

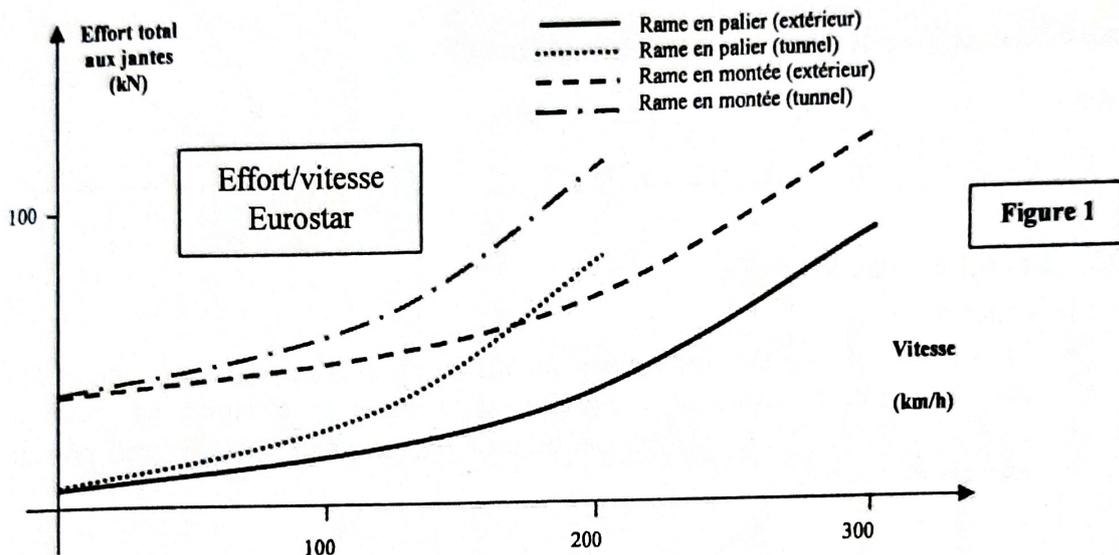
L'ENERGIE ELECTRIQUE

1 DE LA PRODUCTION A L'UTILISATION DE L'ENERGIE ELECTRIQUE

Cette présentation va être illustrée par un exemple connu de tous

1.1 Exemple du TGV

La figure 1 montre les courbes « Effort/Vitesse » à fournir en régime établi pour permettre le déplacement du train à grande vitesse, Eurostar.



Ces courbes ont été obtenues à partir d'un cahier des charges initial, précisant les contraintes techniques et amenant à dimensionner le train lui même.

Une rame d'EUROSTAR a les grandes caractéristiques suivantes.

- 2 motrices et 18 remorques
- Capacité : 794 passagers
- Longueur de la rame : 394 m
- Masse à vide 752 tonnes
- Masse en charge : 816 tonnes
- Diamètre des roues : 0,92 m
- Puissance électrique installée : 12 MW
- 12 moteurs asynchrones répartis sur 6 essieux moteurs

Partant du couple à fournir sur l'arbre moteur d'un essieu, la figure 2 met en évidence les différentes fonctions nécessaires jusqu'à remonter aux centrales de production.

