériau ferromagnétique est caractérisé par sa courbe $\mathbf{B}(\mathbf{H})$ où $\mathbf{H}$ l'excitation magnétique et $\mathbf{B}$ est l'induction magnétique. Dans un ferromagnétique, cette courbe présente un hystérésis dont l'origine est le réarrangement aléatoire des domaines de Weiss lors de la désaimantation. Les ferromagnétiques sont classés en deux familles selon la taille du cycle d'hystérésis, ceux qui ont petit cycle sont appelés **doux**.

Considérons un circuit magnétique composé d'un matériau magnétique homogène linéaire sur lequel est enroulée une bobine seulement au primaire, composée de N spires et parcourue par un courant I . On formule l'hypothèse de matériau linéaire pour un ferromagnétique doux hors saturation car son cycle d'hystérésis étant étroit, il peut être assimilé à une droite $B = \mu H$ hors du régime de saturation. On peut formuler une hypothèse supplémentaire - qui est vérifiée en pratique grâce au fait que le transformateur fonctionne comme décrit par le modèle, et dont nous pourrions vérifier la cohérence plus tard - qui est que le matériau ferromagnétique emprisonne les lignes de champ magnétique, et que celles-ci parcourent le ferromagnétique en suivant sa géométrie. De plus, la norme de l'excitation magnétique est indépendante du point considéré dans le ferromagnétique : les effets de bord dus à l'extension finie sont négligés car les lignes sont canalisées par le matériau, on ne tient pas compte de la zone de changement d'orientation de l'excitation au niveau des sommets du matériau, on considère le ferromagnétique comme infiniment fin (sinon la longueur du contour varie alors que le théorème d'Ampère donne que NI est une constante) et on considère le ferromagnétique comme un isolant électrique (cf courants de Foucault).

Nous allons écrire le théorème d'Ampère dans le cadre de ce modèle : on choisit un contour fermé suivant la géométrie du matériau magnétique et orienté dans le sens anti-trigonométrique. Ce contour a une longueur l et est traversé N fois par le courant I . Le théorème d'Ampère appliqué à ce contour orienté donne :

$$NI = \oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} \\ = H.l$$

L'induction magnétique est donc :

$$B = H\mu = \mu \frac{NI}{l}$$

Ce n'est pas précisé dans cette relation, mais l'induction suit la géométrie du matériau : elle est perpendiculaire en tout point à sa section. Ceci conduit à un flux caractérisé par la **relation d'Hopkinson**, à savoir :

$$\Phi = NI \frac{\mu S}{l} = \frac{NI}{\mathcal{R}} ; \quad \mathcal{R} = \frac{l}{\mu S}$$

$\mathcal{R}$ est appelée la **réductance** du circuit magnétique, en H^{-1} . Elle s'exprime telle la résistance d'un circuit électrique, elle correspond donc à une résistance magnétique. Par analogie, Φ est le courant magnétique et NI est la **force magnétomotrice** en « ampères-tours ». Pour les ferromagnétiques doux, $\mu \simeq 1500\mu_0$, donc la réductance du circuit magnétique est immensément plus faible que celle de l'air.

Ainsi, le matériau magnétique est au circuit magnétique l'équivalent des conducteurs électriques d'un circuit électrique : il canalise le flux magnétique Φ et les lignes de champ magnétique $\mathbf{H}$. Ceci conforte l'hypothèse du modèle. En pratique, le caractère fini de $\mathcal{R}$, i.e. le fait que $\mu_r \neq \infty$ fait qu'une partie des lignes de champ s'échappe du matériau. Ceci correspond à des pertes pour le circuit magnétique. Le tableau 1 résume le parallèle magnétique/électrique.

Si l'on souhaite déterminer la valeur de la tension aux bornes du primaire, il faut utiliser la relation bien connue en n'oubliant pas que chaque spire produit une fém : $v = N \frac{d\Phi_{\text{tot}}}{dt} = L \frac{di}{dt}$. Avec $\Phi_{\text{tot}} = \Phi_m + \Phi_f$ la somme des flux circulant dans le matériau magnétique et le flux de fuite, on obtient

$$v = L_m \frac{di}{dt} + L_f \frac{di}{dt} ; \quad L_k = \frac{N^2}{\mathcal{R}_k} = \frac{N^2 \mu S_k}{l_k}$$

On représente alors le circuit magnétique comme l'association de deux inductances en série sur un circuit électrique.

