

RÉPUBLIQUE DU SÉNÉGAL



ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE THIÈS

**PROJET  
DE  
FIN D'ÉTUDES**

GM.0278

NUM

**TITRE** Optimisation des installations électriques  
en tenant compte des coûts de construction  
et d'exploitation

**Auteur** Yakham NGOM

**Directeur** Pierre MARKON

**Co Directeur** \_\_\_\_\_

**Genie:** Mecanique

**Date:** Juin 1986

A ma Famille.

—  
17

# TABLE DES MATIERES

	Pages
Introduction :	
- chapitre A :	
<u>Optimisation du choix de la section des câbles</u>	3
Exemple	6
- chapitre B	
<u>Impact du choix de la section économique sur le mode de pose.</u>	
I Problématique	10
II Données de base	10
a) Calibre de la protection	10
b) Equations fondamentales	11
III Comment profiter de la "surdimension" de la section économique.	13
a)	
b) Exemple d'application	
1) Action sur la qualité de l'isolant	13
2) choix de la protection par fusible plutôt que par disjoncteur	15
3) Combinaison des deux possibilités.	17
IV Conclusion	18
- Chapitre C	
<u>Optimisation du choix des transformateurs</u>	
I Introduction	19
II Choix optimal du poste	19

a) Est-il optimal de choisir un transformateur de puissance maximale et un transformateur de moindre puissance pour la durée de consommation réduite de puissance?	21
b) Est-il optimal de faire fonctionner deux transformateurs de 215 kVA à la place d'un seul de 315 kVA pour un embalement de 200 kW?	22
c) Établissement des courbes de pertes en fonction de la charge	23
d) Commentaires sur les courbes	27

### - Chapitre D.

#### Compensation de l'énergie réactive.

I Introduction	31
1) Inconvénients d'un mauvais cosφ	31
2) Ce qu'il faut éviter en vue de ne pas provoquer des incrustations.	31
II Moyens de relèvement du cosφ	32
III Exemple comparatif des gains apportés par l'installation d'un petit transformateur ou par compensation de l'énergie réactive par batteries de condensateurs	33
IV Cas réel d'économie par compensation	37

### - Chapitre E

#### Économie d'énergie au niveau de l'éclairage

I Introduction	39
II Optimisation du choix de la source lumineuse	40
a) Vie optimale pour une lampe à incandescence	41
b) Influence des variations de tension sur les paramètres des lampes à incandescence	43
c) Les tubes fluorescents.	44
III Moyens d'améliorer le rendement global d'un système d'éclairage	44
IV Exemples pratiques :	
a) - par installation de lampes économiques	45

v)	Economie realisée à la STS au niveau de l'éclairage	45
c)	Optimisation de l'installation des lampes à incandescence	47
	- Chapitre F	
	<u>Moyens de diminuer le coût du kilowatt-heure.</u>	51
	<u>Pointe de démarrage.</u>	
I	Clauses de contrats	51
II	Moyens d'optimiser une installation électrique	
	1) Programmation	53
	2) Asservissement	54
	3) Matériel d'économie d'énergie	54
	- Chapitre G	
	<u>Optimisation du choix de la tension et du nombre de phases</u>	56
I	Introduction	56
II	Modèle de détermination de coûts	58
	1) Coût des lignes	58
	2) Coût des postes	59
III	Optimisation du transport d'énergie d'un point à un autre	60
	1) Optimisation de la ligne seule	61
	2) Optimisation de la section seule	61
	b) Optimisation de la tension (avec la section optimale)	61
	c) Optimisation des postes	62
	3) Optimisation du transport d'un point à un autre.	63
IV	Coût et Valeur de transport d'un point à un autre	65
	1) Valeur de transport optimisée	65
	2) Coût d'un transport à tension alternative imposée	67
V	Nombre de phases	68
	- Chapitre H	
	<u>Regulation par variation de vitesse des turbo-machines</u>	
I	Introduction	70
II	Caractéristiques de fonctionnement des turbo-machines	71
III	Moyens utilisés pour la variation de vitesse par moteur électrique	73
IV	Exemples d'application	74

Annexes:

	Pages
Annexe A	92
Annexe B	96
Annexe C	101
Annexe D	104

## Remerciements

Pour m'avoir pas une seule fois arrêté, tout au long de cette étude, de m'apporter brillamment et m'assurer une documentation riche, de multiples éclaircissements quant à l'élaboration de ce projet.

