

GUIDE AUDIT ELECTRIQUE

GUIDE

***DE GESTION DE L'ENERGIE ELECTRIQUE DANS LES
ENTREPRISES INDUSTRIELLES.***

TABLE DES MATIERES

<i>INTRODUCTION</i>	5
<i>CHAPITRE 1</i>	
<i>LA GESTION DE L'ENERGIE ELECTRIQUE</i>	6
<i>CHAPITRE 2</i>	
<i>LE FACTEUR DE PUISSANCE</i>	9
1. <i>Généralités</i>	9
2. <i>Fondements du facteur de puissance</i>	10
2.1 <i>Nature de l'énergie réactive</i>	10
2.2 <i>Définition du facteur de puissance</i>	10
2.4 <i>Facteurs de puissance des appareils les plus courants</i>	12
2.5 <i>Exemples de calcul du facteur de puissance</i>	13
3. <i>Effets d'un faible facteur de puissance</i>	14
3.1 <i>Diminution de la facture d'électricité</i>	14
3.2 <i>Augmentation de la puissance disponible</i>	14
3.3 <i>Pertes du réseau de distribution</i>	14
3.4 <i>Stabilité de la tension</i>	15
4. <i>Amélioration du facteur de puissance</i>	15
4.1 <i>Compensation individuelle</i>	16
4.2 <i>Compensation par secteur</i>	16
4.3 <i>Compensation centralisée</i>	17
4.4 <i>Dimensionnement des condensateurs</i>	17
5. <i>Exemples</i>	17
<i>CHAPITRE 3</i>	
<i>GESTION DE LA DEMANDE ELECTRIQUE</i>	21
<i>Le taux de charge de l'entreprise:</i>	21
<i>Courbes de charge ou profils de la demande</i>	21
<i>Identification des charges</i>	22
<i>Méthodes de contrôle de la demande</i>	23
<i>CHAPITRE 4</i>	
<i>MOTEURS ELECTRIQUES</i>	24
1. <i>Introduction</i>	24

2. Constitution des moteurs asynchrones	24
3. Rendement et pertes d'un moteur.....	25
3.1 Pertes du moteur	25
3.2 Détermination du rendement du moteur	26
4. Rendement des moteurs standards	26
5. Facteurs influençant le rendement du moteur électrique	28
5.1 Puissance du moteur	28
5.2 Charge du moteur	28
5.3 Dimensionnement et choix du moteur	28
5.4 Variation de tension.....	29
5.5 Maintenance du moteur	30
5.6 Rebobinage du moteur	30
6. Moteurs à rendement élevé	31
6.1 Réduction des pertes des moteurs à rendement élevé	31
6.2 Moteurs à rendement élevé comparés aux moteurs standards .	31
CHAPITRE 5	
ECLAIRAGE.....	33
1. Sources d'éclairage	33
1.1 Lampe à Incandescence	33
1.2 Lampes à décharge dans un gaz basse pression	34
1.3 Lampes à décharge dans un gaz haute pression	35
1.4 Matériel annexe	36
2. Les opportunités d'économie d'énergie dans les systèmes d'éclairage . .	37
2.1 Eteindre les lampes d'éclairage	37
2.2 Horloges	38
2.3 Cellules photoélectriques	38
2.4 Réduire les niveaux d'éclairage	38
2.5 Utiliser la lumière du jour.....	39
2.6 Remplacer les sources de lumière non performantes	39
2.7 Nettoyer et entretenir les lampes	40
CHAPITRE 6	
EQUIPEMENTS DE CONVERSION D'ENERGIE	41
1. Economies d'énergie dans les équipements de conversion.....	41
1.1 Arrêter les équipement lorsqu'ils tournent à vide	41
1.2 Utiliser les équipements dans les conditions de	

<i>charge normale</i>	42
<i>L3 Améliorer le procédé et la qualité de contrôle</i>	42
<i>L4 Investir dans de nouveaux équipements rentables</i>	42
2. <i>Les pompes</i>	43
2.1 <i>Réduire les pertes par frottement</i>	43
2.2 <i>Réduire le débit (pompes centrifuges)</i>	44
2.3 <i>Courbe caractéristique (H,Q)</i>	44
2.4 <i>Réduction du débit par fermeture de la vanne</i>	45
2.5 <i>Réduction de débit par changement d'impulseur</i>	45
2.6 <i>Réduction du débit par diminution de la vitesse</i>	45
2.7 <i>Résumé des méthodes de réduction de débit</i>	46
2.8 <i>Maintenance</i>	46
3. <i>Systèmes de variation de vitesse</i>	47
3.1 <i>Systèmes mécaniques</i>	47
3.2 <i>Systèmes électriques et électroniques</i>	48

INTRODUCTION

Ce guide, permet de faire apparaître un ensemble d'outils pour effectuer un diagnostic/ Audit d'une entreprise grande consommatrice d'énergie électrique à:

- Mieux comprendre sa facture électrique et en démystifier sa contenance;
- Connaître des techniques simples d'amélioration et de réduction de sa facture électrique;
- Optimiser sa puissance appelée et conséquemment sa puissance souscrite;
- Restructurer son parc de moteurs électriques.

Le **premier chapitre** donne un aperçu des grandes techniques. générales d'utilisation rationnelle de l'énergie [électrique](#). et présente la facture électrique (moyenne tension). Ceci permettra de mieux comprendre et; conséquemment, d'expliquer point par point comment est calculée la facture électrique de l'ONE.

Le chapitre 2 donne une définition du facteur de puissance et explique les méthodes de son amélioration et son impact sur la facture électrique.

Dans **le chapitre 3**, quelques notions de gestion, de la demande seront présentées. Les solutions les plus simples et les plus courantes seront également exposées.

Ensuite, au **chapitre 4**, nous verrons la façon dont les moteurs sont constitués et où se répartit ses pertes. Quelques moyens d'amélioration de la consommation et d'utilisation optimale des moteurs seront également donnés.

Puis, dans **le chapitre 5**, les appareils d'éclairage seront étudiés en vue de montrer aux ingénieurs et, de là, les entreprises les avantages économiques du choix judicieux d'un appareil performant et efficace.

Et finalement, dans **le chapitre 6**, nous avons développé les moyens d'économie d'énergie dans les appareils de conversion d'énergie et plus particulièrement les pompes.

ce guide est un outil précieux qui est appelé à présenter aux clients un soutien efficace et professionnel, et de partenariat dans l'objectif d'un développement durable de tout le secteur privé marocain et ce, dans le contexte de la globalisation des marchés et la mise en place du libre-échange entre Maroc et l'Union Européenne.

CHAPITRE I

LA GESTION DE L'ENERGIE ELECTRIQUE

Il est évident qu'à cause du (coût élevé de l'électricité, l'économie d'énergie électrique est plus attirante que l'économie de n'importe quelle Forme d'énergie. L'identification de sources de pertes d'énergie électrique nécessite une étude plus approfondie du fonctionnement et de l'utilisation des installations que dans le cas de L'énergie thermique. Une connaissance des principes de base des systèmes électriques va permettre une étude des consommations des installations électriques qui elle-même peuvent apporter l'identification de gains financiers importants. Les mesures qui suivent sont les étapes principales d'analyse des performances des installations électriques et de détermination des opportunités d'économie d'énergie électrique:

1. *Comprendre le tarif et la facture électrique*

- ▶ Le tarif appliqué est-il adéquat?
- ▶ Quelles sont les coûts marginaux de la puissance appelée et de la consommation?
- ▶ Quelle est la demande maximale?
- ▶ Y a-t-il une pénalité de facteur de puissance?
- ▶ Quel est le coefficient de charge de l'installation?

2. *Surveiller, mesurer et enregistrer la consommation et la puissance appelée?*

- ▶ Quelle est la variation mensuelle de la consommation et de la puissance appelée?
- ▶ La différence de facturation d'un mois à l'autre peut-elle être expliquée?
- ▶ Quelles sont les consommations des différents équipements et/ou secteurs importants?
- ▶ Quelles sont les machines qui contribuent le plus à la demande maximale?
- ▶ A quel moment de la journée se produit la pointe maximale?
- ▶ Quelle est la consommation électrique par unité de production?
- ▶ Quels sont les instruments de mesures disponibles dans l'entreprise?
- ▶ Quelles sont les lectures et mesures normalement effectuées?

3. *Maintenir et améliorer le système de distribution électrique.*

- ▶ Quel est l'état du système de distribution électrique?
- ▶ Y a-t-il un système de maintenance préventive?
- ▶ Les tables sont-ils de bonne dimension?
- ▶ Les branchements sont-ils vérifiés et resserrés chaque année?
- ▶ Les disjoncteurs, fusibles et sectionneurs sont-ils correctement dimensionnés?

4. *Utiliser un équipement électrique performant.*

- ▶ Quel est l'âge et l'état de l'équipement électrique?
- ▶ Quel est l'âge des moteurs électriques?
- ▶ Combien de fois les moteurs ont-ils été rebobinés?
- ▶ Quel est le rendement des pompes, ventilateurs et compresseurs?

5. *Faire fonctionner et utiliser l'équipement électrique efficacement.*

- ▶ Les moteurs sont-ils surdimensionnés pour l'application considérée?
- ▶ Est-ce que l'équipement fonctionne normalement à pleine charge?
- ▶ Est-ce que les débits des ventilateurs et des pompes peuvent être diminués?

Bien que l'ensemble de ces notions représentent la partie essentielle du début d'un système de gestion de l'énergie électrique, nous développerons particulièrement le premier point "Comprendre le tarif et la facture électrique".

LA FACTURE ELECTRIQUE ONE

La facture électrique a cinq composantes principales:

- Les frais de la puissance maximale appelée (exprimé en Dh/kVA)
- Les frais de dépassement de la puissance souscrite (50% des kVA excédent)
- Les frais de la consommation électrique (exprimé en Dh/kWh)
- ▶ La pénalité pour le facteur de puissance (2% / point de cos phi)
- Les frais divers: taxes, location de compteur. TVA.

Les frais de la consommation de l'énergie électrique sont basés sur l'existence de trois tarifs:

- ▶ Tarif heures creuses: de 23h à 7h (été) **et** 22h à 7h (hiver)
- Tarif heures pleines: de 7h à 18h (été) et 7h à 17h (hiver)
- ▶ Tarif heures de pointe: de 18h à 23h (été) et 17h à 22h (hiver)

Les éléments qu'il faut prendre soin d'analyser sur la facture électrique sont:

1. La date du relevé:
Il est important de bien voir la date du relevé, car il arrive que le relevé ne se fasse pas toujours le même jour à chaque mois. C'est cette date qui détermine finalement le nombre de jours de consommation pour la production du mois correspondant.
2. La puissance souscrite en kVA:
Cette puissance que l'entreprise a souscrite, généralement au tout début de son existence, présente parfois de graves distorsions par rapport à la puissance appelée. L'entreprise doit être consciente de l'importance de cette "souscription", car si elle est trop élevée, l'entreprise paie inutilement une redevance de puissance et si elle est trop faible, l'entreprise paie une pénalité de dépassement de 50% par chaque kVA excédent la dite puissance souscrite.
3. La puissance appelée:
Cette puissance correspond au maximum de la consommation (en kVA) intégrée sur 10 minutes, enregistrée dans le mois donné. Elle représente la puissance apparente et elle est à la base du calcul de la puissance taxée.
4. La puissance taxée:
La puissance taxée est la plus grande valeur considérée entre la puissance souscrite et la puissance appelée du mois en cours. Si la puissance appelée est inférieure à la Puissance souscrite, la puissance taxée est cette dernière et la redevance de puissance est calculée comme suit: Tarif du kVA mensuel (Dh/kVA) x Puiss. Souscrite. Par ailleurs si la puissance appelée est supérieure à la puissance souscrite, alors la redevance de puissance est calculée comme suit: Tarif du kVA mensuel x Puiss. Appelée **plus** une majoration de dépassement de la puissance souscrite égale à 50% de l'excédent calculée entre la puissance souscrite et la puissance appelée du mois en cours.
5. La consommation d'énergie réactive (exprimée en kVArh):
Cette consommation d'énergie réactive est à la base du calcul du facteur de puissance (cos **phi**); la méthode de calculs et l'amélioration de ce facteur sont pleinement Expliquée dans le prochain chapitre. ;
6. Le facteur de puissance:

Dans le mode actuel de tarification appliqué par l'ONE, le facteur de puissance Minimum est fixé à 0,8. Sous ce seuil, une pénalité de facteur de puissance est appliquée et est calculée comme suit; Pour chaque centième de point de cosphi inférieur à ce 0,80, 2% de taxe est ajoutée au coût de l'ensemble des consommations en kWh.

7. Consommation Heures Creuses:
Cette consommation d'énergie active correspond à la somme des kWh consommés mensuellement mais plus particulièrement en période creuse telle que définie précédemment. Son tarif est inférieur à celui des deux autres périodes et il est intéressant de se pencher sur les possibilités de modifier la marche de l'usine pour pouvoir bénéficier d'un tarif comme celui-ci.
8. Consommation Heures Pleines:
Cette consommation est généralement la plus importante compte tenu qu'elle regroupe le plus d'heures et également se situe dans les heures normales d'activités.
9. Consommation Heures. de Pointe:
Finalement, la consommation de pointe est la dernière introduite dans la tarification de l'ONE et il est très important de sensibiliser l'entreprise sur le fait que la part de consommation de kWh pendant cette période affecte la pointe (comme son nom l'indique) de l'ensemble des installations productrices d'électricité. L'intérêt de l'entreprise est de rechercher des solutions de délestage ou autres lui permettant de minimiser cette consommation.
10. Les autres taxes:
Les taxes de location de comptage, d'entretien ou autres sont des coûts généralement liés aux installations proprement dite et peuvent varier d'une entreprise à l'autre; la TVA demeurant toujours une taxe s'appliquant à tout bien ou service_

Le dicton "Gérer c'est connaître" est plus que jamais d'actualité quand on parle de gestion de l'énergie électrique. Voilà pourquoi, il est très important d'expliquer en long et en large la facture électrique, son mode de calculs des différents frais, les tarifs et leurs valeurs relatives et, de s'attarder sur les puissance appelée, souscrite et taxée.

Les responsables techniques de ladite entreprise doivent:

- suivre, régulièrement tous les éléments de la facture
- et plus encore relever dans un cahier ou registre les éléments les plus importants de la facture qui ont un impact direct sur le coût;
- tracer des courbes d'évolution de la consommation, de la puissance appelée,

Ce sont là des actions simples qui peuvent rapporter gros lorsque faits systématiquement.