Circuit magnétique	Circuit électrique
Ferromagnétique	Conducteur électrique
$\mathcal{R} = l/\mu S$	$R = l/\sigma S$
μ	σ
Φ	I
NI	e

TABLE 1 – Équivalence circuit magnétique / circuit électrique.

↓ Désormais, on sait comment guider les lignes de champ magnétique. On va donc pouvoir faire circuler un flux non nul au secondaire d'un transformateur et réaliser la transformation d'une tension.

II.B Transformateur idéal

Dans le modèle du transformateur idéal, le ferromagnétique est linéaire, de réluctance strictement nulle telle qu'il n'y ait aucun flux de fuite. Il comporte deux bobinages qui sont des inductances pures, c'est-à-dire non résistifs et le ferromagnétique n'est traversé que par un flux magnétique (conductivité électrique nulle, pas de courants de Foucault). Nous ne nous intéresserons qu'au régime permanent pour lequel les grandeurs du problème adoptent leur forme définitive (les tensions sont sinusoïdales et conservent la même amplitude au cours du temps par exemple). Au démarrage, l'excitation magnétique est créée par le primaire. Ce circuit est donc représenté en convention récepteur. Le secondaire est celui qui va générer la tension d'intérêt, il est donc représenté en convention générateur. Le point permet de repérer le sens de la flèche de tension **au niveau du bobinage** : elle pointe vers le point. Ceci permet d'orienter les intensités correctement.

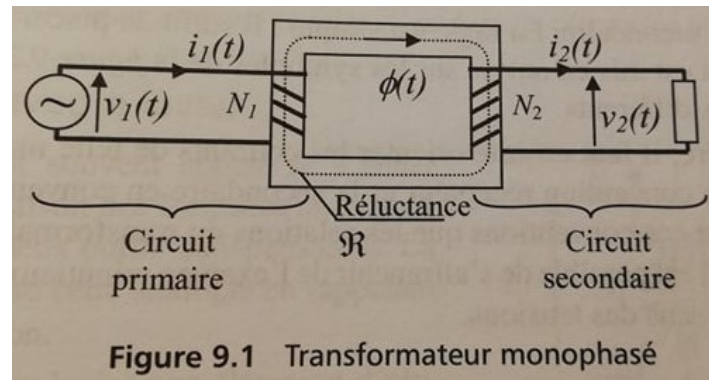


FIGURE 3 – Transformateur monophasé idéal.

Dans cette configuration, la loi de Faraday écrite aux deux bobinages donne

$$v_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad ; \quad v_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

Ceci implique la relation fondamentale de la transformation des tensions :

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{V_2}{V_1} = m$$

m est le **rapport de transformation** des tensions. Ainsi, la conversion de la tension par le transformateur idéal est déterminée par le rapport du nombre de spires entre le secondaire et le primaire, et uniquement par ce rapport. **Pour élever une tension, il faut un nombre de spires supérieur au secondaire, et inversement pour abaisser une tension.** La réversibilité du processus est une de ses propriétés remarquables et pratiques.

D'un autre côté, la relation de Hopkinson est valable pour un circuit magnétique entouré de plusieurs bobinages. Dans ce cas, elle s'écrit

$$N_1 i_1 - N_2 i_2 = \mathcal{R} \Phi = 0$$

ce qui donne

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{1}{m}$$

L'élévation de la tension s'accompagne par conséquent d'un abaissement de l'intensité par le même facteur et vice-versa. Les deux relations tensions / courants permettent de remarquer

$$\underline{S}_1 = \underline{V}_1 \underline{I}_1^* = \underline{V}_2 \underline{I}_2^* = \underline{S}_2$$

La **puissance instantanée est entièrement transmise** du primaire au secondaire, ce qui correspond au **passage intégral des puissances actives et réactive** du primaire vers le secondaire.