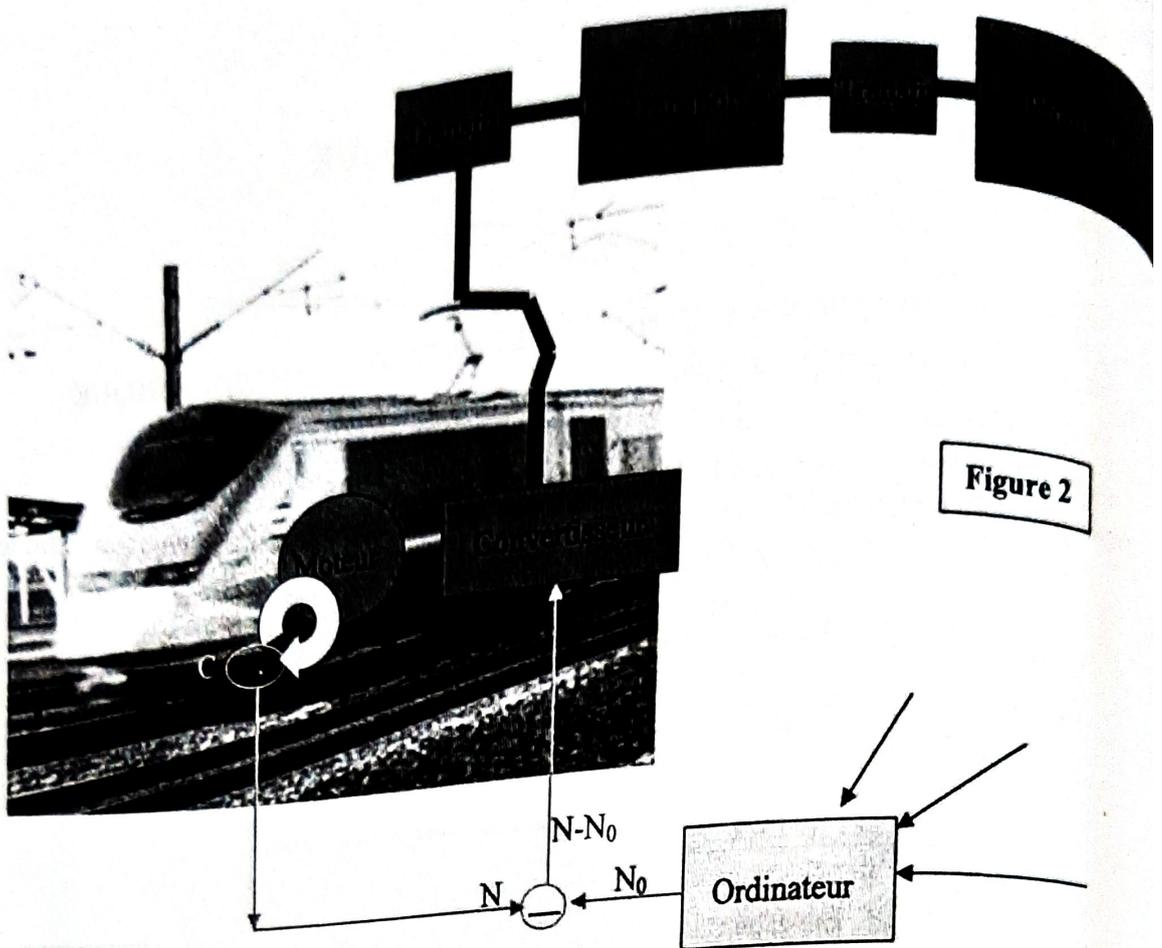


Figure 2

1.2 Les différentes fonctions

1.2.1 Production

- La figure 3 donne des indications sur les énergies primaires consommées dans le monde, en Europe et en France, ainsi que sur la production électrique en France
- La figure 4 visualise les différentes formes de transformation de l'énergie primaire en énergie électrique.

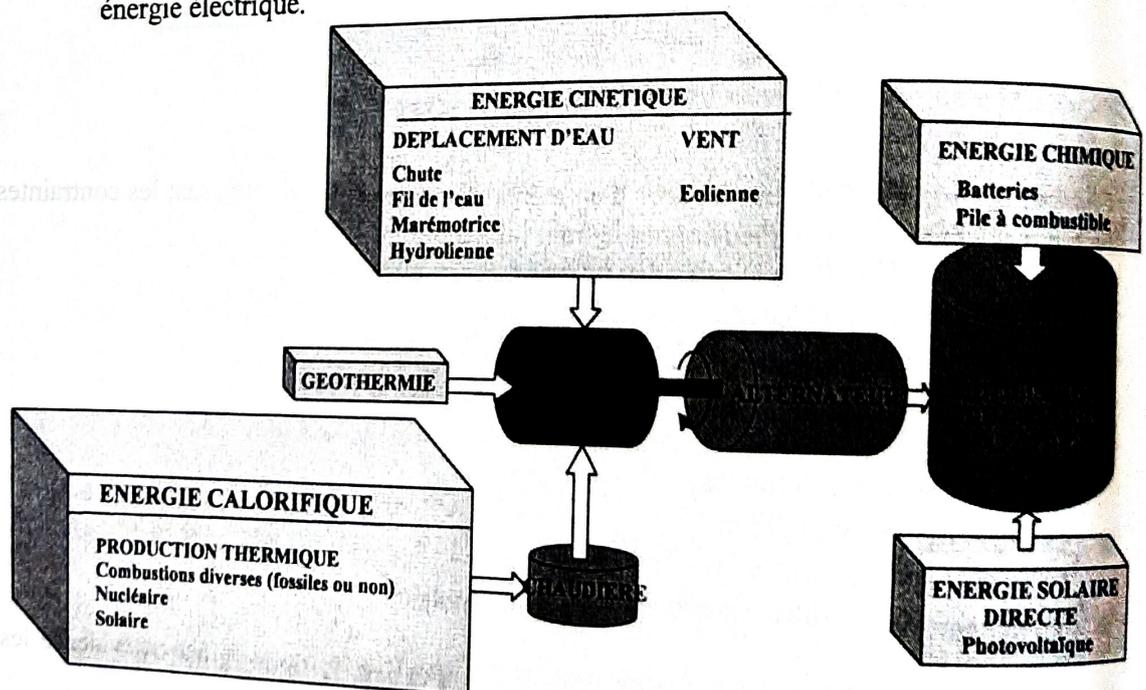
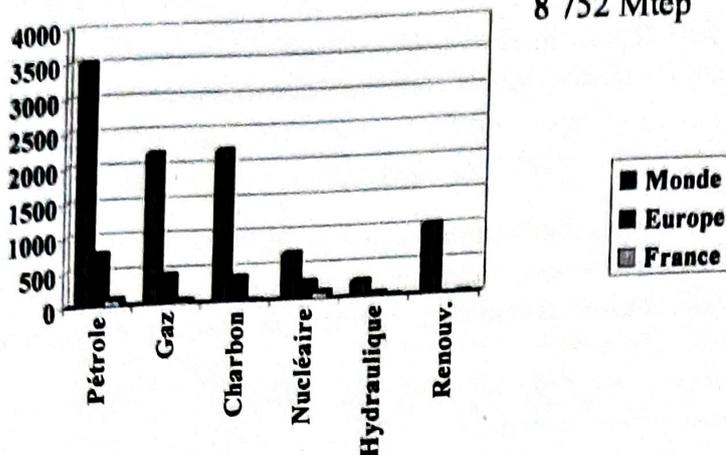