CHAPITRE 2

LE FACTEUR DE PUISSANCE

1. Généralités

En un point quelconque d'un réseau alternatif triphasé, la tension simple et le courant de phase sont rarement en phase...A la fréquence fondamentale, appelons V et I les valeurs efficaces respectives de la tension simple et du courant de phase, ϕ le déphasage (compté positivement si le courant est en retard sur la tension).

Si l'on s'intéresse à une phase du réseau, la puissance qui transite en ce point est $P = V I \cos \phi$. Par rapport au produit $S = V I$, appelé Puissance apparente, la puissance réelle est réduite d'un facteur $\cos \phi$; appelé facteur de puissance ($P = S \cos \phi$).

Bien entendu, l'objet d'un système électrique est de délivrer une puissance active P . On voit donc que, globalement, l'existence d'un facteur de puissance $\cos \phi$ inférieur à 1 entraîne des pertes d'efficacité du système. L'expression $Q = V I \sin \phi$ est appelée puissance réactive, par analogie avec la puissance active.

Cette puissance réactive...est générée par les éléments inductifs et capacitifs d'un réseau. On décide, par convention, que tout élément inductif consomme de l'énergie réactive et que tout élément capacitif en produit. Il est aisé de calculer ces productions et consommations, en appliquant à ces éléments des lois analogues à celles qui dérivent de la loi d'Ohm pour la puissance active:

- la consommation d'une inductance L parcourue par un courant I est: $Q_L = L \omega I^2$,
- la production d'une capacité C soumise à une tension V est : $Q_C = C \omega V^2$

Avec $\omega = 2 \pi \cdot f$

(ω étant la pulsation du réseau en radians par seconde, et f la fréquence en Hertz).

On peut donc être amené à placer des inductances ou des condensateurs en certains points d'un réseau particulier, afin d'en améliorer le facteur de puissance. Toutefois, dans la pratique, ce sont les éléments inductifs qui dominent fortement dans les réseaux et dans les appareils d'utilisation de l'électricité tels que les transformateurs, les moteurs asynchrones, les réseaux basse et moyenne tensions.

Une autre solution pour améliorer le facteur de puissance consiste à utiliser un compensateur synchrone (moteur synchrone fonctionnant à vide) dont le réglage du courant d'excitation permet un comportement producteur ou consommateur d'énergie réactive. Cette solution demeure toutefois peu employée.

En cas de variation lente de la puissance réactive, on utilise couramment un moyen de compensation (inductances ou capacités) manœuvré par l'appareillage électromécanique classique.

Pour éviter de graves perturbations provoquées éventuellement par des variations brutales

de la puissance réactive, on peut utiliser des compensateurs soit synchrones, soit. Statiques (ensemble d'inductances et condensateurs commandés par thyristors) à réponses quasi instantanées.

Par ailleurs, la forme des ondes de courant ou de tension relevées dans les réseaux industriels peut s'éloigner de la sinusoïde pure théorique. La déformation de ces ondes provient d'ondes sinusoïdales de fréquences multiples (harmoniques) qui se superposent à l'onde fondamentale. Ces harmoniques peuvent gêner le fonctionnement des appareils électriques, ainsi que le distributeur qui impose des limites au taux d'injection d'harmoniques sur son réseau.

Pour atténuer ce phénomène, on a recours aux filtres anti harmoniques, obtenus en associant des condensateurs et des inductances ajustés aux rangs à réduire.

2. Fondements du facteur de puissance

2.1 Nature de l'énergie réactive

Toute machine électrique (moteur, transformateur, ...) alimentée en courant alternatif met en jeu deux formes d'énergie:

- l'énergie active qui correspond à la puissance active P mesurée en kW; elle se transforme intégralement en énergie mécanique (travail) et en chaleur (pertes).
- l'énergie réactive qui correspond à la puissance réactive Q mesurée en kVAr; elle sert à l'alimentation des circuits magnétiques des machines électriques et elle est nécessaire à leur fonctionnement. Elle est mise à leur disposition par le réseau ou, de préférence, par des condensateurs prévus à cet effet.

Le réseau de distribution fournit l'énergie apparente qui correspond à la puissance apparente (ou puissance appelée) S , mesurée en kVA.

La consommation d'énergie réactive varie selon les récepteurs. La proportion de l'énergie réactive par rapport à l'énergie active varie de:

- 65 à 75 % pour les moteurs asynchrones.
- 5 à 10 % pour les transformateurs.

Par ailleurs les inductances (ballasts de tubes à décharge), les convertisseurs statiques (redresseurs) consomment aussi de l'énergie réactive.

2.2 Définition du facteur de puissance

Le facteur de puissance d'une installation est le quotient de la puissance active (kW) consommée par l'installation sur la puissance apparente (kVA) fournie à cette installation.

$$\cos \phi = P / S$$

Ce facteur de puissance a une valeur comprise entre 0 et 1. Il est, en fait, le facteur de puissance de la composante à fréquence industrielle (50 Hz) de l'énergie fournie par le

réseau. Il ne prend pas en compte la puissance véhiculée par les harmoniques.

Un facteur de puissance proche de 1 indique une faible consommation d'énergie réactive et optimise le fonctionnement d'une installation.

Remarque: Les charges inductives consomment la puissance réactive, leur facteur de puissance est dit arriéré ou inductif (puisque le courant de phase est en retard par rapport à la tension simple: $\cos \phi$ AR). Les charges capacitives fournissent la puissance réactive au réseau, leur facteur de puissance est dit avant ou capacitif (puisque le courant de phase est en avance par rapport à la tension simple: $\cos \phi$ AV).

2.3. Représentation graphique

Puissance active (en kW)

- monophasé P-N: $P = VI \cos \phi$
- monophasé 2P: $P = U I \cos \phi$.
- triphasé 3P ou 3P-FN: $P = \sqrt{3} U I \cos \phi$

Puissance réactive (en kVAr)

- monophasé P-N: $Q = V I \sin \phi$
- monophasé 2P: $Q = U I \sin \phi$
- triphasé 3P ou 3P-1-N: $Q = \sqrt{3} U I \sin \phi$

Puissance apparente (en kVA)

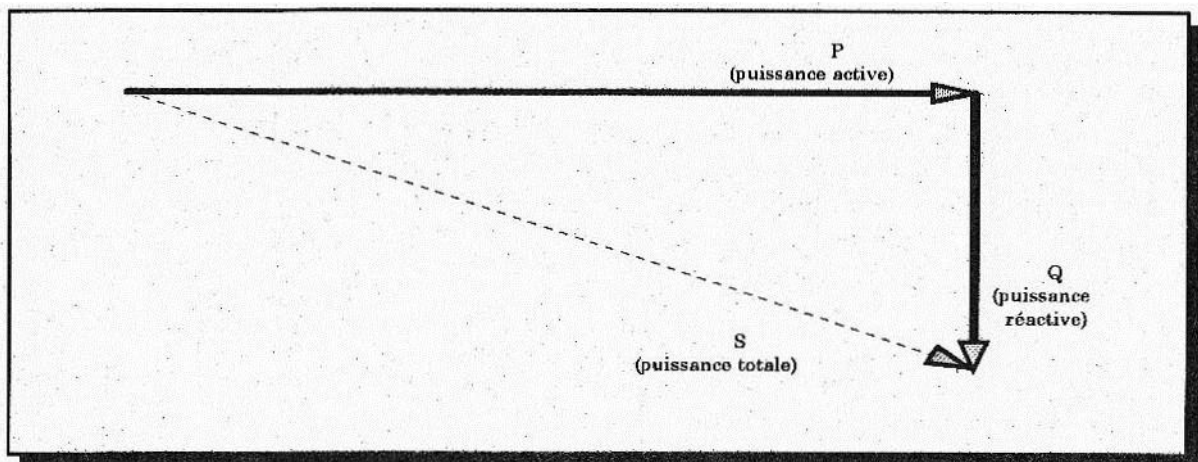
- monophasé P-N: $S = V I$
- monophasé 2P: $S = U I$
- triphasé 3P ou 3P+N: $S = \sqrt{3} U I$

Avec: V: tension entre phase et neutre

U: tension entre phases

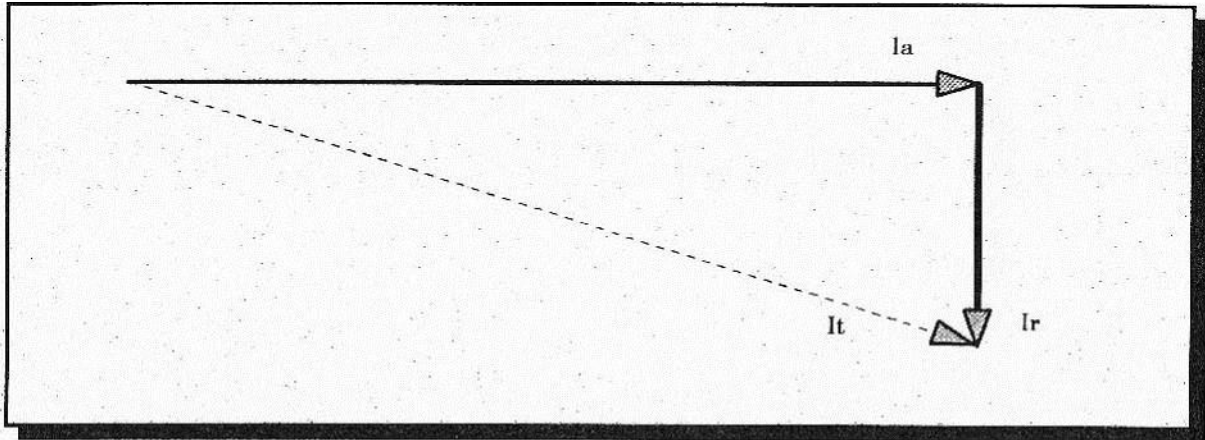
Et $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$

On utilise de manière classique la représentation graphique suivante:



A ce diagramme établi pour les puissances correspond le diagramme des courants. (il suffit de diviser les puissances par la tension).

Les courants actif et réactif se composent pour former le courant apparent ou total qui est celui qui parcourt la ligne électrique et se mesure à l'ampèremètre. On utilise de manière classique la représentation graphique suivante:



courant total qui parcourt les conducteurs

I_a : courant actif transformé en énergie mécanique ou en chaleur

I_r : courant réactif nécessaire à l'excitation magnétique des récepteurs.

Les relations entre ces courants sont:

$$I_t = \sqrt{I_a^2 + I_r^2}$$

$$I_a = I_t \cos \varphi$$

$$I_r = I_t \sin \varphi$$

2.4 Facteurs de puissance des appareils les plus courants

Le tableau ci-dessous présente. Des valeurs typiques du facteur de puissance des. Appareils les. plus courants. •

Appareil.	chargé à	Cosφ
moteur asynchrone	0	0,17
	25 %	0,55
	50 %	0,77
	75 %	0,80
	100%	0,85
lampes à incandescence		1
lampes fluorescentes non compensées		0,5
lampes fluorescentes compensées		0,93
lampes à décharge		0,4 à 0,6
fours à résistance		1
fours à induction avec compensation intégrée		0,85

fours à chauffage diélectrique	0,85
machines à souder à résistance	0,8 à 0,9
postes, statiques monophasés de soudage à l'arc	0,5
transformateurs-redesseeurs de soudage à l'arc	0,7 à 0,8
fours à arc.	0,8

2.5 Exemples de calcul du facteur de puissance

- Quel est le facteur de puissance d'une charge alimentée par un système triphasé 380 V si l'ampèremètre indique 50 A et le Wattmètre 25 kW?

Dans un système triphasé: $S = \sqrt{3} U I = 32,9 \text{ kVA}$

Facteur de puissance = $P / S = 0,76$

- Un poste électrique alimente trois types de charge:

o des lampes incandescentes: 50 kVA	$\cos\phi = 1$
o des moteurs asynchrones: 225 kVA	$\cos\phi = 0,8 \text{ AR}$
o des moteurs synchrones: 75 kVA	$\cos\phi = 0,8 \text{ AV}$

a) Calculer la puissance active et réactive de chaque type de charge. 1.) Calculer la puissance active et réactive que le poste doit fournir. c) Calculer la puissance apparente fournie par le poste et le facteur de puissance au niveau du poste.

- a) Puissance active:

■ lampes:	$P = S \cos\phi = 50 \text{ kW}$
■ moteurs asynchrones:	$P = S \cos\phi = 180 \text{ kW}$
moteurs synchrones:	$P = S \cos\phi = 60 \text{ kW}$

Puissance réactive:

lampes:	$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = 0 \text{ kVAr}$
moteurs asynchrones:	$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = 135 \text{ kVAr}$
moteurs synchrones:	$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = 45 \text{ kVAr}$

- b) Puissance active:

Puissance active (lampes + moteurs synchrones + moteurs asynchrones) = 290 kW

Puissance réactive: le poste doit fournir la puissance réactive nécessaire aux moteurs asynchrones qui ont un facteur de puissance arrière (absorbent de l'énergie réactive ou encore le courant de phase est en retard par rapport à la tension simple). Les moteurs synchrones ont un facteur de puissance avant (fournissent de l'énergie réactive au réseau ou encore le courant de phase est en avance par rapport à la tension de phase). Ces moteurs synchrones vont donc fournir une partie de l'énergie réactive nécessaire pour le fonctionnement des moteurs asynchrones. La puissance réactive que doit fournir le poste sera:

Puissance réactive (moteurs asynchrones - moteurs synchrones) = 90 kVar •

c) Puissance apparente au poste:
$$S = \sqrt{(P^2 + Q^2)} = 303 \text{ kVA}$$

Facteur de puissance au poste:

- $\cos \phi = P / S = 0,956$

3. Effets d'un faible facteur de puissance

Un facteur de puissance faible a plusieurs conséquences négatives qui réduisent le rendement et l'efficacité d'une installation. L'amélioration du facteur de puissance d'une installation présente de multiples avantages d'ordre économique et technique et permet de réduire la facture d'électricité.

3.1 Diminution de la facture d'électricité

La structure tarifaire actuelle au Maroc pénalise par des frais additionnels tout abonné qui présente un facteur de puissance moyen mensuel inférieur à 0,8. Au point de livraison le distributeur d'énergie électrique fournit gratuitement l'énergie réactive jusqu'à concurrence de 75% de l'énergie active consommée ($\tan \phi = 0,75$). Au delà de cette franchise allouée par le distributeur, l'abonné doit payer une pénalité qui représente 2 % du montant total des redevances de consommation pour chaque centième d'insuffisance par rapport à 0,8 du facteur de puissance constaté.