« Effet transformateur »

La transformation de la tension du primaire au secondaire est due à l'invariance du flux magnétique avec la charge au secondaire. En effet, la tension au primaire est fixée par l'alimentation et peut être considérée indépendante de la charge au secondaire : cette dernière n'influe pas sur la fém du secondaire et ne modifie donc pas le flux magnétique dans le circuit magnétique. Le flux magnétique engendré par le primaire lorsque le secondaire est à vide est $\Phi_0(t) = \frac{1}{N_1} \int_0^t v_1(t') dt'$. Cette relation étant inchangée lorsque le secondaire débite sur une charge quelconque, le flux reste $\Phi_0(t)$. On obtient alors $N_1 i_1 - N_2 i_2 = \mathcal{R} \Phi_0$: les courants au primaire et au secondaire s'adaptent pour garder $\Phi = \Phi_0$.

Dans le réseau français, les tensions efficaces s'échelonnent sur des valeurs entre 50 V et 400 kV. Qu'est-ce que cela implique sur les transformateurs utilisés ?

Avec la relation au primaire $v_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt}$, si on considère une tension sinusoïdale $v_1(t) = V\sqrt{2} \cos(\omega t)$, alors

$$\Phi(t) = \frac{V\sqrt{2}}{N\omega} \sin(\omega t) + \Phi(0) \implies B(t) = \frac{V\sqrt{2}}{N\omega S} \sin(\omega t) + \frac{\Phi(0)}{S}$$

Si on néglige le flux initial dans le ferromagnétique, lié à la courbe d'hystérésis (on peut le faire après le régime transitoire dont on n'a pas tenu compte, pendant lequel on force le flux par la tension au primaire et qui est à l'origine de l'appel d'un courant plus intense au démarrage d'un appareil électrique), on remarque que le primaire induit un champ magnétique de valeur maximale :

$$B_{\max} = \frac{V\sqrt{2}}{2\pi N f S}$$

Avec l'expression de l'inductance, on aboutit à :

$$B_{\max} = \frac{V}{\pi f} \sqrt{\frac{\mu}{2lSL}}$$

L'amplitude de l'induction magnétique est limitée par la saturation du matériau : il faut $B < B_{\text{sat}}$, sinon le matériau ne peut pas développer l'induction souhaitée et (je pense !) l'induction excédentaire s'échappe du matériau. On sortirait aussi du cadre linéaire, ce qui n'est pas pris en compte dans le modèle. On voit donc que, lorsque la tension efficace à un bobinage est élevée, on a intérêt à prendre un circuit magnétique volumineux, et d'inductance élevée. Le fait que le circuit magnétique soit de grande inductance permet également de travailler avec des courants plus faibles dans les bobinages pour à tension efficace fixée ($V \propto LI$), ce qui permet de limiter l'échauffement des fils par effet Joule (on doit les refroidir en pratique pour les fortes puissances).

↓ On voit voir ce qu'il se passe dans un vrai transformateur, en particulier si la transformation des tensions se fait bien selon cette relation.

II.C Transformateur réel



Transformateur réel



Construire un transfo et déterminer la relation $v_2(v_1)$ pour une fréquence fixée. Brancher un générateur et une résistance sur le primaire, brancher une résistance sur le secondaire et mesurer la valeur efficace des tensions et courants sur l'oscilloscope. Tracer $v_2 = f(v_1)$: on espère obtenir une droite ; comparer la pente avec le rapport de transformation $m = N_2/N_1$. Pareil avec les intensités, et comparer les puissances apparente.

On s'attend à un comportement très proche du transformateur idéal. L'écart au modèle a quatre origines majeures :

- la résistance finie des bobinages, qui consomment une puissance active non nulle par effet Joule : ce sont les pertes cuivre.
- le flux de fuite, qui diminue le flux vu par le secondaire et donc la fém induite au secondaire.
- les pertes par hystérésis. Le modèle de ferromagnétique linéaire est inexacte ; la présence du cycle entraîne une perte d'énergie volumique (liée à l'entraînement des parois de Bloch lors des aimantations et leur reconstruction lors des désaimantations). La puissance perdue est donc proportionnelle au nombre de fois que le cycle est décrit en une seconde, donc à la fréquence f de la tension.
- les pertes par courants de Foucault : le ferromagnétique étant aussi un conducteur électrique, il apparaît des courants par induction. La puissance dissipée par effet Joule dans le ferromagnétique est proportionnelle à f^2 .