Monsieur Pierre Markon, professeur de circuits électriques, de machines électriques et d'installations électriques, m'oblige à lui exprimer ma profonde gratitude.

Sa disponibilité entière et ses riches suggestions ont grandement contribué à la réalisation de cette étude.

Mes remerciements vont également, à tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont apporté un quelconque soutien pour la réalisation de ce projet.

## Sommaire:

Deux cent soixante dix (270) heures de travail ont porté sur l'économie d'énergie électrique :

Le sujet intitulé "Optimisation des installations électriques en tenant compte des coûts d'installation et d'exploitation" constitue un essai de prise au compte plus poussée que d'habitude de l'aspect économique dans le dimensionnement des installations électriques.

L'étude sera divisée en huit (8) chapitres séparément traités dans la mesure où leur dépendance serait fonction de la spécificité de chaque installation étudiée, chaque chapitre incluant une partie théorique donnant l'essentiel des aspects techniques dont il faut tenir compte suivie d'un exemple décrivant une éventualité au sujet traité.

Les résultats obtenus sont presque toujours très positifs sans pour autant émaner d'hypothèses biaisées.

Et dans quelques cas tels que la compensation de l'énergie réactive ou l'économie d'énergie au niveau de l'éclairage, des cas réels effectués à la STS ou à la SSPT ont été exposés.



## Introduction :

L'énergie est une ressource indispensable au même titre que le capital, le personnel ou les matières premières. Ce n'est certes pas la préoccupation majeure des responsables, surtout si son coût ne représente qu'une faible part du chiffre d'affaire. Mais si l'on réfléchit aux conséquences qui pourraient avoir une rupture d'approvisionnement, ou un contingentement sévère, on se rend compte du caractère vital de cette ressource.

Optimiser une installation au plan énergétique n'est pas seulement gérer les dépenses relatives à celle-ci. Il faut en effet prendre en compte les conditions techniques d'utilisation à côté des aspects purement comptables.

L'optimum est une notion très relative variant dans le temps et dans l'espace, et selon les contraintes financières qui limitent le décideur,

ici, surtout en jeu dans la évaluation technico-économique des installations électriques. Trois données essentielles :

- le coût de l'énergie électrique (\*)
- la durée d'amortissement
- et le taux d'actualisation.

La première donnée varie d'un pays à l'autre, la seconde dépendant du jugement du décideur ou de la durée de vie de l'appareil et la troisième de la situation financière de l'entreprise gouvernée par les calculs.

Si l'on pousse avec lois mes réflexions, on aboutit à la considération de l'aspect transcendantale de l'efficacité;

(\*) Pour plus de rigueur, il faudrait raisonner avec le rapport entre le coût de l'énergie et la valeur des investissements supplémentaires du fonctionnement économique par rapport à celui purement technique.

on accepte donc aisément que l'absence de l'efficacité n'est pas philosophique, mais il reste vrai que refuser de ne pas optimiser se qui offre une possibilité plus ou moins immédiate de le faire constituer un refus de progrès, de la bonne marche des choses.

Il s'agit de tenter, dans cette étude, de trouver des moyens de rendre les installations le "plus optimal" possible; ceci par un approche technico-économique.

Tout au long de l'aspect synergetique que doit prendre toute approche rigoureuse visant à améliorer un système de composants non indépendants, mais nous avons choisi d'approcher le sujet de manière relativement marginale en divisant l'étude en chapitres séparés parce que considérant que tout utilisateur de ce présent document aura devant lui certaines spécificités d'une installation donnée qui guideront ses réflexions et ses recherches dans le but d'économiser de l'énergie.

Ainsi, le développement sera divisé en huit(8) points essentiels qui sont:

- l'optimisation du choix de la section des câbles
- l'impact du choix de la section économique sur le mode de pose
- l'optimisation du choix des transformateurs
- la compensation de l'énergie réactive
- l'économie d'énergie au niveau de l'éclairage
- des moyens de diminuer le coût de kilowatt-heure - Pointe de démarrage
- optimisation du choix de la tension et du nombre de phases
- Régulation par variation de vitesse des turbomachines.

## A. OPTIMISATION DU CHOIX DE LA SECTION DES CABLES

Il est évident que la manière la plus rationnelle de transporter l'énergie électrique d'un point à un autre est de choisir la section de câble la plus petite possible, tenant compte des contraintes fondamentales qui sont la valeur de l'intensité du courant transporté, celle du courant de court-circuit, de la chute de tension et de la température admissible dans le câble.