Le facteur de puissance d'une installation se calcul en utilisant les indications des compteurs d'énergie active (kWh) et réactive (kVArh).

$$\text{Facteur de puissance} = \text{kWh} / \sqrt{(\text{kWh}^2 + \text{kVArh}^2)}$$

L'amélioration du facteur de puissance à une moyenne mensuelle dépassant 0,80 offre des économies équivalentes à la pénalité sans compter l'économie par réduction de la puissance taxée.

3.2 Augmentation de la puissance disponible

L'installation de condensateurs en aval d'un transformateur chargé qui alimente une installation dont le facteur de puissance est faible permet une augmentation de la puissance disponible au secondaire de ce transformateur. Il est ainsi possible de réaliser l'extension d'une installation sans avoir à changer le transformateur. Par exemple, un transformateur de puissance apparente nominale 500 kVA, ne délivre que 400 kW de puissance active si le facteur de puissance est de 0,80. Si le facteur de puissance passe à 0,90, le transformateur peut délivrer 450 kW de puissance active, soit une capacité supplémentaire de 50kW. Il est donc possible de réaliser cette extension en installant des condensateurs d'amélioration du facteur de puissance sans changer le transformateur ce qui constitue un meilleur investissement.

3.3 Pertes du réseau de distribution

Un bon facteur de puissance permet de diminuer les pertes en ligne à puissance active constante. Les pertes dues au passage du courant dans les conducteurs sont proportionnelles au carré du courant. A faible facteur de puissance le courant total augmente, pour maintenir la puissance active nécessaire, les pertes de distribution augmentent suivant le carré du courant

■ Exemple

Un réseau industriel a un facteur de puissance de 0,85 (condition a) pour donner 100 kW à 400 V. Si les pertes du réseau de distribution sont de 2 %, que devient leur valeur si le facteur de puissance passe à 0,80 (condition b).

$$\text{On a:} \quad \sqrt{3} U I_a \cos \phi_a = \sqrt{3} U I_b \cos \phi_b$$

$$\text{donc:} \quad I_b = I_a \left(\frac{\cos \phi_a}{\cos \phi_b} \right)$$

Les pertes de puissance sont égale à:

$$P_b = R I_b^2 = R I_a^2 \left(\frac{\cos \phi_a}{\cos \phi_b} \right)^2$$

$$P_b = P_a \left(\frac{\cos \phi_a}{\cos \phi_b} \right)^2$$

$$P_b = 2,26 \% \text{ les pertes augmentent de } 13 \%$$

La réduction des pertes par amélioration du facteur de puissance est donnée par la formule suivante:

$$\text{Diminution des pertes} = 1 - \left(\frac{\cos \phi_{\text{initial}}}{\cos \phi_{\text{amélioré}}} \right)^2$$

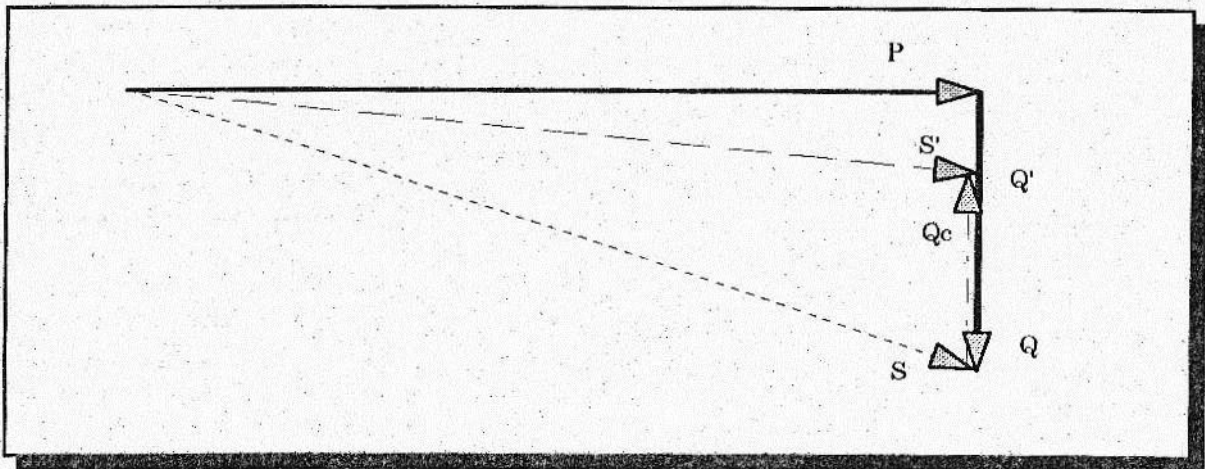
Remarque: L'amélioration du facteur de puissance permet aussi de diminuer les chutes de tension en ligne. Aussi la section des câbles à utiliser sera d'autant plus faible que le facteur de puissance sera meilleur.

3.4 Stabilité de la tension

Un bon facteur de puissance permet de stabiliser le plan de tension des réseaux de transport, de répartition et de distribution. Dans les installations industrielles, il est difficile de justifier économiquement la correction du facteur de puissance par la seule amélioration de la tension.

4. Amélioration du facteur de puissance

Le fait d'installer un condensateur générateur d'énergie réactive est un moyen simple, souple et vite amorti de s'assurer d'un bon facteur de puissance. Cela s'appelle compenser une installation. La figure ci-dessous illustre le principe de compensation de la puissance réactive Q d'une installation à une valeur plus faible Q' par la mise en œuvre d'une batterie de Condensateurs de puissance Q_c . Dans le même temps, la puissance apparente passe de S à S'



Il y a plusieurs méthodes pour installer les condensateurs d'amélioration du facteur de puissance dans un système.

4.1 Compensation individuelle

La compensation individuelle est: la façon la plus simple et la plus efficace pour améliorer le facteur de puissance.

Cette méthode présente les avantages suivants:

la correction influence la totalité du réseau de distribution, du condensateur jusqu'à la source; ainsi la capacité du réseau de distribution est augmentée. Aucun mode d'interruption supplémentaire n'est nécessaire le condensateur peut être branché directement sur l'équipement qu'il compense.

Le dimensionnement du condensateur est Simplifié.

Le condensateur est couplé directement à l'équipement et peut rester branché si l'équipement est déposé pour entretien,

La compensation individuelle est surtout utilisée dans les systèmes où un équipement particulier est identifié comme contribuant à la diminution du facteur de puissance. Un bon exemple d'une telle application sont les lampes fluorescentes.

Un inconvénient de la compensation individuelle est son coût élevé. De même, si la charge a des fluctuations importantes, un condensateur convenable pour la compensation à pleine charge peut donner une sur-compensation à faible charge, ce qui entraîne un facteur puissance avant et risque de provoquer des surtensions dangereuses pour les éléments du réseau.

4.2 Compensation par secteur

La compensation par secteur ou par groupe offre des avantages considérables par rapport à la compensation individuelle. Le matériel et le coût de l'installation sont réduits, tout en permettant l'augmentation de la capacité du système de distribution. Cependant en cas d'une variation importante de la charge, une compensation automatique est nécessaire; ce

- nu augmente les coûts initiaux.

4.3 Compensation centralisée

La compensation centralisée tient compte du problème du facteur de puissance de toute l'installation. Elle offre l'installation la plus simple et réalise généralement le meilleur compromis technico-économique. La possibilité d'enclenchement et de déclenchement est une nécessité pour commander les batteries de condensateurs lors de la variation de la charge. Le seul inconvénient de la compensation centralisée est qu'elle n'améliore pas la capacité de l'installation électrique comme le font les méthodes précédentes.

La compensation d'énergie réactive peut se faire avec des condensateurs fixes si la charge reste relativement constante. La compensation d'énergie réactive se fait le plus souvent par batterie de condensateurs à régulation automatique. Ce dernier type d'équipement permet l'adaptation automatique de la puissance réactive fournie par les batteries de condensateurs en fonction d'un cos, désiré et imposé en permanence.

4.4 Dimensionnement des condensateurs

Des tables et des abaques sont disponibles pour rendre plus facile le calcul de la puissance réactive nécessaire. Pour calculer la puissance réactive nécessaire pour une amélioration particulière du facteur de puissance d'une charge déterminée, trois données sont nécessaires:

- **Facteur** de puissance existant: le facteur de puissance de l'installation ou de la charge en question doit être mesuré. pour différentes charges; on peut aussi, pour un dimensionnement plus efficace des condensateurs, utiliser la valeur la plus faible du facteur de puissance déduite des factures de l'année précédente.
- Charge (kW) du système ou de l'équipement à corriger: la puissance mesurée correspondant au facteur de puissance mesuré doit être utilisée; la demande maximale la plus élevée; déduite des factures de l'année précédente, peut constituer une valeur de base de la charge; on peut aussi, pour une estimation rapide, utiliser la charge totale installée.

Le nouveau facteur de puissance souhaité: au Maroc la structure tarifaire spécifie une pénalité si le facteur de puissance devient inférieur à 0,80. Dans le cas où la puissance taxée est au-delà de la puissance souscrite, le facteur de puissance devrait tendre à **I**.

Ces données sont utilisées dans la formule suivante pour déterminer la puissance réactive nécessaire à la correction du facteur de puissance d'une charge donnée:

$$\text{KVAr (nécessaire)} = \text{kW (tg phi1 - tg phi2)}$$

Où kW = Puissance de la charge en kW
phi1: angle de déphasage initial ou existant
 phi2 : angle de déphasage final après correction

5. Exemples

■ Exemple 1:

Une installation industrielle a un **facteur** de puissance de 0,75. La puissance taxée

est de 800 kVA, mais la demande maximale durant les deux dernières années n'a pas dépassé 600 kW. Déterminer la capacité nécessaire des condensateurs pour éviter les pénalités du facteur de puissance.

- Puissance taxée: 800 kW
- Demande maximale : 600 kW
- Facteur de puissance actuel: 0,75
- Facteur de puissance désiré: 0,80

$$Q_c = 600 (\text{tg } \phi_1 - \text{tg } \phi_2) = 79 \text{ kVAr}$$

Si les bancs capacitifs sont, fournis en multiples de 12,5 kVAr, les condensateurs choisies auront une capacité de 87,5 kVAr (1 banc de 50 kVAr, 1 banc de 25 kVAr et' 1 banc de 12,5 kVAr).

■ Exemple 2:

Un câble de 380 V dimensionné pour 235 A alimente une charge de 300 A sous un facteur de puissance de 0,70. Quelle est la puissance des condensateurs à installer pour ramener le courant à sa valeur nominale?

Puissance active consommée par la charge: P
 $= \sqrt{3} \times 380 \times 300 \times 0,70 \times 10^3 = 138 \text{ kW}$

Puissance apparente au courant nominal de 235 A: S
 $= \sqrt{3} \times 380 \times 235 \times 10^3 = 154,7 \text{ kVA}$

Le facteur de puissance correspondant au fonctionnement à 235 A est: •
 $\cos(\phi_2) = P/S = 0,89$

La puissance des condensateurs est égale à:

$$Q_c = P (\text{tg } \phi_1 - \text{tg } \phi_2) = 70 \text{ kVAr} \blacksquare$$

Exemple 3:

Un groupe turbo-alternateur de 1250 kVA fonctionne à sa charge nominale avec mi facteur de puissance de 0,80. Une charge de 170 kW avec un facteur de puissance de 0,85 sera ajoutée. Quelle capacité de condensateurs sera nécessaire pour que l'alternateur ne soit pas surchargé?

Conditions initiales:

$$\begin{aligned} S &= 1250 \text{ kVA.} \\ \text{Facteur de puissance} &= 0,80 \\ P &= S \cos \phi = 1000 \text{ kW} \\ Q &= S \sin \phi = 750 \text{ kVAr} \end{aligned}$$

Charge additionnelle:

$$\begin{aligned} P &= 170 \text{ kW} \\ \text{Facteur de puissance} &= 0,85 \\ S &= P / \cos \phi = 200 \text{ kVA} \end{aligned}$$

$$Q = P \cdot \tan \phi = 105 \text{ kVAr}$$

Conditions finales:

$$P = 1.170 \text{ kW}$$

$$Q = 750 + 105 = 855 \text{ kVAr}$$

$$\text{Le facteur de puissance minimale: } \cos \phi = 1170/1250 = 0,935$$

La capacité de la batterie de condensateurs sera: $Q_c =$

$$1000 \times 0,371 + 170 \times 0,241 = 412 \text{ kVAr}$$

ou Exemple 4:

Une usine présente les caractéristiques suivantes:

Puissance souscrite: 600 kVA

Coût annuel des puissances taxées: 141 850 Dh

Facteur de puissance moyen: 0,82

La tarification de l'usine est du type Régie, la redevance de puissance est de 231.78

.1)11./kVA/an

.1) Calculer la puissance moyenne taxée.

2) Calculer la quantité de condensateurs à installer et le temps de retour de l'investissement pour ramener le facteur de puissance à 0,98, au coût moyen des capacités de 200 Dh/kVAr.

3) Quelles précautions techniques doit-on prendre afin de garantir les gains de cette opération?

1) La puissance moyenne taxée:

$$\text{Coût annuel des puissances taxées/ prix du KVA/an} = 141\ 850 / 231,78 = 612 \text{ kVA}$$

Cette valeur indique qu'il y avait des dépassements de la puissance souscrite.

2) La capacité à installer

$$\text{Puissance moyenne en kW} = 612 \times 0,82 = 502 \text{ kW}$$

La capacité à installer est de: 248 kVAr

La nouvelle puissance moyenne appelée est de: $502 / 0,98 = 512 \text{ kVA}$

Après installation des capacités, si l'usine appelle au maximum une puissance de 512 kVA, la puissance taxée serait de 600 kVA (tarification des Régies)

Le gain serait:

$$\text{Ancien coût des puissances taxées - Nouveau coût des puissances taxées} = 141\ 850 - 600 \text{ kVA} \times 231,78 \text{ dh/kVAJan} = 2782 \text{ Dh/an}$$

Par contre, il suffit d'une simple demande à la régie, pour faire passer la puissance souscrite

de 600 kVA à 512 kVA.