Les deux derniers mécanismes représentent ce qu'on appelle les **pertes fer**. À fréquence fixée, ces pertes sont liées à la tension aux bornes du primaire (ou bien de façon équivalente celle au secondaire) et consomment une puissance active. Elles sont donc représentées par une résistance en parallèle avec l'inductance magnétisante L_m .

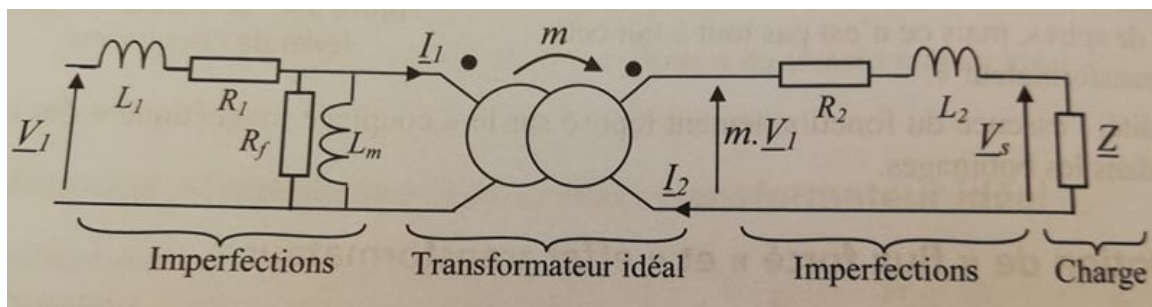


FIGURE 4 – Modèle du transformateur idéal.

Nous avons vu pourquoi le triphasé est utilisé et comment modifier une tension alternative pour l'adapter au transport de l'énergie électrique. On va terminer cette séance en regardant comment cela est mis en pratique sur le réseau électrique français.

III Réseau électrique français

III.A Historique

Le premier réseau électrique français fut élaboré en 1882, et servait à alimenter une petite ville. Il était alimenté par une centrale hydrolique et fonctionnait en courant continu. À cette époque, le transport se faisant seulement sur de courtes distances, inférieures ou de l'ordre de 100 km, typiquement chaque ville possédait sa propre centrale et son propre réseau, avec ses caractéristiques tension efficace / fréquence. Les campagnes étaient ajoritairement dépourvues d'électricité. Ensuite, lorsque la distance de transport a augmenté, les réseaux se sont interconnectés. Il a fallu à ce moment choisir une fréquence commune pour les réseaux qui fusionnent, c'est le choix du 50 Hz qui s'est majoritairement fait en Europe. Il aura tout de même fallu attendre les années 1950 pour que le 50 Hz soit adopté sur l'ensemble de la France. En 1913, les lignes électriques aériennes pouvaient être alimentées par du 110 kV, celles souterraines par du 60 kV (et c'était une grande fierté nationale), le premier réseau 400 kV comme on fait aujourd'hui en très haute tension (THT) est réalisé en 1937 en Allemagne, et cette tension fut choisie pour l'ensemble de l'Europe dans les années 1950. Pour la basse tension, c'est-à-dire le système triphasé qui arrive aux particuliers, les tensions efficaces simple et composée ont été adoptées en 1986 à 230 V et 400 V. Aujourd'hui, on parle de réseaux transfrontaliers pour échanger de l'énergie électrique entre les pays afin notamment de mieux adapter la production de l'électricité à l'échelle continentale par rapport aux besoins à l'instant t.