Figure 4

Consommation d'énergie primaire dans le monde (2000)

En Mtep

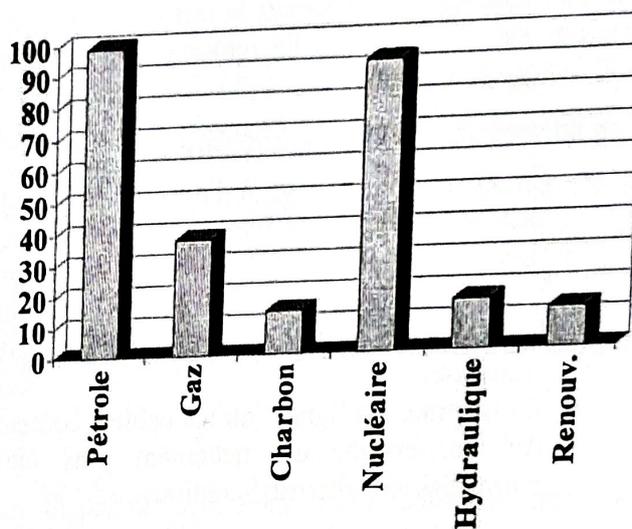
Consommation totale
8 752 Mtep



Consommation d'énergie primaire en France (année 2000) en Mtep

Consommation totale
253,6 Mtep

Figure 3

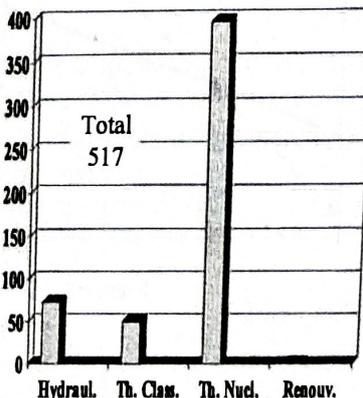
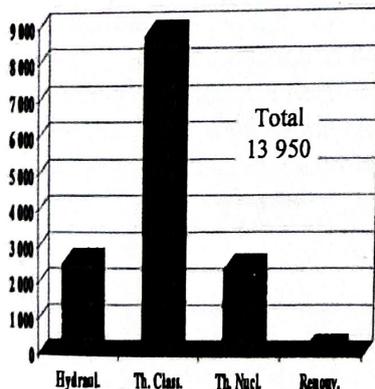


Production d'électricité (2000)

TWh

MONDE

FRANCE



- Il apparaît que la production d'électricité est en quasi totalité réalisée par la transformation d'énergie mécanique par l'intermédiaire d'alternateurs. Ces machines sont basées sur la loi de Lentz-Faraday et la formule $e = -\frac{d\Phi}{dt}$. La production sous forme alternative est donc la plus simple et la plus économique à mettre en oeuvre (les avantages de cette solution universellement utilisée ne seront pas détaillés ici).

1.2.2 Transport d'énergie électrique

- **Position du problème**

La production est concentrée mais l'utilisation est diffuse, il va donc falloir transporter cette énergie ce qui pose le problème de la forme sous laquelle réaliser ce transport.