Dans ce cas le gain serait de:

$$141\ 850 \text{ Dh/an} (512 \text{ kVA} \times 231,78 \text{ Dh/kVA/an}) = 23\ 178 \text{ Dh/an}$$

L'investissement correspondant à l'installation des condensateurs:

$$200 \text{ Dh/kVAr} \times 248 \text{ kVAr} = 49\ 600 \text{ Dh}$$

Le temps de retour de l'investissement:

$$T1 = 49\ 600 / 23\ 178 = 2,1 \text{ ans}$$

3) Pour garantir le gain de cette opération, il est recommandé de contrôler la puissance appelée de l'usine. Il suffit d'appeler une puissance au-dessus de 512 kVA durant une période supérieure à 10 mn (durée d'intégration du contrôleur de puissance de la régie) pour titre taxé toute l'année à cette puissance. Les bénéfices seraient ainsi perdus.

Une solution des plus simples revient. à installer un avertisseur sonore réglé à 512 kVA. Dès que cette puissance est atteinte l'avertisseur donne une alarme, il est possible d'intervenir dans les minutes qui suivent pour couper momentanément une charge électrique non prioritaire dans le process afin de ne pas dépasser la puissance de consigne.

Au prix de 7000 Dh pour l'avertisseur sonore le temps de retour s'élève mais reste acceptable:

$$TR = (49\ 600 + 7000) / 23\ 178 = 2,4 \text{ ans}$$

CHAPITRE 3

GESTION DE LA DEMANDE ELECTRIQUE

La gestion de la demande peut devenir un instrument puissant pour réduire les frais d'électricité et compenser l'effet des prix croissants de l'énergie. Les techniques de cette gestion comporte la commande des équipements électriques ou de la charge pour réduire la consommation électrique (kWh) et la demande maximale (kVA).

Ce chapitre donne un aperçu des options qui peuvent permettre cette gestion de la demande. Pour la détermination de la demande maximale, l'intégration est faite sur une période fixe de 10 minutes. Les premiers pas vers un programme de gestion de la demande sont:

- Comprendre la facture d'énergie et déterminer si des possibilités de réduction de la demande existent.
- Déterminer quand la demande maximale se produit, c'est-à-dire déterminer le jour et l'heure où elle se produit.
Identifier les charges qui contribuent aux pointes de la demande et les charges qui peuvent être arrêtées ou réduites pour éviter une pointe de la demande.

Le taux de charge de l'entreprise:

Un paramètre utile à la détermination de l'effet relatif de la demande maximale et à l'évaluation des opportunités de réduction de la demande est le taux de charge de l'entreprise. Ce taux est défini comme le rapport de la consommation électrique effective mensuelle à la consommation électrique fictive correspondant à la demande maximale du mois. Son calcul est montré dans l'équation suivante:

$$\text{Taux de charge} = \frac{\text{Nbre de kWh. consommés}}{(\text{Puissance appelée du mois}) \times (\text{Nbre d'heures de la période})}$$

Un taux de charge élevé indique une meilleure utilisation de la puissance appelée. Un taux de charge faible renseigne sur le fait qu'il y a des possibilités d'améliorer ce taux en tentant de réduire la puissance maximale tout en gardant constant la consommation de cette puissance. Il est cependant bien évident qu'une entreprise opérant 24h sur 24 aura un taux de charge supérieur à celui d'une entreprise oeuvrant 8h par jour. Ce qui est important à ce niveau c'est de comprendre la valeur relative de ce taux.

Courbes de charge ou profils de la demande

Dès que le taux de charge indique la possibilité de contrôle de la demande, les courbes de charge peuvent être établies et examinées pour déterminer quand et par quelles charges se produise la puissance appelée. Les courbes de charge doivent être tracées en commençant par l'échelle de temps la plus importante, comme indiqué dans le tableau ci-dessous:

• Demande maximale. mensuelle	Les .2 ou 3 dernières années	• Factures. d'électricité
Demande maximale quotidienne	Une période de facturation	Compteurs de kW.
Demande horaire	Une journée typique	.Ampèremètres enregistreurs

Le profil de la demande maximale mensuelle peut renseigner. rapidement sur l'allure de la demande sur l'année et indiquer quels 'sont les mois qui contribuent.le plus à la demande facturée. La courbe de la demande maximale quotidienne indique les jours où se produisent leS demandes les plus élevées. Quant au profil de 'la demande horaire, il indique les instants de la journée où se produisent les demandes maximales. Dès que l'une de ces courbes est établie, un certain nombre de questions apparaissent immédiatement:

- ▶ *Pourquoi la demande d'un mois est-elle plus élevée qu'un autre?*
- ▶ • *Pourquoi y a-t'il une grande différence d'un mois à l'autre?*
- ▶ *est-ce que la production varie suffisamment pour justifier une telle différence des valeurs? Les différences sont-elles en corrélation avec la production?*
- ▶ *Pourquoi la demande n'est pas constante d'un mois à l'autre?*
- ▶ *Pourquoi la pointe quotidienne se produit-elle à un instant particulier?*

La réponse à ces questions et à plusieurs autres peuvent mener à l'identification de mesures permettant le contrôle de la demande. Il peut être opportun de .prendre des mesures supplémentaires pour identifier quel est l'équipement qui contribue le plus à la demande et dans quelles limites.

Identification des charges

Pour contrôler la demande maximale, on doit identifier deux types de charges électriques. Celle du premier type correspondant aux équipements qui ont un effet négatif sur la pointe et qui constituent la première cible pour le contrôle de la demande. Les lectures des ampèremètres et wattmètres doivent être mémorisées pour servir à l'identification des machines responsables et à la quantification de leur contribution à la pointe de la demande. Plus souvent, une deuxième catégorie de charges est à identifier. Ce sont les charges qui ne contribuent pas beaucoup à la pointe de la demande et qui peuvent être mises hors tension ou délestées avec des effets négatifs moindres sur la production.

Pour le contrôle de la charge, on agit principalement sur les équipements qui ne nécessitent pas un fonctionnement continu, sur, les charges auxiliaires non indispensables ou sur les équipements fonctionnant par commande thermostatique si le gradient thermique n'est pas critique. Des exemples de ces charges sont

Compresseurs d'air	Ventilateurs
Fours à induction	Fours de séchage
Stockage à froid	Chargeurs de batteries
Chauffe-eau	Equipement de pompage
Climatiseurs	Concasseurs, broyeurs

Il est primordial de bien cerner les priorités pour chacune de ces charges afin d'éviter des impacts négatifs sur la production ou le confort. Ainsi, une charge devant avoir un impact direct sur la production aura une priorité dite plus faible au-niveau du délestage qu'une charge n'ayant aucun impact sur les activités de l'outil de production.

Méthodes de contrôle de la demande

La demande peut être contrôlée soit manuellement soit automatiquement. Chaque méthode a ses avantages et inconvénients et surtout des niveaux de complexité et de coût différents.

Pour le contrôle manuel de la demande, nous n'allons citer que:

La programmation de la charge: en fonction des besoins de la production, il est possible de programmer l'arrêt et la marche de certains équipements en assignant cette tâche à une personne habilitée à effectuer ce genre d'opération. Il peut arriver que ce genre de contrôle puisse aboutir à un mécanisme dit automatique.

La surveillance: Ce mode de contrôle de la demande reste une façon simple mais cependant peu fiable. Un système manuel amélioré peut être constitué d'une alarme qui s'enclenche dès que la demande dépasse un seuil préalablement fixé. Ceci n'aura d'effet que si une action est prise immédiatement lorsque l'alarme se fait entendre.

Dans plusieurs entreprises, le nombre élevé et la diversité des charges ainsi que les nombreuses variantes de commande rendent le contrôle manuel plus délicat. Dans les installations où le contrôle manuel fonctionne déjà, une réduction de la demande peut être réalisée par l'installation additionnelle du contrôle automatique.

Citons uniquement le système le plus couramment utilisé:

Le contrôleur de puissance: cet appareil, offert sur le marché dans une large variété et ayant des degrés de complexité, de sophistication et de coût, actionne un signal afin d'arrêter momentanément des charges électriques, choisies à l'avance, pour stabiliser la demande maximale.

CHAPITRE 4

MOTEURS ELECTRIQUES

1. Introduction

Le moteur électrique est de loin la machine la plus utilisée pour convertir la puissance électrique en puissance mécanique ou en travail utile. Au Maroc, les moteurs électriques consomment 60 à 70 % de l'énergie du secteur industriel. Ces moteurs entraînent des pompes, des ventilateurs et des compresseurs.

La multiplication des besoins en force motrice a conduit à la réalisation de moteurs électriques de plus en plus performants et adaptés à chaque application. Ils se classent en trois grandes familles:

- moteurs à courant continu (traction, laminoir),
- moteurs synchrones (forte puissance),
- moteurs asynchrones (ou à induction) qui couvrent 80 à 90 % des usages.

Puisqu'une grande partie de l'utilisation de l'énergie électrique se fait à travers les moteurs électriques, leur rendement est d'une importance primordiale du point de vue de l'économie d'énergie. Le rendement des moteurs électriques asynchrones, leur entretien et leur amélioration; sont discutés en détails dans ce chapitre.

2. Constitution des moteurs asynchrones

L'enroulement statorique alimenté par une tension alternative triphasée produit un champ magnétique tournant à une vitesse constante autour de l'axe du stator. L'enroulement du rotor n'est pas relié à une source de courant extérieure. Les courants électriques sont induits dans l'enroulement rotorique par le fait que, lors de sa rotation, le rotor est toujours en retard sur le champ magnétique tournant. Tout se passe comme s'il y avait glissement du rotor par rapport au champ tournant.

Le stator et le rotor séparés par l'entrefer se composent d'un circuit magnétique, qui canalise l'essentiel du flux magnétique, et de bobinages qui sont logés dans des encoches réparties sur le diamètre d'alésage pour le stator, sur la périphérie pour le rotor.

Le bobinage stator généralement triphasé, présente $2p$ pôles et est relié au réseau de fréquence f (Hz). Selon la nature du bobinage rotor, on distingue deux grandes classes de machines asynchrones:

- les machines à bagues **ou** à rotor bobiné,
- les machines à cage "d'écureuil" ou à rotor en court-circuit.

La vitesse N du rotor d'un moteur asynchrone est nécessairement inférieure à la vitesse du champ tournant N_s (vitesse synchrone atteinte uniquement à vide). La différence relative des vitesses s'appelle le glissement.

$$G = (N_s - N)/N_s$$

- Avec: $N_s = 60 f / p$ (tr/mn)
 - f: fréquence du réseau (hz),
 - nombre de paires de pôles. •

En pratique le glissement nominal reste faible (6 % pour les petits moteurs, moins de 1 % pour les gros). •

3. Rendement et pertes d'un moteur •

- Le rendement d'un moteur électrique peut être défini comme le rapport de la puissance mécanique délivrée par le moteur par la puissance électrique fournie au moteur.

$$\text{Rendement du moteur} = \text{kilowatts de sortie} / \text{kilowatts d'entrée}$$

Sur la plaque signalétique d'un moteur asynchrone on indique la puissance à l'arbre (c'est à dire la puissance mécanique utile). Si cette puissance est exprimée en CV une conversion en kW est nécessaire (1 CV = 0,7355 kW). • •

La puissance non transmise par le moteur électrique est la puissance perdue dans la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique.

3.1 Pertes du moteur

Les pertes du moteur peuvent être divisées en deux catégories:

- les pertes à vide: elles sont indépendantes de la charge du moteur. Ces pertes se répartissent en pertes fer et pertes par frottement.
- les pertes en charge: se produisent quand le moteur est chargé et dépendent de la charge. Ces pertes se répartissent en pertes Joule stator, pertes Joule rotor et pertes de charge diverses.

Résumé des pertes d'un moteur asynchrone (%) (10 à 20 CV, rendement 85 %)

Pertes:	
Pertes Joule stator:	5,6
Pertes Joule rotor:	2,7 •
Pertes fer:	3,□
• Frottement et ventilateur:	1,4
Pertes diverses:	2,3
 Pertes totales	 15

Les pertes Joule stator et rotor sont des pertes ohmiques dues au passage du courant à travers les bobinages du stator et du rotor. Ces pertes sont fonction des courants statorique et rotorique et des résistances des bobinages. •

Les pertes fer sont la somme des pertes par courant de Foucault et par hystérésis. Ces

perdes résultent des inductions variables dans le fer. La densité du flux dans la structure magnétique est un facteur important dans ces pertes. La qualité et l'épaisseur des tôles influent aussi sur ces pertes.

Les pertes par frottement et ventilation sont dues au frottement entre l'air et le rotor, au trajet d'air de ventilation et au frottement sur les supports, et représentent 0,5 à 1,5 % de la puissance utile du moteur. Les pertes de charge diverses sont causées par les effets de bord dans les bobinages. Ces pertes peuvent représenter jusqu'à 2 % dans le rendement du moteur.

3.2 Détermination du rendement du moteur

La majorité des fabricants de moteurs à travers le monde fournissent les données relatives au rendement du moteur. Plusieurs pays ont établis des lois exigeant que le rendement du moteur apparaisse sur la plaque signalétique.

En principe, le rendement d'un moteur asynchrone est un paramètre difficile à déterminer. Un certain nombre de méthodes ont été utilisées dans le monde pour mesurer, évaluer ou déterminer le rendement du moteur. Les méthodes utilisées diffèrent d'un fabricant à l'autre, ces méthodes sont applicables aux moteurs placés sur bancs d'essai. En général, les constructeurs des moteurs suivent les normes de leur pays, si elles existent. Cependant, la procédure d'essais standards 112 de la norme IEEE et les méthodes CEI 84-2 sont les plus utilisées pour la détermination des rendements.

On distingue deux types de méthodes:

les méthodes de mesure directes: elles se basent sur l'utilisation de la formule de définition du rendement et des mesures de la sortie mécanique et de l'entrée électrique pour déterminer le rendement. Parmi les types d'essais utilisés on peut citer: l'essai de freinage dans lequel un frein mécanique est utilisé pour charger le moteur; l'essai par dynamomètre dans lequel un dynamomètre est utilisé pour charger le moteur; l'essai par machine identique.

Détermination indirecte du rendement: **dans** les cas **où** les essais en charge ne peuvent pas être effectués, on peut utiliser la méthode de calcul par circuit équivalent. Pour une détermination plus précise du rendement, la méthode de séparation des pertes peut être utilisée. La méthode de calcul par circuit équivalent utilise les données des essais à vide et à rotor bloqué. La méthode de séparation des pertes mesure la puissance d'entrée et calcul la puissance de sortie par détermination séparée des pertes pour différents points de fonctionnement.