Outre les questions des tensions efficaces et de la fréquence sur les phases, c'est le caractère aérien ou enterré du réseau qui a fait débat. Si du point de vue technologique, les lignes aériennes peuvent être alimentées par des tensions plus

importantes que les lignes souterraines, elles ne font pas l'unanimité. En effet, outre le fait qu'elles sont critiquées pour leur visibilité dans le paysage, elles sont susceptibles d'être frappées par la foudre, ce qui induirait une surcharge électrique importante, l'échauffement, la rupture des fils et une coupure de courant chez le consommateur. Pour éviter cela, un câble ou un système à pointes conductrices relié au pylône permet de faire paratonnerre. Un deuxième problème des lignes aériennes est que les fils tombent sous leur propre poids, il faut donc construire des pylônes hauts et ne pas trop les espacer. Le vent peut également faire bouger les câbles, ce qui représente une contrainte supplémentaire sur le pylône. Enfin, les lignes aériennes sont peu isolées électriquement. Les lignes THT, qui sont à des tensions de plusieurs centaines de kV, peuvent donc être à la source d'arcs électriques. Chaque phase doit donc être séparée d'environ 3 m et aucun objet conducteur ne doit s'en approcher³.

III.B Structure actuelle

Le réseau est découpé sur trois échelles :

1. *Le réseau de transport.* Il est utilisé pour transporter l'énergie électrique sur de longues distances, notamment grâce à des tensions efficaces de l'ordre de 50 kV à 400 kV. Il est composé de mailles permettant de relier la centrale à différents postes de transformation dans les zones où le courant est utilisé. La structure en mailles permet d'éviter les coupures de courant sur une des zones en redirigeant le courant dans les phases non endommagées. Par exemple, si la foudre provoque une panne sur un élément de la maille, alors le courant est réparti sur d'autres éléments et redirigé vers la zone en question grâce au réseau maillé.
2. *Le réseau de répartition.* Il est utilisé pour couvrir l'ensemble d'une région avec du courant de 30 kV à 150 kV issu d'un abaissement de la tension du réseau de transport dans un **poste de transformation** grâce à un transformateur triphasé ou bien d'une centrale moyenne puissance (de l'ordre de 100 MW). Il est constitué de deux points sources de tension entourant les différents points de répartition. Le fait d'utiliser deux sources permettent la distribution du courant en cas de panne de l'une d'elle.
3. *Le réseau de distribution.* Ils se composent d'un réseau moyenne tension de 1 kV à 50 kV alimentant un réseau basse tension 50 V à 1000 V. Leur structure est en arborescence : une seule ligne du réseau moyenne tension alimente plusieurs lignes du réseau basse tension. Un fil de neutre est créé au niveau du secondaire, grâce à un couplage Dz0 triangle-zigzag qui ne déphase pas les tensions au primaire et au secondaire. Dans le cas du réseau basse tension uniquement, le fil de neutre provenant de ce dernier transformateur triphasé est également distribué, permettant aux usagers de relier leurs appareils électriques au neutre du réseau. Dans ce réseau, le neutre est essentiel car les charges ne sont plus équilibrées : chaque phase étant reliée à un ensemble de foyers, il faudrait que tout le monde consomme la même puissance apparente en même temps. L'excès de courant sur une phase circule alors dans le neutre, qui ferme le circuit électrique.

Conclusion

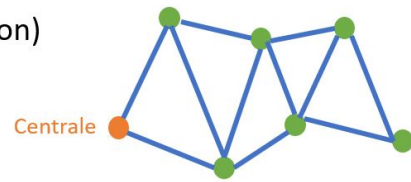
Nous avons vu dans cette leçon comment est distribuée l'électricité depuis plus de 100 ans. L'utilisation d'un système triphasé en courant alternatif permet le transport de l'énergie électrique sur de longues distances à moindre coût en élevant la tension grâce des transformateurs. Aujourd'hui, la technologie se développe autour de l'élévation des tensions continues vers les ultra hautes tensions, vers 800 kV, pour s'affranchir des pertes liées à l'utilisation du courant alternatif. La Chine, qui est en essor, est en train de construire son parc électrique grâce à cette technologie : il s'agit donc d'un enjeu moderne majeur, malgré les cent ans d'histoire du transport de l'électricité. J'espère que désormais, vous ne verrez plus vos prises chez vous de la même façon :).