Il s'agit là, de tenter de prouver que ce rationalisme, consistant à, amoindrir au maximum les surcoûts inhérents lors de l'installation du réseau de transport ne conduit pourtant pas nécessairement à l'optimalité de ce dernier ;

En effet, les pertes par effet Joule qui sont de loin prépondérantes sur toutes les autres pertes sont directement proportionnelles à la résistance du câble donc inversement proportionnelles à sa section, d'où la maximisation des pertes par effet Joule par minimisation de la section de câble.

Il nous faut donc trouver le nécessaire compromis technico-économique entre l'investissement sur les conducteurs électriques et la valeur des pertes d'énergie ;

L'équation (dont la preuve est en Annexe A) nous permettant d'établir ce compromis est la suivante :

- Soit  $S$  la section économique du câble
- $W$  le montant des pertes Joule annuel

- $e$  le prix de l'énergie électrique (F. CFA / kWh)
- $\eta$  le nombre de conducteurs, actifs dans la liaison
- $\rho$  la résistivité du métal à la température de service en  $\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{km}$
- $l$  longueur de la liaison en km.
- $I$  intensité, à liasiter
- $H$  nombre d'heure de service annuel

Si le régime est variable, la valeur de l'intensité peut être prise égale, à la valeur de moyenne quadratique soit  $I = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n I_i^2 t_i}}{\sum_{i=1}^n t_i} \gg$

- $A$  : constante d'actualisation

$$A = \frac{(1+t)^N - 1}{t(1+t)^N}$$

$t$  : taux d'amortissement

$N$  : nombre d'années d'amortissement

- $G$  : constante à déterminer (fonc. de variation du prix de câble vis à vis de la section)

$$S_e = I \sqrt{\frac{\rho e \cdot \eta \cdot H \cdot A \cdot 10^3}{G}}$$

En regroupant les termes constants, on aboutit à la formule simplifiée :

$$S_e = K \cdot I \sqrt{A \cdot e \cdot H} \quad \text{avec} \quad K = \sqrt{\frac{\rho \eta \cdot 10^3}{G}}$$

### Avantages de la section économique:

- 1) La température limitée en régime normal offre des possibilités de surcharge parfois importantes (densité de courant économique supérieure à la densité de courant technique);
- 2) Possibilité de choisir la protection du câble par coupe circuit à fusible sans pour autant déclasser éventuellement l'intensité du courant;
- 3) La chute de tension faible constitue un intérêt particulier pour les couples des moteurs au démarrage, qui sont proportionnels au carré de la tension;
- 4) La faible impédance des câbles économiques constitue un avantage pour la stabilité d'un moteur; en effet  $P_{max} = EU/Z$   $Z$  incluant l'impédance de la ligne;
- 5) Choix économique entre plusieurs isolants. En effet l'emploi d'un isolant autorisant une température de fonctionnement élevée peut se révéler nécessaire dans certaines conditions de services sévères mais n'est pas toujours économiquement justifié;
- 6) Choix économique entre l'Aluminium et le Cuivre;
- 7) Possibilité de détermination de la durée au bout de laquelle le gain sur les coûts d'exploitation permet de compenser la différence d'investissement entre les câbles à section économique et à section technique.

### Exemple de calcul de la section économique:

2) Objectif: Détermination selon la valeur de l'intensité transmise et la longueur du câble, le gain apporté par la section économique, en se fixant une durée et un taux d'amortissement donnés.

Il s'agit donc d'établir un tableau donnant la section technique, la section économique et le gain en énergie et en Francs CFA.

#### 2.7 Solution du problème:

Soit donc un circuit triphasé faisant transporter une intensité  $I_s = 250 \text{ A}$  sur une longueur de  $80 \text{ m}$ . Le nombre d'heures de service étant de  $4000 \text{ h/an}$ . Le coût du kWh étant fixé à  $c = 70 \text{ FCFA/kWh}$ .

$$S_{ec} = K I_s \sqrt{A e H} \quad , \text{ avec } K = \sqrt{\frac{12 \cdot 10^{-3}}{G}}$$

- Détermination de  $G$

$$G = \frac{P_2 - P_1}{S_2 - S_1} = \frac{[4320 - 2850] \cdot 10^3}{4216 - 4210} = 61,25 \cdot 10^3$$

les  $P_i$  étant les frais des câbles en FCFA/km, et  $S_i$  les sections des câbles en  $\text{mm}^2$ .