4. Rendement des moteurs standards

Les moteurs standards désignent tous les moteurs fabriqués selon les spécifications de rendement en application avant la fin des années 1970. L'objectif des fabricants était de produire un moteur à rendement raisonnable à faible prix de vente. Durant les dix dernières années, des améliorations de rendement ont été introduit ce qui a donné naissance aux moteurs à rendement élevé.

Le tableau suivant indique les rendements types des moteurs standards produits par les principaux fabricants.

**Rendement à pleine charge des
moteurs asynchrones triphasés**

Puissance CV .	Gamme de rendement (h)	Rendement nominal moyen (%)
1	68-78	73
1,5	68-80	75
2	72-81	77
3	74-83	80
5	78-85	82
7,5	80-87	84
10	81-88	85
15	83-89	86
20	84-89	87,5
25	85-90	88
30	86-90,5	88,5
40	87-91,5	89,5
50	88-92	90
60	88,5-92	90,5
75	89,5-92,5	91
100	90-93	91,5
125	90,5-93	92
150	91-93,5	92,5
200	91,5-94	93
250	91,5-94,5	93,5

Bien que les rendements nominaux cités ci-dessus sont utiles pour comparer les rendements de moteurs de tailles différentes, la plage exacte des rendements pour chaque taille de moteur a un rôle important. La variation de cette plage peut entraîner une différence significative dans les coûts de fonctionnement, comme montré dans l'exemple suivant:

■ **Exemple**

Calculer les économies annuelles d'un moteur de 25 CV à rendement de 90 %- par rapport à celui d'un rendement de 85 %.

o Au rendement de 85 %:

$$\text{La puissance électrique absorbée} = 25 \times 735,5 / 0,85 = 21\ 632 \text{ W}$$

o Au rendement de 90 %:

$$\text{La puissance électrique absorbée} = 25 \times 735,5 / 0,9 = 20\ 431 \text{ W}$$

La différence de puissance = 21 632 - 20 431 = 1201 W

Pour une durée de fonctionnement de 8000 h/an et un coût de l'énergie de 0,90 Dh/kWh

Les économies annuelles = $1,201 \times 8000 \times 0,9 = 8647$ Dh/an

Ainsi, une différence de quelques pour cents dans le rendement peut entraîner des différences significatives de coût sur la période de fonctionnement annuelle.

Remarque: ○ Tout acquéreur d'un moteur électrique doit veiller à;

- considérer le rendement du moteur,
- Vérifier qu'il n'existe pas de moteur à rendement meilleur avec un prix initial intéressant.
- Le coût d'achat d'un moteur peut représenter 1 à 5 % du coût de fonctionnement du moteur.

5. Facteurs influençant le rendement du moteur électrique

Il y a un nombre de facteurs relatifs au fonctionnement et à l'entretien du moteur qui ont un grand effet sur son rendement. Dans le but de maintenir et d'améliorer le rendement de fonctionnement du moteur, tous les facteurs, détaillés ci-dessous, doivent être pris en considération.

5.1 Puissance du moteur

Le rendement du moteur varie considérablement avec sa puissance, surtout dans la gamme des petits moteurs. Un moteur plus puissant a toujours un rendement meilleur qu'un moteur moins puissant. Ceci parce que pour les moteurs standards, le critère principal de dimensionnement du moteur a été la contrainte d'élévation de température. Pour les moteurs de puissance élevée, ce critère impose que les pertes du moteur soient maintenues à une valeur faible. Ainsi, ces moteurs ont été fabriqués pour un rendement plus élevé.

5.2 Charge du moteur

La charge du moteur peut avoir aussi un effet significatif sur son rendement. Un moteur chargé à plus de 50% a un rendement relativement stable. A charge plus faible, le rendement diminue considérablement. Les faibles rendements sont dues aux charges inadaptées ou à un fonctionnement à vide des moteurs; de telles conditions doivent être évitées.

Aussi la faible charge des moteurs fait baisser le facteur de puissance. Cette situation est plus grave que la diminution du rendement, ce qui constitue une raison supplémentaire pour minimiser le fonctionnement à faible charge ou à vide des moteurs.

5.3 Dimensionnement et choix du moteur

En général, les ingénieurs choisissent des moteurs surdimensionnés pour leur applications. Si les moteurs sous-dimensionnés ne répondent pas à la tâche exigée, le surdimensionnement du moteur n'augmente pas seulement le coût initial mais peut aussi conduire à un fonctionnement à rendement faible du fait que le moteur se trouve moins chargé. En outre, un moteur à faible charge aura un faible facteur de puissance et

contribuera donc à la diminution du facteur de puissance global de l'entreprise.

Bien que les moteurs ne doivent pas être délibérément surdimensionnés, un surdimensionnement raisonnable n'entraîne pas nécessairement une baisse du rendement. En effet, un moteur de 10 CV développant une puissance mécanique de 7,5 CV fonctionne à un rendement de 86 % alors qu'un moteur de 7,5 CV qui fonctionne à pleine charge n'a qu'un rendement de 84 %. Dans ce cas, le remplacement du moteur surdimensionné par un moteur plus petit ne présente pas un bon compromis technico-économique.

Le fonctionnement des moteurs au-dessous de la charge recommandée (entre 75 % et la pleine charge) influe sur le rendement, le facteur de puissance et le coût d'achat.

Cependant, du point de vue utilisation, gestion des stocks et maintenance, il est parfois intéressant de limiter les types de moteurs dans une entreprise. Ceci permet de réduire les pièces de rechange et évite des investissements supplémentaires.

5.4 Variation de tension

Les constructeurs de moteurs tolèrent un écart de tension ne dépassant pas 10 % de la tension nominale à fréquence nominale. La variation de la tension peut avoir un effet significatif sur le rendement du moteur. Elle a aussi des effets graves sur d'autres paramètres du moteur et tend à réduire sa durée de vie. Les tensions élevées doivent être évitées ou contrôlées le plus efficacement possible. Le déséquilibre de tensions entre phases a un effet plus grave sur le fonctionnement du moteur et doit être strictement contrôlé. Un déséquilibre de 5 % par exemple, peut augmenter les pertes du moteur de 33 %.

Effet de la variation de la tension sur les performances d'un moteur asynchrone

Caractéristiques de fonctionnement.	90 % tension	110 % tension	120 % tension
Couple de démarrage	inchangée	+ 21 %	+ 44 %
Vitesse de synchronisme	inchangée	inchangée	inchangée
Glissement	+23 %	- 17%	- 30 %
Vitesse nominale	- 1 à 1/2	+ 1 %	+ 1 à 1/2 %
Courant de démarrage	- 10 à 12 %	+ 10 à 12 %	+ 25 %
Courant à pleine charge	+ 1 à 5 %	+ 2 à 11 %	+15 à 35%
Augmentation de température pleine charge	+ G à 12 %	+ 4 à 23 %	+30 à 80%
Rendement			
Pleine charge	+2 à 1 %	- 1 à 4 %	-7 à 10%
3/4 charge	+ 1 à 2 %	- 2 à 5 %	-6 à 12 %
1/2 charge	+ 2 à 4%	- 4 à 7 %	-14 à 18%
Facteur de puissance			
pleine charge	+ 8 à 10%	- 10 à 15 %	-10 à 30%
3/4 charge	+ 10 à 12 %	- 10 à 15 %	-10 à 30%
1/2 charge	+ 10 à 15%	- 10 à 15 %	-15 à 40%

5.5 Maintenance du moteur

Les moteurs fonctionnent plus efficacement, durent plus longtemps et nécessitent moins d'attention s'ils sont nettoyés, refroidis, séchés et lubrifiés correctement. Les moteurs installés dans un environnement sévère et exposés à une grande humidité et à un lavage fréquent ont une durée de vie largement au-dessous de la moyenne. Des corps étrangers ne doivent pas bloquer les systèmes de refroidissement d'air. Le montage correct, l'alignement précis et les branchements corrects font prolonger la durée de vie du moteur et maintenir un rendement optimal. L'inspection du Moteur et l'établissement d'un programme d'entretien préventif sont importants pour aboutir à cette fin. La mesure périodique de la tension et du courant du moteur est fortement recommandée.

5.6 Rebobinage du moteur

Les mauvais rebobinages des moteurs peuvent réduire le rendement de 1 à 4 %. Grâce au prix bon marché de la main d'oeuvre et des matériaux au Maroc, le rebobinage est considérablement moins cher que le coût de remplacement par un moteur neuf. Les moteurs neufs coûtent près de trois fois le prix des moteurs rebobinés. La qualité du rebobinage manuel est plutôt médiocre.

La diminution du rendement dans le processus de rebobinage dépend des techniques de rebobinage. En fait, toutes les pertes peuvent être influencées considérablement: pendant le rebobinage par exemple: en utilisant un fil de diamètre plus petit ou de qualité plus faible pour le rebobinage, on augmente les pertes Joule statoriques; en réduisant le nombre de spires du stator on réduit le facteur de puissance du moteur; en endommageant le noyau magnétique du stator ou du rotor on change la géométrie de l'entrefer et par conséquent les pertes du stator. Les pertes par frottement ou ventilation peuvent être influencées par un changement dans les supports ou du lubrifiant du ventilateur ou par la procédure d'assemblage.

Grâce au prix bon marché du rebobinage, il n'est pas raisonnable de recommander l'abandon du rebobinage des moteurs électriques. Ce qui est nécessaire c'est d'informer les techniciens sur les effets négatifs du rebobinage.

■ Exemple:

Un moteur d'une soufflerie de 60 CV fonctionnait d'une façon continue à tension nominale de 380 V. Les mesures hebdomadaires du courant à pleine charge variaient entre 74 et 77 A. Quand le moteur s'est grillé, il a été rebobiné et installé de nouveau. Actuellement les mesures du courant à pleine charge sont entre 77 et 80 A. Le facteur de puissance de l'installation est maintenu à 0,8.

Le coût de remplacement et rebobinage du moteur sont:

Moteur neuf:	24.000 Dh
Coût de rebobinage:	7 500 Dh
Coût net supplémentaire:	$24\ 000 - 7\ 500 = 16\ 500$ Dh

consommation de puissance avant rebobinage:
 $1,73 \times 380 \times 0,8 \times 75 \times 0,001 = 39,5$ kW

Consommation de puissance après rebobinage:

$$1,73 \times 380 \times 0,8 \times 78 \times 0,001 = 41,1 \text{ kW}$$

Consommation supplémentaire d'énergie:

$$(41,1 - 39,5) \times 8760 \text{ h/an} = 13\,838 \text{ kWh/an}$$

o Coût supplémentaire à 0,9 Dh/kWh = 12 454 Dh/an

• Durée d'amortissement de l'achat du nouveau moteur
 $16500 / 12454 = 1,4 \text{ an}$

Dans cet exemple, l'investissement supplémentaire nécessaire pour l'achat d'un nouveau moteur peut être remboursé en seize mois. Il y a des chances pour que le moteur neuf ait un rendement plus élevé que celui de l'ancien moteur. Même avant le rebobinage. Ainsi, la durée d'amortissement sera encore plus courte.

6. Moteurs à rendement élevé

Avec la crise de l'énergie, la notion de rendement a repris de l'importance, d'où l'apparition sur le marché de moteurs à rendement élevé. Bien qu'ils ont un prix initial plus élevé (15 à 25 %), les utilisateurs sont disposés à payer le supplément de prix et de le récupérer par les économies d'énergie qui seront réalisées.

6.1 Réduction des pertes des moteurs à rendement élevé

Toutes les pertes du moteur peuvent être réduites par un bon dimensionnement et utilisation de matériaux de meilleure qualité.

Les pertes Joule peuvent être diminuées en augmentant la section du fil en cuivre utilisé pour le bobinage du stator. Les pertes fer peuvent être limitées en diminuant la densité du flux et en augmentant la longueur du noyau statorique. Ces pertes peuvent aussi être réduites en utilisant un meilleur alliage pour les tôles et en diminuant leur épaisseur.

6.2 Moteurs à rendement élevé comparés aux moteurs standards

Les moteurs à rendement élevé offrent une amélioration moyenne du rendement de 5 pour cent pour les petits moteurs, et 1 à 2 pour cent pour les grands moteurs.

Les moteurs à rendement élevé sont peu disponibles au Maroc. Avec une demande suffisante, quelques constructeurs ont la compétence de produire ces moteurs à coût initial majoré de près de 25 %. Dans un grand nombre de cas, ce coût additionnel peut offrir une durée de remboursement intéressante.

Les heures de fonctionnement et le coût de l'énergie sont deux facteurs importants dans le choix du moteur qui présente le meilleur compromis technico-économique parmi les moteurs à rendement élevé et les moteurs standards.

■ Exemple

Calculer le temps de retour de l'investissement supplémentaire correspondant à l'achat d'un moteur 5 CV à rendement élevé et fonctionnant en continu au lieu d'un

moteur standard.

	Moteur standard	Moteur à rendement élevé
Puissance en CV	5	
Prix en Dh	5000	6250
Rendement (%)	81,5	85,5
Heures d'utilisation	8640 h/an	8640 <i>blan</i>
Facteur de charge	1	1
Prix unitaire du kWh en Dh	0,9	0,9
Coût d'opération Dh/an	35087	33445
Gain Dh/an		1642
Temps de retour en mois		10

1.2 Lampes à décharge dans un gaz basse pression

Le rayonnement souhaité est obtenu par le passage du courant électrique entre deux électrodes dans un gaz à basse pression qui reste relativement froid.

D'une manière générale, de forme tubulaire, ces lampes sont plus encombrantes que les lampes à incandescence. Mais leur efficacité lumineuse peut être très importante et leur durée de vie beaucoup plus grande que celle de ces dernières.

Le rendu des couleurs de certains types est bon; parfois excellent; pour d'autres types il est très mauvais. Ces lampes doivent être raccordées au secteur d'alimentation par l'intermédiaire d'un ballast nécessaire à la limitation du courant électrique.

1.2.1 Lampes ..fluorescentes

Dans ces lampes, l'émission a lieu en deux temps: dans un premier temps un rayonnement ultraviolet est produit lors du passage du courant électrique dans la colonne gazeuse. Ce rayonnement rencontre la poudre fluorescente appliquée sur la face interne de la paroi du tube, y est absorbé et provoque l'émission d'un rayonnement visible. La lampe a généralement la forme d'une ampoule tubulaire longue avec une électrode attachée à chaque extrémité. La durée de vie moyenne d'une lampe fluorescente est approximativement 6000 heures quoique les lampes les plus récentes ont une durée de vie allant jusqu'à 20000 heures.