Ce qui a été fait

Jusqu'à la fin du II.B, en 40 minutes. Un transfo a été monté et emmené pour montrer au jury (et canaliser mon attention au passage pour ne pas oublier mon blabla du début de la partie II.A.). Dipao pour les schémas du I.A et l'analogie circuit magnétique / circuit électrique.

3. Dans un village près de chez moi, un camion avec une petite grue s'est approchée à moins de 10 mètres d'une ligne THT, ce qui a provoqué un arc électrique et une coupure de courant dans 40 maisons aux alentours.

- Réseau de transport : 50kV - 400kV (Très Haute Tension)



- Réseau de répartition : 30kV – 150kV



- Réseau de distribution : 1kV – 50kV (moyenne tension)
→ 50V – 1kV (basse tension)

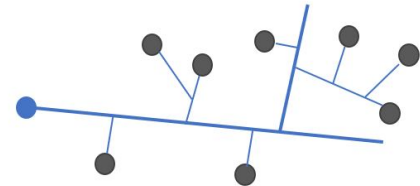


FIGURE 5 – Comparaison du circuit monophasé et du circuit triphasé.

Questions

- Intérêt du triphasé pour la production ? → Le rendement massique est plus important en triphasé qu'en monophasé (donner un exemple avec schéma) : rotor et stator (fonctionnement générateur : le rotor tourne dans le champ magnétique du stator, ce qui crée du courant dans le rotor par induction). Comment on fait 3 phases avec un convertisseur électromécanique ? → Il faut mettre plusieurs collecteurs sur l'arbre du rotor (donc on n'a besoin que d'un arbre pour produire du triphasé !). Pourquoi le courant est continu dans le cas d'une dynamo ? → Le champ magnétique du rotor est statique ; pour produire du courant alternatif il faudrait un champ tournant.
- Pourquoi on s'arrête à 3 phases et non à plus ? → Expérimentalement, on a remarqué que le rendement baisse à partir de plus de trois phases.
- Quelle est la fréquence du courant électrique dans les prises ? → 50Hz (sauf 60Hz en Amérique). Pourquoi cette valeur ? Les ampoules clignotent sur du courant alternatif quelque soit la fréquence, alors pourquoi 50Hz ? → L'œil est capable de voir seulement jusqu'à 25 images par secondes donc à 50Hz on ne voit pas les ampoules clignoter. Mais alors, pourquoi on ne prend pas une fréquence plus basse, ou plus haute ? → Il y a un compromis à trouver sur la fréquence, si elle est élevée on accentue l'effet de peau (cf biblio), ce qui augmente la résistance de la ligne et donc les pertes par effet Joule dans la ligne.
- Comment faire pour pallier à une variation de fréquence du courant alternatif produit par un système dont on ne contrôle pas la fréquence, par exemple une éolienne ? Comment passer du continu à l'alternatif (exemple, avec un panneau solaire, on produit du continu) ? → On utilise un hacheur pour passer de continu à alternatif. Pour les éoliennes, on convertit d'abord en continu puis on hache le signal.
- deux fils à cotés : effet capacitif (a petit courant)
- trop grand courant dans les fils beaucoup de perte par effet de peau (courant se concentre sur les surfaces)
- Y a-t-il un neutre chez nous ? Que voit-on si on ouvre une prise chez nous ? → Le neutre est recréé au niveau du dernier transformateur de la ligne (attention, il n'y en a pas entre le transfo de la centrale et le dernier transfo) donc il y a un neutre chez nous. Dans une prise, on voit une des trois phases du système triphasé, le neutre et la terre.
- C'est quoi le câble de terre ? Si on suit le câble de terre, il nous amène où ? → Le câble de terre est un conducteur qui relie la terre à la carcasse de l'objet. S'il y a par exemple un mauvais contact dans l'objet qui ferait que la carcasse est à un certain potentiel vis-à-vis de la terre, alors une personne qui touche la carcasse risquerait l'électrocution. Si la carcasse est reliée à la terre par un câble, alors, comme le câble est bien meilleur conducteur que la personne, c'est lui qui ferme le circuit et subit la décharge électrique. Il sert donc de moyen de protection.
- Ordre de grandeur de résistance de la peau ? → 10 kΩ (très résistive). Pour la chair ? → 10, beaucoup plus conducteur : faire attention quand on a une plaie !