- **Le transport à courant continu** présente de nombreux avantages par rapport à celui en alternatif. Citons les principaux :
 - Nombre de conducteurs réduit (2, au lieu de 3 en triphasé)
 - Pas d'effet pelliculaire dans les lignes
 - Pertes électriques faibles, pertes diélectriques négligeables
 - Minimisations des perturbations électromagnétiques

Cependant, comme l'électricité produite directement sous forme continue ne représente qu'une portion infime de l'électricité utilisée dans le monde, la mise en oeuvre de ce mode de transport a été longtemps freinée par la nécessité de convertir l'énergie produite en alternatif en énergie continue pour le transport, puis de la reconvertir en alternatif pour l'utilisation. Ce n'est qu'avec l'apparition des semi-conducteurs de puissance que ce procédé a pu se développer.

- **Considérations économiques (figure 5)**

- En alternatif, le coût à l'origine est celui des transformateurs aux deux extrémités du réseau. Ils sont indispensables car le transport se fait en haute tension alors que production et utilisation font appel à de la moyenne tension. Les transformateurs ne sont pas des dispositifs coûteux, par contre, le km de ligne (ou de câble) est assez cher du fait des phénomènes spécifiques à l'alternatif.
- En continu, les lignes (ou les câbles) coûtent moins cher au km, mais le coût des conversions est nettement plus élevé du fait de l'utilisation de convertisseurs alternatif-continu.

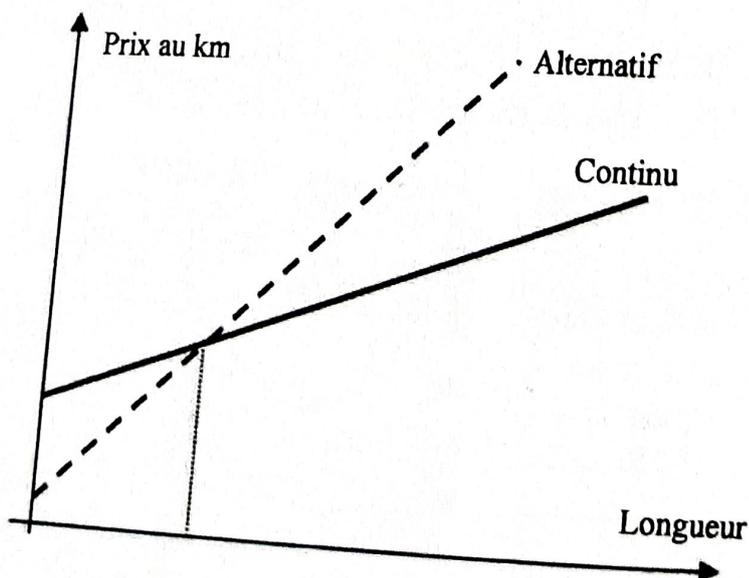


Figure 5

La figure 5 met en évidence une longueur caractéristique pour laquelle la rentabilité s'inverse. Pour les grandes distances le continu est a priori préférable. Cette longueur est différente pour des lignes, quelques centaines de km, et pour des câbles, quelques dizaines de km.

• **Un exemple de réalisation IFA 2000**

Il s'agit de l'Interconnexion France Angleterre 2000 MW destinée à permettre l'échange d'énergie électrique entre les deux pays, de Sangatte en France à Folkstone en Angleterre (figure 6)

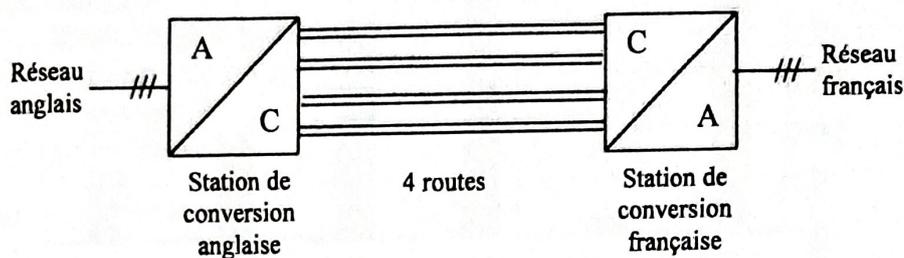


Figure 6

- La liaison entre les deux stations de conversions est composée de 4 routes chacune composée d'un pôle + et d'un pôle -. Chacune de ces routes peut transporter 500 MW sous 270 kV. Elles sont réalisées en câbles sous-marins enfouis au fond de la Manche (environ 45 km) et en câbles terrestres (7 km en France et 18 en Angleterre)
- Chaque station comprend 9 216 thyristors pouvant supporter un courant nominal de 1 350 A et une tension nominale de 4 500 V. Pour assurer les tenues en tension et courant de chaque unité, des groupements en série et parallèle des thyristors sont évidemment nécessaires.
- Le rendement d'une station est de 99,6 % ce qui nécessite néanmoins d'évacuer 8MW !