L'efficacité des lampes fluorescentes varie de 50 à 84 lumens/Watt. Si les lampes sont combinées avec un ballast moyen ayant 10 W de pertes le rendement relatif est de 40 à 67 lumens/Watt. Les puissances nominales les plus courantes sont 20W et 40W, mais il existe aussi des tubes plus longs et de puissance plus élevée.

1.2.2 Lampes fluorescentes compactes

Du fait de l'efficacité élevée des lampes fluorescentes par rapport aux lampes incandescentes, les constructeurs produisent des tubes fluorescents qui se montent sur les douilles des lampes incandescentes. Ceci est réalisé par la construction de tubes pliés ou enroulés de faible dimension.

Ces nouvelles lampes fluorescentes sont à démarrage instantané avec ballast interne ou externe. Les lampes à ballast interne peuvent être utilisées directement en lieu et place des lampes incandescentes. Elles sont disponibles dans la gamme de 9 W, 13 W, 18 W et 25 W.

il Exemple:

Comparer les coûts de fonctionnement des lampes fluorescentes compactes et des lampes incandescentes. Le coût de l'énergie est de 0,9 Dh/kWh.

	Lampe fluorescente Compacte	Lampe incandescente.
Puissance (Watt)	18	75
Eclairage fourni (lumen)	900	900
Durée de vie (heures)	8000	750
Prix d'une lampe. (Dh)	150	5

Economie en coût d'énergie: $(75 - 18) \times 8000 \times 0,9 \times 0,001 = 410,4 \text{ Dh}$

Malgré que les lampes fluorescentes compactes ont une durée de vie 6 à 10 fois plus longue que les lampes incandescentes, leur prix reste actuellement très élevé. Au gain, d'exploitation calculés ci-dessus, il faut donc retrancher la perte sur le coût des lampes:

$$150 - (5 \times 8000/750) = 96,7 \text{ Dh}$$

soit un gain de 313,7 Dh sur les 8000 heures d'utilisation

1.2.3 Les lampes à vapeur de sodium basse pression

Cette lampe atteint une efficacité lumineuse élevée (200 lumens/Watt) car elle n'émet pratiquement rien d'autre qu'une radiation jaune monochromatique à laquelle l'oeil est particulièrement sensible. Dans ces conditions, bien entendu, son rendu des couleurs est inexistant. Cette particularité limite l'utilisation de ces lampes aux cas où les conditions économiques sont primordiales et le rendu des couleurs sans importance.

Ces lampes sont utilisées couramment pour l'éclairage externe tels que autoroutes et ports. Elles sont disponibles avec des puissances entre 35 W et 180 W.

1.3 Lampes à décharge dans un gaz haute pression

La lumière est obtenue par le passage d'un courant électrique dans un gaz à haute pression, maintenu ainsi à température élevée.. Les électrodes sont séparées par quelques centimètres et placées dans un tube en arc fermé et transparent contenant une vapeur de divers éléments métalliques. Ce tube est enfermé dans une ampoule contenant un gaz inerte. Pour effectuer une décharge électrique à travers un gaz, une tension minimale, dite tension d'allumage, est nécessaire. Après allumage, le courant augmente instantanément à cause de la formation sans obstacles d'une avalanche d'électrons, due simplement à l'ionisation. Le ballast permet de limiter le courant d'une façon suffisante, ce qui crée une situation de stabilité et la décharge devient auto-maintenu.

1.3.1 Lampe à vapeur de mercure

La lampe à vapeur de mercure contient du mercure vaporisé de 2 à 10 bars. Le mercure est liquide à la température ambiante; une petite quantité de gaz préalablement vaporisée est ajoutée pour faciliter le démarrage. La lampe à vapeur de mercure à haute pression apparaît bleue ou blanc verdâtre.

L'efficacité des lampes à vapeur de mercure est de 63 lm/W; la plupart des lampes fluorescentes récentes sont plus efficaces. La durée de vie est de 12000 heures.

1.3.2 Lampes à sodium à haute pression

Les lampes à sodium à haute pression sont un supplément récent et très précieux à la famille des lampes à décharge de gaz. Le tube de décharge, qui est fait d'un oxyde d'aluminium pour supporter l'activité chimique élevée de la vapeur de sodium à la température de fonctionnement de 700 °C, est placé dans une enveloppe en verre sous vide.

Les lampes à sodium à haute pression rayonnent l'énergie sur une grande partie du spectre visible, mais donnent un mauvais rendu de la lumière. Elles ont une apparence jaune ou jaune dorée. A cause de leur grande efficacité (80 à 140 lumens/Watt) , elles sont utilisées fréquemment pour l'éclairage des entreprises, remplaçant souvent les lampes à vapeur de mercure.

L3.3 Lampe à arc métallique

Les lampes à arc métallique sont similaires aux lampes à mercure mais contiennent des additifs d'iodure tels que l'indium, le thallium et le sodium pour améliorer considérablement l'efficacité **et le rendu de couleur**.

Les lampes à arc métallique sont utilisées principalement pour l'éclairage spot, dans les grandes surfaces et pour l'éclairage des usines où une bonne émission de couleur est importante. Leur efficacité s'étale de 60 à 100 lmJW suivant la puissance de la lampe et la position à laquelle elle est placée (verticale ou horizontale). Sa durée de vie est de 6000 à 15000 heures. Ses inconvénients sont sa courte durée **de vie et son coût relativement élevé**.

1.3.4 Lampe à lumière mélangée

La lampe à lumière mélangée est en partie fluorescente et en partie incandescente. Elle est auto-ballastée et son rayonnement ultraviolet, dû à la décharge **de mercure, est converti en radiation visible** par la couche phosphorique. A cette radiation visible s'ajoute une faible radiation visible due à la décharge elle-même et à la lumière chaude colorée de la lampe à incandescence. Le filament se comporte comme un ballast pour la décharge en stabilisant le courant de la lampe. Un ballast additionnel est inutile, ces lampes peuvent être directement branchées à la tension du réseau.

La lampe à lumière mélangée a une efficacité meilleure que celle de la lampe à incandescence, mais pas aussi élevée que celle de la lampe fluorescente. Ses avantages majeurs sont une durée de vie plus longue, un rayonnement plus élevé que les lampes à incandescence et le fait qu'elle s'ajuste directement aux douilles des lampes à incandescence. Il n'y a pas un grand avantage énergétique de la part de ces lampes; les lampes fluorescentes sont préférées du point de vue économie d'énergie.

1.4 Matériel annexe

1.4.1 Starter ou amorceur

Pour créer une tension suffisante à l'intérieur du tube à décharge, différents dispositifs d'allumage sont utilisés. Ils sont inclus dans le ballast, introduits dans la lampe ou séparés. Pour les tubes fluorescents courants, ce dispositif est appelé starter, pour les lampes haute pression, on parle d'amorceur.

1.4.2 Ballast

Toutes les lampes à décharge, y compris les fluorescentes, nécessitent un ballast pour un fonctionnement correct. Les fonctions du ballast sont les suivantes:

- **Le ballast limite le courant à travers le tube d'arc.** S'il est branché sur une

tension d'alimentation non régulée le tube d'arc Prend immédiatement un courant illimité et se détruit.

Le ballast fournit une tension de décharge pour amorcer l'arc. Il maintient ensuite la tension adéquate pour maintenir l'arc stable, évitant les surintensités et ajustant la tension aux exigences de la lampe suivant son âge. Certains ballasts fournissent aussi la correction du facteur de puissance pour compenser partiellement la réactance inductive de la bobine.

Une grande variété de ballast est disponible et la plupart des lampes fonctionnent mieux avec leurs propres ballasts. Les pertes typiques d'un ballast représentent approximativement 15 % de la puissance de la lampe. Il est important d'inclure les pertes du ballast dans les calculs de comparaison de consommation et d'économie pour les différents types de lampes.

2. Les opportunités d'économie d'énergie dans les systèmes d'éclairage

Le rendement de plusieurs systèmes d'éclairage existants peut être considérablement amélioré par le simple fait de veiller à ce que toute la lumière payée a été utilisée. Les recommandations ci-dessous constituent une première étape dans les économies d'énergie et de coût. Certaines de ces propositions sont expliquées en détails et explicitées par des exemples pratiques

ReCommandations d'économie d'énergie pour l'éclairage

L Concevoir l'éclairage pour l'activité prévue (lumière plus intense dans les zones de travail que ceux de repos).

2. Concevoir des **luminaires** plus efficaces et utiliser correctement l'éclairage naturel.
 3. Utiliser des lampes à rendement élevé (Lumen/Watt élevé).
 4. Utiliser des luminaires à rendement élevé.
 5. Utiliser un fini plus brillant pour les plafonds, les murs, les sols et le mobilier.
 6. Utiliser des lampes à incandescence à rendement plus élevé, si nécessaire,
 7. Eteindre les lumières en cas de non utilisation.
 8. Contrôler la luminosité des fenêtres.
 9. Utiliser la lumière du jour si possible.
 10. Maintenir l'équipement d'éclairage en bon état de fonctionnement et de propreté.
- H. Afficher les instructions de fonctionnement et de maintenance de l'éclairage.

2.1 Eteindre les lampes d'éclairage

L'extinction d'équipement et lampes d'éclairage non utilisés offre l'économie d'énergie la plus facile et la moins coûteuse. On oublie souvent les lampes des couloirs d'usines et des dépôts allumées alors que l'éclairage n'est pas indispensable. Généralement aucune mesure n'a été prise dans la plupart des usines pour contrôler l'éclairage et régler son niveau en fonction de l'utilisation. Les systèmes de contrôle et la sensibilisation du personnel peuvent engendrer des économies d'énergie substantielles. Les lampes fluorescentes et incandescentes doivent être éteintes quand elles sont inutiles. Les lampes à décharge à haute intensité peuvent être éteintes quand elles ne sont pas nécessaires pour plus de 30 minutes.

Plusieurs dispositifs sont disponibles sur le marché pour aider dans le contrôle des équipements de l'installation. Ces dispositifs s'étendent des simples horloges aux capteurs

sophistiqués qui déterminent si le local est occupé pour allumer et éteindre la lumière en conséquence. Pour la majorité des applications commerciales et industrielles les meilleurs dispositifs de contrôle sont les horloges et les cellules photoélectriques.

2.2 Horloges

Ce sont des dispositifs programmés pour allumer et éteindre la lumière dans une zone particulière suivant un emploi de temps prédéterminé. Des niveaux supplémentaires de contrôle peuvent être imposés pour adapter les exigences d'éclairage aux conditions de fonctionnement et de travail (nettoyage, surveillance,...),

2.3 Cellules photoélectriques

Les photocellules sont en général utilisées pour contrôler l'éclairage externe et les systèmes externes d'éclairage de sécurité en fonction de l'éclairage ambiant. Cette méthode de commande est préférable au contrôle par horloge pour l'éclairage externe, puisque les horloges conventionnelles ne peuvent pas prendre en considération les variations saisonnières de la luminosité quotidienne.

2.4 Réduire les niveaux d'éclairement

Le contrôle des niveaux d'éclairement est une autre méthode efficace pour la réduction du niveau d'éclairage. Le tableau ci-dessous donne les niveaux d'éclairement recommandés pour divers types de travail. Il faut noter que *ces* niveaux d'éclairement correspondent aux zones de travail, c'est à dire à, la zone où la tâche est effectuée.

Niveaux d'éclairement recommandés

Eclairement (Lux)	Type d'activité
20	Minimum pour la circulation à l'extérieur
30	Cours et entrepôts
50	Parking
100	Quais et docks
150	Circulation intérieur, magasins
200	Minimum pour les tâches de grosses mécanique
500	Mécanique moyenne, imprimerie, travaux de bureaux
750	Bureau de dessin, mécanographie
1000	Mécanique fine, gravure, comparaison des couleurs, dessins difficiles
1500	Mécanique de précision, électronique fine, contrôle divers
2000	Tâches très difficiles dans l'industrie ou le laboratoire

Les niveaux d'éclairement sont exprimés en Lux = 1 Lumen/m². La mesure des niveaux d'éclairement est utile pour comparer les niveaux aux normes, calculer le nombre et le type de lampes à installer ou à remplacer, vérifier que le programme de remplacement des lampes a atteint son objectif, ou observer la diminution de lumière due à l'âge de la lampe ou à l'accumulation de la poussière.

■ **Exemple:**

Dans une installation industrielle ayant une charge d'éclairage de 100 kW on a entrepris une enquête sur son besoin en éclairage. Il s'est avéré qu'en éliminant les accessoires de lumière inutile, en réduisant les niveaux d'éclairage et en adoptant un programme de sensibilisation des travailleurs, la charge d'éclairage peut être réduite de 10 % . Calculer les économies d'énergie et de coût si l'installation fonctionne 4000 heures par an et le coût d'électricité est de 0,9 Dh/kWh.

Electricité économisée: $10 \text{ kW} \times 4000 \text{ h/an} = 40\,000 \text{ kWh/an}$

Coût économisé: $40\,000 \times 0,9 = 36\,000 \text{ Dh/an}$

2.5 Utiliser la lumière du jour

Dans plusieurs établissements et bâtiments, l'éclairage naturel pénétrant par les fenêtres et les toits peut être utilisé pour réduire considérablement la charge électrique d'éclairage.

Un inconvénient de l'éclairage du soleil est qu'il peut amplifier la chaleur régnant dans le bâtiment. Dans des situations pareilles et si le bâtiment est climatisé, l'augmentation de la charge du climatiseur peut compenser l'énergie économisée par l'éclairage réduit. Même dans un bâtiment non climatisé la température ambiante peut augmenter, rendant l'environnement moins confortable. Le point clé de l'éclairage du jour est l'utilisation des techniques telles que les fenêtres "Nord", ou orientée "Nord" pour recevoir la lumière avec un minimum de chaleur.

2.6 Remplacer les sources de lumière non performantes

Le remplacement des lampes à incandescence par les lampes fluorescentes normales ou compactes doit être la première action à étudier dans tout établissement où les lampes à incandescence sont encore utilisées. Dans les régions du Maroc où les températures sont modérées, les lampes fluorescentes peuvent remplacer les incandescentes même pour l'éclairage externe.

Dans les conditions actuelles le remplacement des lampes à incandescence par des lampes fluorescentes normales, quand c'est possible, est très rentable. Par contre l'utilisation des lampes fluorescentes compactes peut ne pas être économiquement justifiée. Les exemples ci-dessous illustrent avec plus de détails certaines de ces recommandations de remplacement.