- Dans le I.B, pour montrer qu'il faut augmenter la tension pour transporter l'énergie loin, tu as pris juste comme circuit un générateur avec une tension V et une résistance R_l . Qu'est-ce qui ne va pas ? → En pratique, une ligne électrique doit forcément débiter sur une charge (sinon elle sert à rien) : une résistance/tension a été négligée là. Ce schéma ne rend pas compte du transport de l'énergie. Il faudrait plutôt ajouter une charge au bout, comme une résistance $R_{consomateur}$ pour faire simple, puis faire un pont diviseur de tension au niveau de R_l et raisonner à partir de ça.
- Est-ce que tu sais comment retrouver la loi des mailles ? → Avec un théorème de Chasles (ou circulation de $\mathbf{E}$ en ARQE pour laquelle $\mathbf{E} = -\nabla V$).
- C'est quoi l'ARQS ? → Approximation des régimes quasi stationnaires, elle permet simplifier les équations de Maxwell en comparant les contributions des sources. Hypothèse à ne pas oublier : elle est statique, i.e. on ne tient pas compte de la propagation (les champs s'adaptent instantanément aux variations des sources). ARQS magnétique : effets courant $\gg$ effets charge.
- En TP, est-ce qu'on est en ARQS, et laquelle ? → Oui. Et pour EDF c'est le cas ? → Non car la propagation n'est pas instantanée aux échelles du transport longue distance (pays, région,...).
- Définition d'un ferromagnétique ?
- Pourquoi on prend un ferromagnétique doux dans un transformateur et pas un dur ? → Ferro doux : approximation linéaire, petit cycle d'hystérésis donc moins de pertes, et ferro durs peuvent devenir des aimants.
- Comment calculer les pertes dans un ferromagnétique ? Deux types de perte : 1) Les pertes par hystérésis. L'aire du cycle est l'énergie volumique perdue lors du parcours complet du cycle, donc la puissance perdue par hystérésis est proportionnelle à cette aire $\times$ la fréquence f . 2) Les pertes par courants de Foucault. Une hypothèse du modèle de ferro idéal est que sa conductivité électrique est nulle, ce qui n'est pas le cas en pratique. Il se développe alors un courant de Foucault par le fait que le champ magnétique varie dans le temps à l'intérieur du ferro. Il en résulte des pertes par effet Joules qui sont proportionnelles à f^2 .
- Quelle est la différence entre H et B ? Comment on les appelle ? Comment on les lie les deux ? → H est l'excitation magnétique, ou champ magnétique. C'est ce champ qui est généré par l'excitation du milieu magnétique par un bobinage. B correspond à l'induction magnétique, elle correspond à $\mu_0(H + M)$ avec M l'aimantation que développe le matériau en présence de l'excitation. Dans le cas linéaire $B = \mu H$, pour un ferro c'est plus complexe.
- Qu'est-ce qu'on mesure physiquement, avec un teslamètre par exemple ? → Expérimentalement (avec un teslamètre), on a mesure B .
- Tu peux écrire le théorème d'ampère ? Comment on retrouve avec maxwell ? → On considère l'équation de Maxwell-Ampère dans le cadre de l'ARQS magnétique : il n'y a pas de contribution du courant de déplacement, puis Stokes.
- C'est quoi une valeur efficace ? $I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(t)^2 dt}$
- Tu as dit que le ferro canalise les lignes de champ, ça vient d'où ? → $\mu_{air} \simeq \mu_{ferro}/1500$ donc $\mathcal{R}_{air} \gg \mathcal{R}_{ferro}$: l'air étant bien plus mauvais conducteur magnétique que le ferro, il n'y a pas de flux magnétique qui s'échappe du ferro. En pratique $\mu_{ferro} \neq \infty$ donc il y a un flux de fuite, mais négligeable devant le flux magnétisant.
- Quelles sont les différents types d'induction ? → Neumann et Lorentz. Ici, c'est Neumann.
- Tu as montré qu'il y a des pertes dans la ligne, donc pourquoi pour transporter le courant on ne colle pas plein de transfos ? → Dans un transformateur réel, il y a des pertes cuivre qui correspondent aux pertes qu'on a dans les câbles, mais on a de en plus les pertes fer (décrites précédemment) donc c'est moins rentable de faire une chaîne de transfos (et ce serait moins joli dans le paysage que les lignes électriques).
- ODG des pertes par transport de ligne dans un câble ? → Pour le transfo, le rendement en puissance est supérieur à 95%.
- Quelles sont les caractéristiques du courant qui arrive dans un ménage ? Est-ce que c'est le même courant et la même puissance dans toute la maison ? → EDF fournit du 230V entre une seule des phases et le neutre, l'intensité transportée peut dépasser les 10A. Sur une prise on peut débiter 2,5A, pour l'éclairage c'est plutôt 1,5A et pour la plaque de cuisson c'est encore différent. Donc comme on fait ? → La phase d'EDF est acheminée à un tableau électrique qui redistribue le courant.