- Détermination de  $K$ .

$$K = \sqrt{\frac{4 \times 17,24 \cdot 10^{-3}}{61,25 \cdot 10^3}} = 1,06 \cdot 10^{-3}$$

- Détermination de la section économique pour une durée d'amortissement de  $N$  années.

$$S_{en} = K I_s \sqrt{A_n r t} \quad , \text{ avec } A_n = \frac{(1+10\%)^N - 1}{10\% (1+10\%)}$$

par exemple pour  $N = 20$  ans

$$A_n = \frac{1,1^2 - 1}{0,1 \times 1,1} = 1,91$$

$$S_{e2} = 1,06 \cdot 10^{-3} \times 250 \times \sqrt{1,91 \times 70 \times 4000} = 194 \text{ mm}^2$$

$$\text{Normalisation : } S_{e2} = 185 \text{ mm}^2$$

### - Determination du gain

$$\begin{aligned} \text{Perte annuelle : } W &= R I^2 t \\ &= f \frac{1}{3} I^2 t \end{aligned}$$

Nb: la section techniquement nécessaire était de  $70 \text{ mm}^2$   
(pour câble en Cuivre avec isolant en PVC)

Les pertes dans ce cas sont donc

$$W_H = f \frac{1}{3} I_s^2 t = 17,24 \times \frac{80 \cdot 10^{-3}}{70} \times 250^2 \times 4000$$

$$W_H = 4925714 \text{ Wh soit } 4926 \text{ kWh}$$

• Pour la section économique  $S_{e2}$  :

$$W_{S_{e2}} = f \frac{1}{3} I_s^2 t = W_H \left( \frac{S_H}{S_{e2}} \right)$$

$$W_{S_{e2}} = 4926 \times \frac{70}{185} = 1864 \text{ kWh}$$

Le tableau ci dessous donne les résultats pour différentes durées d'amortissement.

Le gain apporté par le choix de la section économique est  
 $W_H - W_{S_{e2}}$

$$\begin{aligned} \text{Par ex: Pour } S_{e2} : \text{ Gain} &= 4926 - 1864 = 3062 \text{ kWh} \\ &\text{soit } 214540 \text{ F.CFA/an.} \end{aligned}$$

Durée d'amortissement	2 ans	4 ans	6 ans	8 ans	10 ans	12 ans
Section technique [mm <sup>2</sup> ]	70	70	70	70	70	70
Section économique [mm <sup>2</sup> ]	195	300	2 x 185*	3 x 150*	2 x 240*	2 x 300*
Gain en KWH/an	3082	3777	3994	4160	4208	4351
Gain en FCFA/an**	214340	264390	279500	291200	294560	304570

\* Dans le souci de ne pas dépasser une certaine grosseur de câble, nous avons préféré doubler ou tripler le nombre de câble.

Nb: Ceci n'est que théorique, car il est évident qu'en pratique un électricien est souvent hésitant devant une telle solution.

\*\* Les Gains annuels sont en valeurs non actualisées.



- Ce chapitre est principalement inspiré de :

• Catalogue SILEC

• Catalogue MERLIN GERIN

## B. IMPACT DU CHOIX DE LA SECTION ECONOMIQUE SUR LE MODE DE POSE

### I Problematique :

Les facteurs principaux influençant le comportement des câbles lors de la pose sont la transmission de chaleur et la disposition relative des conducteurs les uns par rapport aux autres.

En effet, l'effet de proximité constitue d'un part, un facteur d'échauffement mutuel et d'autre part, un facteur perturbateur de l'équilibre de la répartition de densité de courant au niveau des câbles (et ceci mutuellement).

Il s'agit donc de voir comment le choix de la section économique qui, ou techniquement, pourrait être considéré comme une sorte de surdimensionnement du câble, pourrait être exploité afin de rendre moins contraignant le mode de pose choisis, ou au delà, tenter d'économiser sur la qualité du câble (isolation), ou sur le type de protection du câble contre les intempéries.

### II Données de base :

#### a) Calibre de la protection :

Les protections (fouilles, dispositifs) sont caractérisées par des zones de fonctionnement plutôt que par des courbes, - avec les variations des temps de fonctionnement (tolérances de fabrication et influence de la température).