1.2.3 Conversion

Un convertisseur statique est un dispositif permettant de transformer une source de caractéristiques fixes et de nature donnée, en une source de caractéristiques réglables et de nature (éventuellement) différente.

La nécessité de tels convertisseurs est déjà apparue dans la présentation du TGV et dans le paragraphe précédent (liaison à courant continu). Le principe en sera étudié dans le chapitre correspondant.

1.2.4 Utilisation

La figure 7 montre l'utilisation de l'énergie primaire en France, et la part qui est consommée sous forme électrique. Ce dernier graphique indique clairement que l'énergie est consommée pour environ 50% sous forme électrique sauf dans un secteur, le transport ! Aujourd'hui la voiture électrique n'a pas encore réellement percé !

Le tableau de la figure 8 donne un certain nombre d'indications sur l'utilisation de l'énergie électrique en France.

Année	2000	2005
Production (nette)	517 TWh	549 TWh
Exportation	69	60
Pompage	7	7
Pertes	30	32
Consommation	411 TWh	450 TWh
Résidentiel & tertiaire	61 %	64 %
Industrie	35 %	32 %
Transport	3 %	3 %
Agriculture	1 %	1 %
Puissance installée	114 GW	116 GW
Pointe de puissance	72,4 GW (12 janv.)	86 GW (28 fév.)

Figure 8 – Bilan en 2000 et en 2005 pour l'énergie électrique en France

Une autre approche consiste à énumérer les principales applications dans lesquelles l'électricité peut être utilisée :

- Eclairage : quasi-monopole
- Chauffage (industriel ou tertiaire) : en concurrence avec les moyens classiques, combustibles fossiles
- Climatisation : part de plus en plus importante
- Motorisation : très en retard sur les moteurs thermiques pour le transport routier, part de plus en plus importante dans le secteur industriel et domestique
- Electrochimie : monopole en électrolyse industrielle

1.2.5 Contrôle

Tous les systèmes électriques modernes doivent être commandés et contrôlés de plus en plus rigoureusement. Ce contrôle s'effectue essentiellement au niveau des convertisseurs.

- Il faut transférer la puissance nécessaire au processus à commander et **rien que la puissance nécessaire** ; il faut donc adapter en permanence la puissance fournie à la puissance demandée, d'où la nécessité de méthodes de prédiction de la consommation.
- L'efficacité de ce contrôle permet également d'optimiser les processus et donc d'améliorer les rendements.
- Un certain nombre de contraintes réglementaires apparaissent. Leur prise en compte va souvent se faire grâce à un contrôle de plus en plus sophistiqué.

Cette fonction fait appel aux sciences et techniques du traitement de l'information indissociables des techniques directement liées à l'énergie électrique :

- Informatique
- Traitement du signal
- Electronique du signal
- Télécommunications
- Métrologie
- Automatique
- Etc...

Il n'y a encore pas si longtemps, l'électrotechnicien ne « devait » connaître que les machines électriques et les réseaux de transports (avec « un peu » d'électronique de puissance). Aujourd'hui, la dimension "commande et contrôle" devient prépondérante dans tout système électrique et l'électrotechnicien, dans le cadre de certaines préoccupations spécifiques (voir paragraphes suivant), devra intégrer ces connaissances. Traiter de l'énergie électrique, c'est toute la chaîne du processus (telle qu'elle a déjà été décrite), non seulement sous l'aspect énergétique mais également sous son aspect contrôle et commande.

2 LES CONTRAINTES LIEES A L'ELECTRICITE

2.1 Les coûts

Les dépenses relatives à un équipement, quel qu'il soit, doivent être évaluées en terme de :

- Coûts d'investissement, facilement appréhendés
- Coûts d'exploitations, moins fréquemment pris en compte dans la vie de tous les jours (sauf lorsque l'on parle de la consommation d'une voiture)

2.2 Le point de vue de l'utilisateur : pertes et rendement

Les deux notions sont évidemment très liées mais représentent deux approches différentes

- Le rendement introduit une dimension « financière », plus il est faible plus les dépenses improductives sont élevées.
- Mais les pertes vont entraîner des échauffements, amenant une diminution des durées de vie des équipements, voir une destruction si des températures limites sont atteintes. Pour éviter les échauffements prohibitifs, il faut arriver à évacuer l'essentiel de ces pertes vers l'extérieur.