■ **Exemple:**

Une usine industrielle a une charge d'éclairage incandescente de 20 kW (100 unités de 60 W et 140 unités de 100 W). Calculer l'économie d'énergie si toute la charge incandescente est remplacée par un éclairage fluorescent. L'éclairage fonctionne pendant 2500 heures par an et le coût d'électricité est de 0,9 Dh/kWh.

- Lumière incandescente: 22 lumens/Watt
- Une lampe de 100. W: 2 200 lumens
- Une lampe 60 W: 1 320 lumens
- Lumière fluorescente: 60 lumens/Watt.
- Lampe fluorescente de 40W: 2 400 lumens

Ainsi, une lampe fluorescente à 40 W peut remplacer une lampe incandescente à 100 W ou deux lampes à 60 W. La puissance nécessaire pour une unité de lampe fluorescente est de 40 W pour la lampe et 6 W pour le ballast soit 46 W.

- Nombre de lampes fluorescentes nécessaires: $0,5 \times 100 + 140 = 190$ lampes
- Puissance de la charge fluorescente: $190 \times 46 \text{ W} = 8,74 \text{ kW}$
- Economie d'énergie: $(20 \text{ kW} - 8,74 \text{ kW}) \times 2500 \text{ h/an} = 28\,150 \text{ kWh/an}$
- Economie de coût d'utilisation: $28\,150 \text{ kWh/an} \times 0,9 \text{ Dh/kWh} = 25\,335 \text{ Dh/an}$

En fait, à cause de l'espacement des lampes à 60 W existantes, le remplacement de 2 par 1 n'est pas toujours possible et plus de lampes fluorescentes peuvent être nécessaires. Un autre bénéfice vient de la différence de durée de vie: une lampe à incandescence a une durée de vie moyenne de 750 à 1000 heures, alors que les lampes fluorescentes ont une durée de vie moyenne de 7500 à 12000 heures. Ceci veut dire que chaque lampes fluorescente durera 7 à 10 fois plus qu'une lampe à incandescence.

2.7 Nettoyer et entretenir les lampes

Les lampes sales ou vieilles et les diffuseurs cassés ou usés contribuent à la réduction du rendement du système d'éclairage. Le nettoyage ou le lavage des unités d'éclairage réduit la puissance requise pour maintenir un niveau d'éclairage adéquat. Quand c'est possible, le plafond et les murs doivent être de couleur claire pour une meilleure réflexion.

Une technique courante utilisée pour maintenir l'efficacité du système d'éclairage est le remplacement par groupe des lampes suivant un emploi de temps bien défini. Le remplacement par groupe consiste à remplacer toutes les lampes d'une zone donnée suivant un programme qui prend en considération une caractéristique de la lampe dite "dépréciation du lumen". Selon cette caractéristique, la quantité de lumière produite par une la lampe se dégrade en fonction de la durée de vie de la lampe à un taux prédéterminé. Le remplacement planifié assurant un bon rendement de la lampe et la maintenance des accessoires des unités peut aider à l'amélioration de l'efficacité de l'éclairage.

Remarque: De nouvelles technologies sont introduites pour augmenter le rendement des systèmes d'éclairage. Parmi ces technologies on peut citer: les gradateurs de lumière, les réflecteurs de lumières fluorescente, les ballasts électroniques et les capteurs de présence humaine.

CHAPITRE 6

EQUIPEMENTS DE CONVERSION D'ENERGIE

Bien que la majeure partie de l'énergie électrique soit consommée par les moteurs eux-mêmes, le volume de cette consommation est souvent dicté par les utilisations auxquelles ces moteurs sont destinés. Par conséquent, la réalisation des économies d'énergie électrique nécessite la compréhension des exigences et limites du processus de l'utilisation considérée, ainsi que le fonctionnement de l'équipement utilisé. A cet égard, l'ingénieur électricien doit combiner les efforts avec les ingénieurs mécanicien et énergéticien afin de déterminer et mettre en oeuvre des mesures d'économie d'énergie.

Après un bref rappel d'un équipement de conversion d'énergie, en l'occurrence les "pompes, ce chapitre met l'accent sur des recommandations spécifiques d'économie d'énergie.

1. Economies d'énergie dans les équipements de conversion

Un certain nombre de considérations générales visant les économies d'énergie dans les équipements de conversion sont données ci-dessous.

1:1 Arrêter les équipements lorsqu'ils tournent à vide

L'arrêt des équipements lorsqu'ils tournent à vide est une action très souvent négligée sous prétexte d'être futile ou, non appropriée. Pourtant cet arrêt est une opportunité qui peut apporter beaucoup d'économie pour un coût nul ou très faible. Pour identifier ces opportunités, il est nécessaire de bien comprendre les contraintes du procédé: Quand un équipement doit-il tourner et quand cet équipement tourne-t-il effectivement? Par exemple, les ventilateurs de circulation ou d'évacuation des gaz tournent souvent de façon continue même lorsqu'un secteur ne fonctionne que pendant 8 heures. Les systèmes d'eau froide utilisés par les équipements restent en marche même lorsque les machines ne sont pas utilisées. Les convoyeurs qu'on laisse tourner à vide durant les périodes de pauses ou de mise au point des machines. Pour se rendre compte des économies d'énergie, il suffit d'arrêter ces équipements.

On croit souvent qu'une machine électrique à vide et sans charge ne consomme que très peu de puissance. Ceci n'est pas vrai comme on le voit sur les exemples spécifiques suivants:

- Pompe centrifuge
- Pas de charge: 36 CV
 - Pleine charge: 44 CV
 - Rendement: 18 %

- Machine d'atelier de maintenance
- Pas de charge: 3,7 eV
 - Pleine charge: 4,1 CV
 - Rendement: 10 %

- Soufflerie:
- Pas de charge: 71 CV

- Pleine charge: 78 CV
- Rendement: 9 %

Le temps disponible entre l'arrêt et le démarrage peut être un facteur limitatif. Par exemple l'arrêt d'un équipement lié à la production ne peut pas être envisagé pour des périodes de 15 minutes. Les moteurs de moins de 20 CV sont conçus pour moins de six démarrages par heure. Pour des moteurs plus gros, le nombre de démarrages est plus faible. Toute l'économie peut être brusquement perdue si suite à des arrêts fréquents, les moteurs tombent en panne et doivent être remplacés. Néanmoins, c'est là un domaine d'économie qui reste: encore inexploité par de nombreuses usines.

1.2 Utiliser les équipements dans les conditions de charge normale

Un des moyens les plus simples permettant d'améliorer le rendement de fonctionnement d'un équipement c'est de l'utiliser en charge nominale. Toute machine admet un régime pour lequel son fonctionnement est le plus efficace. La raison en est qu'à tout équipement sont associées des pertes traduites par une consommation d'une quantité de puissance fixe indépendante de la charge: les frottements, la puissance du ventilateur, les pompes dans le système d'entraînement, la puissance de la pompe de lubrification. Ainsi, et dans la mesure du possible; il faut que chaque équipement soit utilisé à sa pleine charge et ce afin de maximiser le rendement. Dans les procédés discontinus, cela revient à l'amélioration des écoulements des fluides et la synchronisation afin de minimiser le temps de fonctionnement à vide des machines entre deux opérations. De la même façon, une usine peut fonctionner plus efficacement à pleine capacité qu'à capacité partielle.

1.3 Améliorer le procédé et la qualité de contrôle

Dans un grand nombre d'usines industrielles, le suivi du produit est laissé à l'expérience de l'opérateur sans aide d'aucun instrument d'analyse. L'utilisation d'instruments appropriés et le contrôle de processus grands consommateurs d'énergie, comme le broyage et le séchage, peuvent conduire à des économies d'énergie très substantielles. Dans un grand nombre d'opérations de séchage, le séchage au toucher conduit au degré zéro de séchage alors que dans les conditions de stockage le produit peut avoir une humidité de plusieurs pour-cents. Ainsi, l'énergie est gaspillée inutilement dans le séchage du produit.

Des pratiques tels qu'un broyage ou moulage excessif sont courantes: En effet, sans recours aux mesures soignées, beaucoup de compagnies surmoulent leurs produits afin de rester dans les normes de qualité exigée. Ceci augmente la consommation d'énergie. et peut engendrer davantage de pertes à cause des fines particules et des poussières dégagées. Un certain nombre de méthodes permettent de mesurer la distribution de la taille des particules sont disponibles. Elles vont des méthodes de triage et de filtrage jusqu'au contrôle continu ultra-rapide utilisant la diffraction optique et les microprocesseurs. Même les instruments sophistiqués peuvent parfois se révéler rentable.

1.4: Investir dans de nouveaux équipements rentables

Dans plusieurs usines, le remplacement des vieilles machines peut se justifier par les seules considérations d'économie d'énergie. Les progrès réalisés dans le domaine des pompes, des compresseurs, des moteurs et autres équipements d'exploitation n'ont pas seulement augmenté la capacité de production de ces machines, mais ils ont réduit leurs exigences en puissance. Dans plusieurs cas, l'investissement en installation d'équipements modernes

est amorti par les seules économies d'énergie qui en découle, en quelques mois ou quelques années. Les ingénieurs doivent évaluer l'état de leurs machines et envisager leur remplacement chaque fois que cela est justifié. **H** va de soi que le rendement d'une machine doit être évalué au moment de la sélection des nouveaux équipements.

Néanmoins, même avec les équipements existants on peut réaliser beaucoup d'actions pour • améliorer leur endettent avec un investissement réduit. •••

2. Les pompes

Le pompage est l'une des plus courantes applications de l'électricité aussi bien dans l'industrie qu'en génie civil et en agriculture. L'amélioration du rendement de fonctionnement des pompes peut avoir un grand effet sur la consommation d'énergie dans ces domaines.

Les principaux types de pompes sont: les pompes centrifuges, volumétriques rotatives et alternatives. La puissance développée par une pompe peut servir d'indication de la performance de celle-ci. C'est le produit de la hauteur manométrique totale par le débit massique du liquide. La puissance produite est donnée par la formule:

$$\text{Puissance produite (kW)} = 0,272 \times 10^{-5} \times \mathbf{H} \times \mathbf{Q} \times \mathbf{\delta}$$

avec: H: Hauteur dynamique totale Q:
débit en m³/h
δ: Masse volumique en kg/m³

La puissance consommée par la pompe est supérieure à la puissance produite à cause des pertes internes par fuites et par frottement. Le rendement de la pompe est défini comme:

$$R_p = \text{rendement de la pompe} = \text{Puissance produite} / \text{puissance consommée}$$

2.1 Réduire les pertes par frottement

D'après l'équation ci-dessus, la première action qui permet de réduire la puissance de pompage est la réduction de la hauteur dynamique. Celle-ci est la somme de la hauteur statique (pression et/ou élévation) à laquelle la pompe doit refouler, plus les pertes de charge dans les conduites et au niveau des raccords. Tandis que les conditions de refoulement sont d'habitude imposées par les exigences d'utilisation, les pertes de charge par frottement offrent certaine possibilité de réduction,

La contribution. des pertes par frottement à la hauteur totale est donnée par: $h =$

$$0,0827 \frac{FLQ^2}{D^5}$$

Avec: h: hauteur équivalente aux pertes de charge (m)
F: Coefficient de pertes de charge (dépend du type de conduite)
Q: débit volumétrique (m³/h)
D: diamètre de la conduite (m)
L: longueur de la conduite (m)

Cette dernière équation montre qu'un accroissement de 25% du diamètre de la conduite

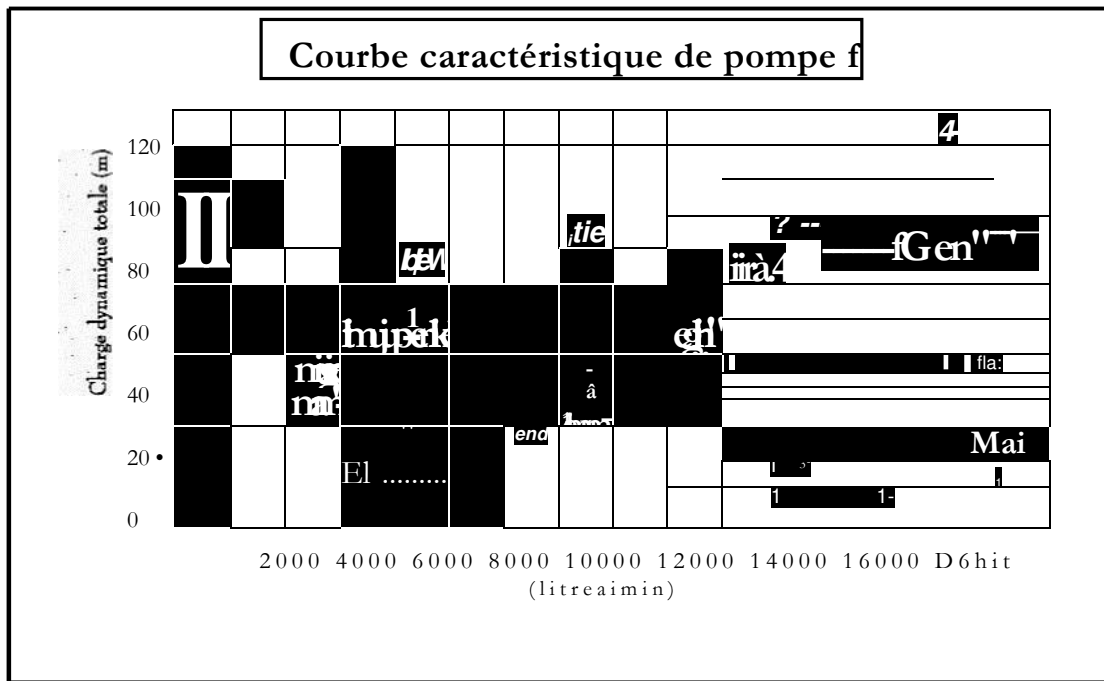
pourrait réduire les pertes de charge dans un rapport de 3. De même, une réduction de 5% du diamètre augmenterait ces pertes de 25%. Dans toute application où le dimensionnement interviendrait, ce paramètre ne doit pas être négligé. Lors de la conception de tout système de tuyauterie, on doit être conscient du compromis technico-économique à réaliser entre le diamètre et le coût de pompage,

2.2 Réduire le débit (pompes centrifuges)

Les pompes centrifuges sont les plus utilisées dans l'industrie. La réduction du débit d'écoulement est le moyen d'économie d'énergie qui est le plus courant et facile à identifier dans les applications de pompage. Comme dans le cas de beaucoup d'autres équipements, les pompes sont souvent surdimensionnées par rapport à leur utilisation. Dans d'autres cas, une évaluation attentive du procédé permet de déceler la possibilité d'une réduction substantielle du débit requis. La réduction de débit des pompes centrifuges offre beaucoup d'opportunités d'économies d'énergie.