Elles imposent donc aux constructeurs de garantir deux (2) valeurs :

- un courant de non fonctionnement  $I_{nf}$ , pour lequel l'appareil ne doit pas couper au bout d'une heure ;
- un courant de fonctionnement  $I_2$ , pour lequel l'appareil doit couper au bout d'une heure, ou moins.

Le courant nominal de la protection  $I_n$  est inférieur à ces deux valeurs et pour un fusible on a  $I_2 = 1,5 \text{ à } 1,9 I_n$  tandis que pour un disjoncteur  $I_2 \leq 1,44 I_n$ .

$I_2$  étant la valeur de l'intensité du courant défectueux (c'est à dire en tenant compte des écarts par rapport aux conditions optimales de dimensionnement des câbles), la norme a pris

$$I_2 \leq 1,45 I_n$$

Pour tenir compte du fait que  $I_2 > 1,45 I_n$  pour les fusibles, les câbles protégés par fusibles sont surdimensionnés par rapport à ceux protégés par disjoncteurs.

### b) Equations fondamentales

- Le rapport de l'intensité admissible pour un câble  $I_{ad}$  et tout autre intensité  $I$  est donné par :

$$\textcircled{1} \quad \frac{I}{I_{ad}} = \sqrt{\frac{\theta - \theta_0}{\theta_{th} - \theta_0} \cdot \frac{1 + \alpha_{\theta}(\theta_{th} - \theta)}{1 + \alpha_{\theta}(\theta - \theta_0)}}$$

- La température d'équilibre atteinte par le câble par lequel on fait passer  $I$  est :

$$\textcircled{2} \quad \theta = \theta_0 + \left(\frac{I_{ad}}{I}\right)^2 \cdot (\theta_{th} - \theta_0)$$

$\theta_0$  étant la température ambiante

$\theta_{th}$  la température d'équilibre du câble techniquement dimensionné.

- L'équation (1) est tirée du catalogue SILEC Département câbles électriques, Page 137

- Preuve de la formule (2)

À l'équilibre thermique, la quantité d'énergie acquise par le fil  $w = RI^2t$  est égale à la quantité de chaleur cédée au milieu ambiant  $w' = hA(\theta_p - \theta_0)$

$R$  étant la résistance du conducteur

$h$  la conductivité thermique

$A$  la surface d'échange de chaleur

$I$  l'intensité courante

$t$  le temps.

$\theta_0$  la température ambiante

- Pour la section économique  $R_{ec} I^2 t = h A_{ec} (\theta_{p_{ec}} - \theta_0)$  (a)

- Pour la section technique  $R_{te} I^2 t = h A_{te} (\theta_{p_{te}} - \theta_0)$  (b)

$$\frac{(b)}{(a)} \Rightarrow \frac{R_{te}}{R_{ec}} = \frac{A_{te}}{A_{ec}} \frac{\theta_{p_{te}} - \theta_0}{\theta_{p_{ec}} - \theta_0}$$

$$\text{ou } \alpha : \frac{I_{te}}{I_{ec}} = \frac{A_{ec}}{A_{te}} \frac{\theta_{p_{ec}} - \theta_0}{\theta_{p_{te}} - \theta_0}$$

$$\Rightarrow \frac{dI_{te}}{dI_{ec}} = \frac{dI_{ec}}{dI_{te}} \frac{\theta_{p_{ec}} - \theta_0}{\theta_{p_{te}} - \theta_0}$$

$$\Rightarrow \left( \frac{dI_{te}}{dI_{ec}} \right)^3 = \frac{\theta_{p_{ec}} - \theta_0}{\theta_{p_{te}} - \theta_0}$$

$$\Rightarrow \theta_{p_{ec}} = \theta_0 + \left( \frac{dI_{te}}{dI_{ec}} \right)^3 (\theta_{p_{te}} - \theta_0)$$

$$\text{Soit } \theta_{p_{ec}} = \theta_0 + \left( \frac{I_{te}}{I_{ec}} \right)^{3/2} (\theta_{p_{te}} - \theta_0)$$

$$\text{avec } \begin{cases} R = \int \frac{L}{S} \\ S = \pi d^2/4 \\ A = \pi dL \end{cases}$$

### III Comment profiter de la "surdimension" de la section économique:

a) Dans les cas où la section économique est supérieure à celle technique, la densité de courant techniquement admissible est supérieure à la densité économique.