L'une de nos préoccupations permanentes va donc consister à minimiser les pertes et à les évacuer autant que faire ce peut. Quasiment toutes les limitations technologiques rencontrées sont de nature thermique.

Un seul exemple pour illustrer ce propos ; les plus gros alternateurs de centrales, ont une puissance nominale de 1 500 MW ; leurs rendements sont supérieurs à 99%, ce qui est considéré, à juste titre, comme excellent pour un dispositif de 15 m de long et une masse tournante de 250 tonnes environ. Cependant les pertes correspondantes, inférieures à 1%, représentent néanmoins environ 10 MW ! Ce n'est pas évident à évacuer !

2.3 Le point de vue du fournisseur : facteur de puissance

2.3.1 Rappel sur les puissances

Un dipôle quelconque parcouru par un courant instantané i supporte une tension instantanée v . Les grandeurs suivantes peuvent être définies **quelque soit la forme des signaux envisagés.**

- Puissance instantanée "consommée" (au sens large) par le dipôle

$$p = v \cdot i$$

- Puissance moyenne, dite également puissance active, car c'est celle qui peut "servir à quelque chose" (chauffage, moteur, éclairage...)

$$P = \langle p \rangle = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} v \cdot i dt$$

- La valeur efficace du courant I (même définition pour la tension)

$$I^2 = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} i^2 dt$$

- La puissance apparente supportée par le dipôle

$$S = V \cdot I$$

Les autres grandeurs, éventuellement utilisée en sinusoïdal, n'ont pas de sens si les signaux sont quelconques. Bien entendu, ces formules prennent des formes analytiques bien connues lorsque l'on s'intéresse au régime sinusoïdal pur.

2.3.2 Position du problème en monophasé sinusoïdal.

Soit une installation industrielle consommant une puissance active P , sous une tension efficace V . De par la nature de l'installation, celle-ci va absorber un courant I déphasé d'un angle φ (figure 9).

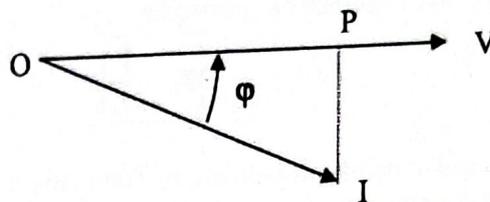


Figure 9

La puissance active consommée par l'installation est représentée par le segment OP , projection de I sur V . A priori, c'est cette puissance là que facture le distributeur d'énergie électrique, qui, en contrepartie, garantit la stabilité de la fréquence et de la tension fournie. Cependant la seule prise en compte de la puissance active ne peut suffire ; en effet considérons le fonctionnement (I', φ') de la figure 10 réalisé sous la même tension d'alimentation. La puissance active consommée, donc facturée est la même, mais avec un déphasage et un courant efficace appelé beaucoup plus élevés. Ce courant va générer dans le réseau d'alimentation des pertes Joule plus importantes et cette dégradation de fonctionnement ne serait pas directement facturée.

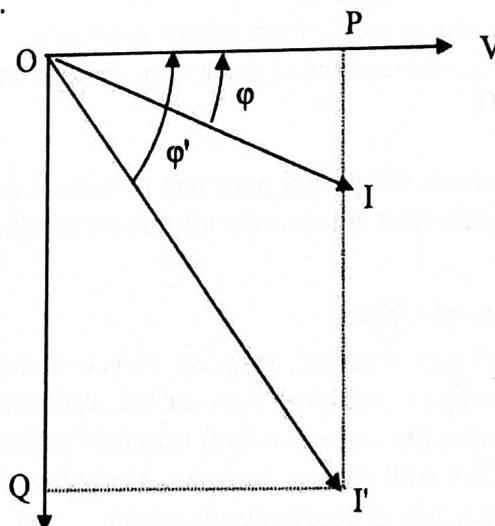


Figure 10

2.3.3 Puissance réactive en sinusoidal

Pour éviter de "payer les pertes" d'une consommation mal contrôlée, le distributeur d'énergie impose un déphasage maximal à ses clients gros consommateurs (pas aux ménages). Si le déphasage dépasse une certaine valeur limite, une contrepartie financière va être exigée (une sorte de facturation des pertes en ligne). C'est cette contrepartie que l'on appelle "puissance réactive", qui est représentée par la projection de I sur l'axe en quadrature avec V ; plus la longueur du segment OQ est élevée, plus le déphasage est important. Ce n'est pas forcément le déphasage qui va être contrôlé mais le $\cos \varphi$.

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

S représente le maximum de puissance active "transportable". Plus le $\cos \varphi$ est élevé plus la puissance active est optimisée.