2.3 Courbe caractéristique (H,Q)

Avant de discuter les différentes façon de réduire le débit, on doit d'abord revoir quelques caractéristiques des pompes centrifuges. Les courbes caractéristiques (hauteur, débit) de la pompe sont utilisées pour choisir les pompes centrifuges. A vitesse de rotation fixée, les pompes centrifuges sont caractérisées par une diminution de la hauteur et augmentation de la puissance quand le débit augmente comme le montre la figure suivante. Le point nominal de la pompe correspond au point où le maximum de rendement est atteint. Les lignes concentriques autour du point nominal sont des courbes d'iso-rendement.



Les formules qui déterminent la consommation d'énergie des pompes centrifuges connues sous le nom de formules de similitude, sont résumées ci-dessous:

$$Q_1 / Q_2 = N_1 / N_2$$
$$H_1 / H_2 = (N_1 / N_2)^2$$
$$P_1 / P_2 = (N_1 / N_2)^3$$

où N , Q , H et P_a représentent respectivement la vitesse de rotation, le débit, la hauteur manométrique totale et la puissance à l'arbre. Les indices 1 et 2 indiquent deux régimes de fonctionnement.

Supposons qu'avec ces informations de base, on désire réduire le débit de la pompe. Le régime actuel de la pompe a un débit de $10,6 \text{ m}^3/\text{mn}$, une hauteur de $20,4 \text{ m}$ et un rendement presque maximale de 78% (point A, sur la figure). Suite à un changement des conditions de l'installation, le débit requis peut être réduit à $6 \text{ m}^3/\text{mn}$. Dans ce qui suit, on étudie les mérites des différentes alternatives servant à réduire le débit.

2.4 Réduction du débit par fermeture de la vanne

Le moyen le plus simple et le plus courant permettant de réduire ou de régler le débit d'une pompe est d'utiliser une vanne. La fermeture partielle de la vanne entraîne une augmentation de la vitesse et produit ainsi une perte de charge ou hauteur artificielle. Ceci conduit au déplacement du point de fonctionnement sur la courbe caractéristique vers les hauteurs élevées. Le débit est diminué mais la hauteur a augmenté. Il en résulte une diminution de la puissance consommée qui reste relativement faible à cause des pertes causées par la vanne et que la pompe doit vaincre.

Le point de fonctionnement passe de A à B, comme le montre la figure, le débit passe à la valeur requise de $6 \text{ m}^3/\text{mn}$. La puissance consommée passe de 60 CV à 48 CV . Bien qu'on réalise une économie d'énergie de 20% , cette méthode de contrôle est plutôt inefficace: le rendement de la pompe ayant chuté de 78% à 70% , ce qui conduit à une dissipation d'énergie considérable au niveau de la vanne.

2.5 Réduction de débit par changement d'impulseur

Une autre méthode permettant de réduire le débit consiste à utiliser un impulseur plus petit. Pour répondre aux besoins très variés de pompage, les constructeurs produisent plusieurs impulseurs de différents diamètres et interchangeables sur un seul corps de pompe. La courbe caractéristique d'un impulseur de 28 cm de diamètre est aussi donnée sur la figure précédente. Si cet impulseur est utilisé à la place de l'impulseur de diamètre 38 cm un double avantage est réalisé: réduction en hauteur et en débit. La puissance consommée ne serait plus que de 30 CV environ (pointe).

L'utilisation d'un petit impulseur dans un grand corps de pompe a l'inconvénient de diminuer le rendement de la pompe, jusqu'à 67% dans ce cas. Cette valeur n'est pas très inférieure à celle obtenue avec la vanne, néanmoins l'économie d'énergie peut ne pas être significative.

2.6 Réduction du débit par diminution de la vitesse

Comme cela a été décrit précédemment, les lois des pompes montrent que le rapport des puissances consommées en deux points de fonctionnement est relié au rapport au cube des vitesses correspondantes. Le débit est aussi proportionnel à la vitesse de la pompe. Ainsi, toute réduction de débit aura pour effet une réduction au cube de la consommation de puissance. Par conséquent, l'option la plus efficace pour réduire le débit serait de diminuer

la vitesse de la pompe.

Continuant avec le même exemple déjà entamé ci-dessus, l'estimation suivante sur la consommation de puissance peut être calculée à l'aide des formules de similitude.

En faisant diminuer la vitesse, on trouve une puissance de l'ordre de **11 CV**.

La vitesse peut être variée de plusieurs manières, selon les conditions de pompage et l'automatisation s'il y a lieu. Des méthodes simples et semi-permanentes utilisent le changement de poulies de différents diamètres pour des entraînements à courroie ou le changement de moteurs pour abaisser la vitesse de l'appareil. La recherche accrue de la flexibilité a permis d'introduire l'utilisation des systèmes poulies-courroies à réglage **manuel**, des moteurs à deux vitesses et des systèmes d'entraînement électroniques variés à commande manuelle.

2.7 Résumé des méthodes de réduction de débit

Un résumé de l'exemple est présenté ci-dessous:

Comparaison des méthodes de réduction de débit

Conditions	Débit (lis)	Rendement Pompe en %	Puissance entrée (CV)	Puissance moteur (kW)
Dimensionnement initial (point A)	10,58	78	60	49
Vanne serrée (Point B)	6,05	70	48	39
Impulseur plus petit (point C)	6,05	67	29	24
Réduction de la vitesse	6,05		11	

Il est important de retenir, selon les résultats de cette table, que même la fermeture partielle de la vanne peut donner quelques économies. Ainsi, si on constate que le débit de la pompe peut être réduit, la vanne peut être utilisée comme moyen temporaire en attendant le changement d'impulseur ou la variation de vitesse.

2.8 Maintenance

Il y a plusieurs facteurs liés à la maintenance du circuit de pompage et qui affectent les économies d'énergie. Un programme de maintenance doit permettre la vérification de l'efficacité du système et proposer des recommandations de correction le cas échéant. Parmi les points à vérifier on peut citer:

- blocage partiel ou fermeture des vannes, des conduites et des pompes. Le nettoyage peut être nécessaire.
- usure des impulseurs et des corps de pompes qui conduit à l'augmentation du

jeu entre les parties fixes et mobiles, entraînant ainsi une chute de rendement. Le remplacement des roulements usés ou l'ajustement de la position de l'impulseur peuvent suffire à rétablir la valeur du rendement initial.

défaut d'assemblage qui entraîne la flexion de l'arbre. La consommation d'énergie peut augmenter de 5 % et l'usure de l'arbre se trouve grandement accélérée.

- mauvais réglage des commandes marche-arrêt pouvant donner lieu à des fonctionnements cycliques fréquents et entraînant un surplus de consommation d'énergie et l'usure du système de pompage.

3. Systèmes de variation de vitesse

Comme il a été signalé, le moyen le plus efficace pour varier le débit dans une pompe est celui de faire varier la vitesse de rotation. Tandis que les méthodes conventionnelles sont basées sur l'utilisation de changement de section pour contrôler l'écoulement, comme les vannes, elles restent cependant inefficaces et ne rapportent que peu d'économie d'énergie. Puisque la consommation de puissance dans les pompes, les ventilateurs et les compresseurs est proportionnelle au cube du débit et de la vitesse de rotation, donc même une légère variation du, débit peut avoir un grand effet sur la consommation de puissance lorsque la vitesse est diminuée.

Il existe une large gamme de systèmes de variation de vitesse, allant du système poulie-courroie, simple et réglable jusqu'au système électronique à microprocesseur le plus sophistiqué. Le domaine des systèmes d'entraînement à vitesse variable est vaste, et ces sections en donnent une introduction sommaire.

3.1 Systèmes mécaniques

Les systèmes mécaniques à variation de vitesse existent depuis longtemps. Ils sont robustes et fiables. Ils ont des plages de variation limitées, de faible rendement, et moins maniables que les nouveaux systèmes électroniques de variation de vitesse.

3.1.1 Système à poulie

Ce système est constitué d'un moteur électrique monté sur une base spéciale, une poulie de diamètre variable sur l'arbre du moteur et une poulie de diamètre fixe sur l'arbre de la charge; les deux poulies étant connectées par courroie trapézoïdale. Cette courroie montée sur la poulie, armée de ressort, de l'arbre moteur peut changer de position et de diamètre sur la poulie. On obtient ainsi, une variation du rapport des diamètres des deux poulies, ce qui donne une variation de vitesse. Ce système peut être utilisé pour des rapports de vitesse compris entre 2/1 et 3/1. L'inconvénient c'est la commande manuelle bien que plusieurs systèmes ont été adaptés pour la commande automatique.

3.1.2 Système d'entraînement hydraulique

Les systèmes d'entraînement hydrauliques utilisent d'habitude de l'huile naturelle ou synthétique pour la transmission de puissance. L'huile circule à travers des impulseurs à aubes montés sur les arbres d'entrée et de sortie. Les systèmes «entraînement hydrauliques ont une réponse rapide ainsi qu'une commande progressive de vitesse pouvant aller jusqu'au rapport 5/1. On peut les utiliser aussi bien dans le cas de couple constant ou variable. Leur

rendement varie de 90 % (pleine charge) à 60 % (demi charge).

3.1.3 Autres systèmes mécaniques

Les systèmes mécaniques d'entraînement à vitesse variable englobent aussi les transmissions par traction. Le rendement de transmission de ces systèmes est relativement élevé, entre 75 et 95 % dans la plupart des cas de charge. Ces systèmes d'entraînement sont généralement entraînés par un moteur asynchrone à vitesse constante, et cette vitesse se trouve à la sortie avec une variation progressive. Ces systèmes ne couvrent en général qu'une gamme limitée de puissance et de vitesse.

3.2 Systèmes électriques et électroniques

Cette catégorie englobe une grande diversité de systèmes allant de moteurs simples aux entraînements à onduleur à fréquence variable.

3.2.1 Moteurs à plusieurs vitesses

Les moteurs offrent l'opportunité d'économiser l'énergie quand il est possible de faire fonctionner le moteur à vitesse réduite. Un bon exemple de ceci est le ventilateur qui doit fonctionner de façon continue dont la sortie est modulée en fonction du débit d'air désiré.

La combinaison multi-vitesse la plus utilisée est celle à deux vitesses: simple et double. Le changement de vitesse s'effectue par un changement du branchement extérieur. Il y a trois types de machines à usage courant:

- couple variable,
- Couple constant,
- puissance mécanique constante.

Pour les moteurs à couple variable les couples de calage et de pleine charge varient avec la vitesse. Le couple et la puissance à mi-vitesse valent respectivement la moitié du couple et le quart de la puissance à vitesse maximale.

Pour les moteurs à couple constant, le couple de calage et le couple à pleine charge restent constants. La puissance à mi-vitesse est la moitié de la puissance à vitesse maximale. Les applications courantes de ces types de moteurs sont les convoyeurs, les pompes volumétriques rotatives et les compresseurs.

Les moteurs à puissance mécanique constante sont utilisés dans les machines outils, foreuses et applications similaires. Les moteurs à deux vitesses sont en général un bon compromis technico-économique pour les applications industriels indiquées en haut.

3.2.2 Moteurs à variation de nombre de pôles

Dans le but d'obtenir des rapports de vitesse autre que 1 et 2, les moteurs à variation de nombre de pôles sont utilisés. La variation du nombre de pôles d'un moteur est une technologie simple dans laquelle les branchements des bobines sont réorganisés pour produire un nombre différent de pôles. L'utilisation de deux ou plusieurs bobinages permet une flexibilité considérable dans le choix de la gamme de vitesse. En les comparant aux moteurs à deux bobinages, les moteurs à variation de nombre de pôles sont moins chers et

moins encombrants (ils ont la taille des moteurs à simple vitesse).

Un moteur à vitesse unique peut être remplacé par un moteur à variation de nombre de pôles si les conditions d'utilisation le permettent. Le gain technico-économique des moteurs multi-vitesse dans une application donnée dépend du prix d'électricité et de la durée annuelle de fonctionnement. L'économie croît avec la durée de fonctionnement à vitesse réduite.

3.2.3 Les entraînements à vitesse variable par courant de Foucault

Un système: d'entraînement à vitesse variable par courant de Foucault est constitué d'une unité d'entraînement à vitesse constante (moteur asynchrone), un accouplement à courant de Foucault et un système de commande de vitesse de la charge. Le couplage à courant de Foucault peut être soit une unité indépendante, soit une unité contenant dans le même boîtier un moteur d'entraînement et un accouplement à courant de Foucault. Le couplage à courant de Foucault est constitué d'organes d'entrée et sortie qui sont indépendants mécaniquement. L'organe de sortie tourne librement à l'intérieur de l'organe d'entrée. L'organe de sortie est un élément magnétique à bobinage excité par un courant continu. L'application du courant crée un flux à travers l'entrefer entre les deux organes qui génère des courants induits dans l'organe d'entrée. Le résultat est la création d'un couple à la sortie de l'arbre. Un changement du courant d'excitation fait changer le couple de sortie. Ainsi, en ajustant le courant d'excitation, la sortie peut être ajustée pour répondre aux exigences de vitesse de la charge entraînée.

3.2.4 Les entraînements à variation électronique de vitesse

Les entraînements à variation électronique de vitesse ont la possibilité de changer la fréquence (et donc la vitesse du moteur synchrone ou asynchrone) dans un rapport typique de 50 à 1. En plus de la régulation de vitesse, les variateurs électroniques de vitesse peuvent réaliser un démarrage doux ainsi qu'une protection efficace du moteur contre plusieurs types de défauts électriques.

La vitesse de synchronisme **d'un** moteur asynchrone s'exprime par:

$$N_s = 120 \times f / p$$

- avec: f: fréquence d'alimentation en hertz
 p: nombre de pôles du moteur
 Ns: vitesse de synchronisme en tr/mn

Pour un moteur à quatre pôles, la correspondance entre fréquence et vitesse en tr/mn est donnée par:

Fréquence (Hz)	Vitesse de synchronisme (Tr/mn)
120	3600
100	3000
50	1500
25	750
12,5	375