Ainsi, dans le cas où la qualité de l'isolant est mesurable par la température maximale qu'il peut atteindre sans risquer un vieillissement prématuré, nous pouvons exploiter ce facteur de plusieurs manières:

- Soit en diminuant la qualité de l'isolant du câble;
- Soit en choisissant de protéger le câble par coupe-circuit à fusibles en ne respectant pas rigoureusement les normes établies en exploitant le rapport  $I/I_{lim}$  de sorte à choisir la protection par coupe-circuit à fusibles sans pour autant dépasser l'intensité de courant en plus de, comme elle aurait été faite en protégeant le câble par un disjoncteur;
- Soit en combinant ces deux (2) possibilités précédentes.
- Ainsi, nous nous voyons offrir une plus grande marge de manœuvre au niveau de la manière de disposer les câbles de nos à côté des autres.

#### b) Exemple d'application

##### 1) Action sur la qualité de l'isolant:

On sait que la température maximale admissible est de  $70^{\circ}\text{C}$  pour le PEV et  $85^{\circ}\text{C}$  pour le PRC (soyez permanent).

On peut donc, par l'application de l'équation (2) déduire le sens de la valeur de la section économique à partir duquel on peut passer d'un câble protégé en PRC à un câble

protège au PCV sans risque d'échauffement préjudiciable.

Ensuite faut-il vérifier la tenue du câble au cas de court-circuit en cherchant si le rapport des sections économique et technique, qui est l'inverse de celui des densités de courant est compatible avec le rapport des densités admissibles de courant pour les isolants PRC et PCV.

$$\text{Pour le PCV} \quad \Delta\theta_{max} = 70^\circ - 20^\circ = 50^\circ\text{C}$$

$$\text{Pour le PRC} \quad \Delta\theta_{max} = 85^\circ - 20^\circ = 65^\circ\text{C}$$

Le câble de section économique atteint  $\theta_{ecmax}$  lorsque traversé par l'intensité de courant qui élèverait la température du câble de section technique jusqu'à  $\theta_{thmax}$  tel que  $\Delta\theta_{thmax}$  soit égal, ou plus, à  $\Delta\theta_{ecmax}$  de l'isolant (soit ici  $65^\circ\text{C}$ ).

L'équation (2) donne la valeur de  $\theta_{ecmax}$ , donc de  $\Delta\theta_{ecmax}$

$$\Delta\theta_{ecmax} = \theta_{ecmax} - \theta_0 = \left(\frac{S_{th}}{S_{ec}}\right)^{1/2} \Delta\theta_{thmax}$$

avec pour pouvoir passer du PRC au PCV, il faut que :

$$\Delta\theta_{ecmax} \geq \left(\frac{S_{th}}{S_{ec}}\right)^{1/2} \Delta\theta_{thmax} \Leftrightarrow \left(\frac{S_{ec}}{S_{th}}\right)^{1/2} \geq \frac{\Delta\theta_{thmax}}{\Delta\theta_{ecmax}}$$

$$\text{ici} \quad \left(\frac{S_{ec}}{S_{th}}\right)^{1/2} \geq \frac{65}{50} \quad (\Leftrightarrow) \quad \frac{S_{ec}}{S_{th}} \geq \left(\frac{65}{50}\right)^2 = 1,19$$

Une fois que la section économique atteint 119% de la section technique, on peut passer de l'isolant PRC à l'isolant PVC.

• Vérification de la tenue du câble en court-circuit :

Soit  $K$  la valeur de la densité de courant admissible pendant au plus une seconde.

Pour le PVC  $k = 115$  (conducteur en cuivre)

Pour le PRC  $k' = 135$  (conducteur en cuivre)

$$\text{Il faut que } \frac{Sec}{Ste} \geq \frac{k'}{k} = \frac{135}{115} = 1,17$$

Ce qui était déjà vérifié. ( $Sec \geq 119\% Ste$ ) en régime permanent.