2.3.4 Facteur de puissance

L'expression précédente peut être généralisée, quelque soit la forme des signaux électriques rencontrés, par la notion de facteur de puissance, F_p

$$F_p = \frac{P}{S}$$

- Cas particulier d'une tension sinusoidal et d'un courant périodique quelconque
Le courant peut être décomposé en série de Fourier.

$$i = \sum I_h \sqrt{2} \cos(\omega h t - \varphi_h)$$

$$v = V \sqrt{2} \cos \omega t$$

La puissance instantanée est le produit vi , dont nous devons calculer la valeur moyenne pour obtenir la puissance active. Il est aisé de voir, en décomposant les produits de cosinus, que toute les valeurs moyennes sont nulles sauf celle correspondant au fondamental. D'où les expressions de la puissance active et du $\cos \varphi$

$$P = VI_1 \cos \varphi_1$$

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{I_1}{I} \cos \varphi_1$$

Le facteur de puissance se dégrade

- Quand le déphasage du fondamental augmente
- Quand la forme du courant absorbé se dégrade par rapport au sinusoidal (I_1 s'éloigne alors de I)

Aujourd'hui des normes s'imposent pour non seulement améliorer le facteur de puissance en tant que tel, mais également la forme d'onde du courant absorbé (absorption sinusoidal).

2.4 Perturbations et CEM

Il y a encore quelques dizaines d'années, l'électrotechnique était le royaume du 50 Hz

Cela entraîne que l'électrotechnicien ne doit

- ni « polluer électromagnétiquement » les voisins (émission ou transmission filaires de parasites divers)
- ni "s'auto polluer", la partie puissance de sa chaîne ne doit pas perturber la partie traitement de l'information.

C'est l'ensemble de la maîtrise de ces phénomènes qui constitue la Compatibilité Electro Magnétique (CEM) ; cet aspect fait l'objet de normes de plus en plus strictes qui visent globalement à ce que le courant absorbé au réseau soit sinusoïdal, (avec un facteur de puissance unitaire) et que les parasites rayonnés soit quasiment inexistantes.
Cette approche ne concerne plus uniquement les gros consommateurs mais de plus en plus le petit appareillage.

7.4 Méthode générale

Quelque soit la configuration physique du circuit il peut donc être transformé (pour les calculs) de manière à ne présenter que des couplages étoile. Il est alors possible d'en donner un schéma monophasé équivalent sur lequel tous les calculs pourront être menés. Il faut avoir présent à l'esprit deux propriétés suivantes.

- Les puissances à prendre en compte dans un schéma monophasé équivalent représentent le tiers des puissances réelles du schéma total (donc par exemple des valeurs mesurées).
- Ce sont les tensions simples qui interviennent dans les calculs.

Par la suite, seule cette méthode sera utilisée. Elle correspond à une approche "externe" ne cherchant pas à connaître les valeurs réelles des grandeurs internes.

8 RETOUR SUR LE TRANSPORT D'ENERGIE EN ALTERNATIF

Dans le paragraphe 3 l'intérêt du triphasé a été évoqué sous une forme très simplifiée basée sur le gain en nombre de conducteurs nécessaires par rapport au monophasé. Cet aspect va être repris en essayant de quantifier ce gain et de comparer également avec les autres systèmes polyphasés.

Les grandeurs dimensionnantes suivantes vont être introduites et seront communes à toutes les possibilités envisagées :

- S Puissance apparente maximale à transporter
- δ Densité de courant maximale dans les conducteurs
- Um Tension maximale entre deux quelconques des conducteurs

De plus nous introduisons les grandeurs :

- L Longueur de la ligne
- s Section des conducteurs
- ρ Résistivité des conducteurs
- U Tension entre deux phases
- I Courant de ligne

A partir de ces données vont être évalués :

- Le volume v de cuivre (ou de matériau conducteur) nécessaire qui donne une idée du coût d'investissement
- Les pertes Joule maximales P qui donnent une idée du coût d'exploitation.

8.1 En monophasé

$$S = UI \quad I = \frac{S}{U}$$

La section s de conducteurs nécessaire est donc

$$s = \frac{I}{\delta} = \frac{S}{U\delta}$$

et la résistance R d'une liaison vaut

$$R = \rho L \frac{U\delta}{S}$$

Les pertes Joule en ligne (deux liaisons nécessaires) valent donc

$$P = 2RI^2 = 2\rho L \frac{U\delta}{S} \left(\frac{S}{U} \right)^2$$

il y a évidemment identité entre U et U_m , donc

$$P_{\text{mono}} = \frac{2\rho L \delta S}{U_m}$$

Quant au volume de cuivre il est égal à $2sL$.

$$V = 2L \frac{S}{U_m \delta}$$

8.2 En polyphasé d'ordre q

La figure 12 représente les cas particuliers du pentaphasé ($q=5$). Les potentiels des phases sont représentés par les points 1 à 5, et

$$U = 2V \sin \frac{\pi}{q}$$

La tension maximale U_m est la distance maximale entre deux des potentiels. Elle prend une expression différente selon la parité de q .