- Pourquoi Edison pensait que le continu était mieux que alternatif? → Pour lui, l'alternatif était dangereux pour l'homme (pour le montrer, il avait même participé à la conception de la chaise électrique). En fait, le corps a une capacité électrique qui coupe le courant continu, donc le courant alternatif passe plus facilement. L'alternatif est donc plus dangereux.
- En salle de TP, on utilise des câbles spéciaux qui contiennent les deux fils pour former un circuit électrique (portent à la fois le + et le -). Ce sont quoi, pourquoi on ne les utilise pas pour le transport de l'énergie électrique? → Ce sont les câbles coaxiaux. Ils servent à la transmission de signaux et donc pas conçus pour transporter de grandes puissances.
- D'où vient la puissance dissipée par effet Joule? Comment est le champ électrique dans le câble et à l'extérieur du câble? Que disent les relations de passage? → La composante tangentielle est continue à l'interface (et celle normale est discontinue) Donc il y a un champ électrique non nul en-dehors d'un fil! Même question pour le champ magnétique. → Le champ magnétique créé par un fil parcouru par un courant dans son axe est orthoradial. Quel est le vecteur qui traduit le transport de l'énergie électromagnétique? Tu peux le dessiner sur un schéma? → Il s'agit du vecteur de Poynting $\mathbf{\Pi} = \mathbf{E} \wedge \mathbf{B} / \mu_0$, il est radial et dirigé vers le câble. Tu peux donner l'équation avec le vecteur de Poynting et l'intégrer autour du câble? $\oint \mathbf{\Pi} \cdot d\mathbf{S} = - \iiint \mathbf{j} \cdot \mathbf{E} dV$. Donc au final d'où vient l'énergie dissipée par effet Joule? → Cette énergie vient de l'environnement, elle est apportée par le vecteur de Poynting qui rentre dans le câble.

Remarques

- Très bonne leçon, il manque juste des ordres de grandeurs : résistance linéique typique d'un câble, OdG des pertes sur la ligne et les transfos, tensions sur les différentes parties du réseau. Ajouter une diapo avec le transport de la chaîne de production jusqu'à la maison.
- On peut aussi faire un plan linéaire : production d'un grand courant faible tension à la centrale (et problème de transport), puis on augmente tension, ensuite on la rediminue pour distribuer le courant chez nous. Terminer par comment ça se passe à la maison (revenir au triphasé et dire que chaque pâté de maisons est alimenté avec une seule phase, puis le tableau électrique dans la maison).
- On peut enlever les couplages étoile et triangle.
- Il n'y a pas que du 230 V . Par exemple, les usines utilisent plus du 400V (donc elles reçoivent deux phases, si pas les trois).
- On peut faire une construction de Fresnel pour montrer $U = \sqrt{3}V$ (si le temps le permet).
- On pourrait transporter l'électricité sous une autre forme qu'avec des fils : enjeux avec les énergies renouvelables, problèmes de stockage, hydrogène qu'on peut transporter sans pertes.
- Ne pas parler de l'équation des télégraphistes car il s'agit du transport du signal, pas de l'énergie électrique.