## 27) Choix de la protection par fusible plutôt que par disjoncteur :

Pour nous rappeler ce que nous avons vu en II que le rapport entre la valeur nominale de l'intensité du courant et sa valeur de fonctionnement effective est plus grand pour un fusible que pour un disjoncteur ; ce qui a conduit pour le choix des sections de câble, à protéger par fusible, à une certaine majoration pour tenir compte de ce fait ;

Ainsi, les normes fixent des valeurs d'intensité déclarée  $I_z$  plus grande pour les protections par fusible que pour celles par disjoncteur

$I_z f$  est l'intensité déclarée admissible pour le câble protégé par fusible et  $I_z d$  pour celui protégé par disjoncteur.

$$\text{On a } I_z f \geq k I_z d \text{ avec } k = \frac{k_2}{1,45}$$

$$k_2 = 1,9 \text{ si } I_n < 10 \text{ A}$$

$$k_2 = 1,75 \text{ si } 10 \leq I_n \leq 25 \text{ A}$$

$$k_2 = 1,6 \text{ si } I_n > 25 \text{ A}$$

$k$  allant donc de 1,10 à 1,31.

Il s'agit donc de faire le raisonnement suivant :

Si la section économique est telle que le câble puisse supporter sans préjudice une intensité  $I_{ec}$  telle que le rapport  $\frac{I_{ec}}{I_{th}}$  soit supérieur à  $K$ , alors le câble de section économique protégé par fusible pourrait être choisi comme s'il avait été calculé pour être protégé par disjoncteur.

Dans la section économique étant fixée, il suffit de vérifier que  $\frac{I_{ec}}{I_{th}} \geq K$ ; pour cela, il suffit de calculer la température atteinte par le câble étant traversé par  $I_{th}$ .

$$\text{Soit } \theta_{ec} = \theta_0 + \left(\frac{S_{th}}{S_{ec}}\right)^{3/2} \Delta\theta_{th}$$

Puis la remarquer que  $I_{ec}$  est la valeur de l'intensité qui donnerait au câble l'échauffement qui lui ferait atteindre  $\theta_{th}$  et que  $\theta_{ec}$  est celui atteint par le câble par transport de  $I_{th}$ ;

Donc tout revient à donner à  $I_{th}$  la place de  $I_{ec}$  et à  $I_{ec}$  celle de  $I_{th}$  dans l'équation (1) (restituée à (2))

$$\text{d'où } \frac{I_{ec}}{I_{th}} = \sqrt{\frac{\Delta\theta_{th}}{\Delta\theta_{ec}} \frac{1 + \alpha_{20} \Delta\theta_{ec}}{1 + \alpha_{20} \Delta\theta_{th}}} = \sqrt{\left(\frac{S_{ec}}{S_{th}}\right)^{3/2} \frac{1 + \alpha_{20} \Delta\theta_{ec}}{1 + \alpha_{20} \Delta\theta_{th}}}$$

Par exemple pour un fusible d'intensité de réglage  $I_n > 25A$  ( $K = \frac{1,9}{1,42} = 1,31$ ) protégeant un câble isolé en PVC

$$\text{on a : } \Delta\theta_{max} = 50^\circ C (= \Delta\theta_{thmax})$$

$$\left(\frac{I_{ec}}{I_{th}}\right)^2 = \left(\frac{S_{ec}}{S_{th}}\right)^{3/2} \times \frac{1 + 3,93 \cdot 10^{-3} \times 50 \times \left(\frac{S_{th}}{S_{ec}}\right)^{3/2}}{1 + 3,93 \cdot 10^{-3} \times 50} \geq K^2 = 1,7161$$

$$\text{Posant } \left(\frac{S_{ec}}{S_{th}}\right)^{3/2} = x, \text{ on obtient}$$



$$x \left( 1 + \frac{0,1965}{x} \right) \geq 1,1965 \times 1,7161 = 2,053$$

$$\Leftrightarrow x \geq 1,85$$

$$\text{Si } \frac{S_{ec}}{S_{te}} \geq (1,86)^{\frac{2}{3}} = 1,51$$

On peut donc conclure que dès que la valeur de la section économique atteint 151% fois celle de la section technique, on peut protéger le câble par coupe-circuit à fusibles sans tenir compte des migrations de la norme (qui sont déjà effectuées par le choix de la section économique).

### 37 Combinaison des deux possibilités:

Pour pouvoir à la fois passer d'un câble en PVC à un câble en PVC et le protéger indifféremment par fusible, il faut que la condition suivante soit satisfaite :

$$\frac{S_{ec}}{S_{te}} \geq 1,19 \times 1,51 \approx 1,80$$

Donc dès que la section économique atteint 1,8 fois la section technique, on peut protéger indifféremment le câble par fusible plutôt que par disjoncteur et en même temps passer de l'isolant PVC à l'isolant PVC.