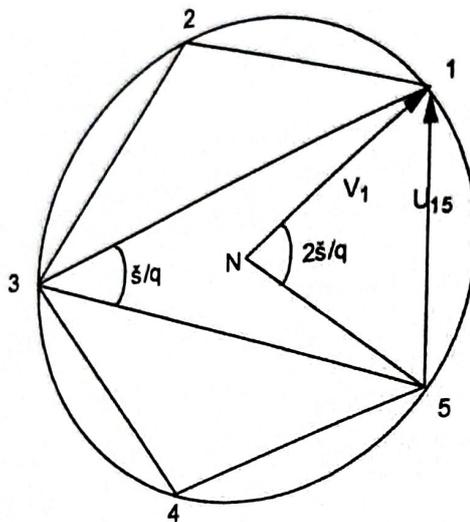


Figure 15

- q impair (cas de la figure 15), U_m correspond au module de la tension U_{13} (ou U_{53}) et vaut donc

$$U_m = \sin \frac{\pi}{2q}$$

- q pair, U_m correspond à un diamètre et vaut $2V$

$$U_m = \frac{U}{\sin \frac{\pi}{q}}$$

Quelque soit la parité, les pertes en lignes sont données par :

$$P = qRI^2 = q\rho \frac{L}{s} I^2$$

En éliminant successivement I , V , U en les exprimant en fonction de U_m , S , L et q on obtient les expressions suivantes pour les pertes.

- q pair

$$P_{\text{tri}} = 2\rho L\delta \frac{S}{U_m} = P_{\text{mono}}$$

- q impair

$$P_{\text{tri}} = 2\rho L\delta \frac{S}{U_m} \cos \frac{\pi}{2q} = P_{\text{mono}} \cos \frac{\pi}{2q}$$

Ces formules montrent que, du fait de la présence du cosinus, les systèmes impairs sont préférables et que dans ces conditions les pertes sont toujours inférieures à ce qu'elles seraient en monophasé. Par ailleurs, de 3 à l'infini augmente constamment pour tendre vers 1 donc l'ordre 3 est optimal.

Le calcul des volumes de cuivre amène à des résultats rigoureusement identiques :

- q pair

$$V_{\text{mono}} = V_{\text{tri}}$$

- q impair

$$V_{\text{tri}} = V_{\text{mono}} \cos \frac{\pi}{2q}$$

8.3 Conclusion

D'un point de vue économique le transport en triphasé est le plus intéressant des procédés utilisant l'alternatif. Le gain sur les pertes en lignes et le poids de cuivre est de l'ordre de 13% par rapport au monophasé ($\cos(\pi/2q) = 0,87$).

La comparaison entre le transport en courant continu et le transport en triphasé sera présentée dans le chapitre consacré à la conversion alternatif-continu.

9 PRINCIPE DE LA CREATION DE CHAMPS TOURNANTS

Cet aspect sera abordé en deuxième année mais peut être énoncé comme suit :

Un système de trois bobines décalées dans l'espace de $\frac{2\pi}{3}$ les unes par rapport aux autres, alimentées par des courants triphasés équilibrés, crée une répartition spatiale de champ magnétique mobile.

Correctement créée cette répartition peut correspondre à une rotation qui est la base de tous les moteurs alternatifs.

Ce résultat n'est pas valable en monophasé mais s'applique aussi à n'importe quel système polyphasé.

10 LES INTÉRÊTS DES SYSTÈMES TRIPHASÉS

Ils ont été largement développés dans les paragraphes précédents, les conclusions essentielles sont résumées ci-dessous.

10.1 Transport d'énergie

- Avantage par rapport à toutes les autres possibilités en alternatif.
- Concurrence avec le courant continu dans certains cas ; l'intérêt du continu pour des lignes de grandes longueurs et pour des câbles sera mis en évidence plus loin.

10.2 Possibilité de création de champs tournants,

Impossible à réaliser en monophasé ou en continu. Cette propriété sera développée ultérieurement lors de l'étude des moteurs alternatifs.

10.3 Puissance massique des machines tournantes alternatives

Notablement plus élevée qu'en monophasé (environ 50%) ; cette propriété, qui ne sera pas démontrée, correspond à une meilleure utilisation des circuits magnétiques.