#### IV Conclusion:

Les différents moyens d'agir sur le choix du type de câble et de son mode de protection font penser que le fait d'augmenter la section technique de câble pourrait ne pas aboutir à un investissement supplémentaire tel que prévu par le modèle établi pour dimensionner la section économique dans la mesure où, outre la baisse de la qualité du type d'isolant que la protection par fusible plutôt que par disjoncteur ou même la possibilité plus grande de rapprochement des conducteurs lors de l'installation offrent autant de possibilités immédiates de récupération de F.C.F.A.

On est porté à croire que les progrès réalisés sur les types d'isolant qui entraînent le renchérissement de certains types de câbles pour se même temps élèver le taux de pertes au niveau des conducteurs, militent dans le sens d'un gaspillage d'énergie non justifié pour le pays comme le Sénégal où le coût de l'énergie est relativement élevé.

---

Ce chapitre est principalement inspiré de:

- Cahier technique - NERLIN GERIN
- Catalogue SILEC
- Note de cours EPT. ELEC 4.21

## C. OPTIMISATION DU CHOIX DES TRANSFORMATEURS

### I Introduction:

Les compagnies de distribution d'électricité, dans le but de minimiser les pertes lors du transport de cette énergie électrique, élèvent la tension; en effet les pertes Joule sont proportionnelles au carré de l'intensité donc inversement proportionnelles au carré de la tension ( $P = UI \cos \phi$ );

Ainsi ont-elles besoin, en avant de chaque ligne d'énergie, d'un transformateur élévateur de tension.

De la même manière, les usines utilisatrices de cette énergie ont un besoin optimal lié à leur installation, d'où, pour elles aussi, la nécessité de se munir d'un transformateur abaisseur de tension.

Le choix de la tension optimale pour l'usine est bien sûr lié à la taille des différents moteurs composant son installation et à son implantation même. (longueur des lignes, section des conducteurs, etc...)

Plus alors donc, à partir d'exemples concrets, voir comment la taille du transformateur peut influencer sur le rendement global de l'installation d'une part et sur la tarification de l'énergie d'autre part; et, au vue de faciliter ce mode de raisonnement, établir des courbes donnant, pour différentes tailles de transformateur, les pertes active et réactive en fonction du facteur de charge.

### II Choix optimal du poste:

Le choix d'un transformateur, comme pour tout autre machine,

doit être effectué de sorte à le faire fonctionner à son rendement maximal.

Une manière purement rationnelle de dimensionner ou transformer ceux serait de le choisir de sorte que le cycle de fonctionnement soit tel que les pertes Joule égalent les pertes fer ;  
Mais ce choix n'est pourtant pas forcément le plus optimal ; aussi, ne maîtrise-t-on pas tous les paramètres de construction afin de pouvoir éventuellement choisir.

Pour des questions de fiabilité du système de distribution, il faut s'avérer nécessaire de choisir par exemple deux (2) transformateurs en parallèle à la place d'un seul pour les faire fonctionner à demi ou trois quart de charge ; ce mode d'alimentation permet de se rapprocher du rendement maximal des transformateurs qui est atteint dans cette plage de facteur de charge ( $\frac{1}{2}$  -  $\frac{3}{4}$  de la charge maximale).

Il faut souligner que si l'important, dans l'optimisation du poste de transformation, ne réside pas dans la recherche du rendement maximal des transformateurs, mais plutôt dans celle d'amoindrir au maximum les pertes surtout de puissance active que réactive, dans la mesure où le comptage haute tension tient en considération les pertes de puissance réactives au niveau du transformateur.

Nous allons, à partir d'exemples, tenter de montrer les économies qui peuvent être réalisées surtout en puissance active que réactive par :

- le fonctionnement intermittent de deux transformateurs de différentes tailles.

- le fonctionnement en parallèle de transformateurs de même taille plutôt qu'un seul de cette même grandeur pour une puissance demandée double.

a) Est-il optimal de choisir un transformateur de puissance maximale et un transformateur de moindre puissance pour les heures de consommation réduite de puissance ?

Soit une installation consommant 1000 KVA à pleine charge et 100 KVA pendant les heures de consommation réduite.

Évaluons les pertes en puissance active et réactive de ces 2 transformateurs (le transformateur de 1000 KVA fonctionne deux à 10% de sa charge maximale tandis que celui de 100 KVA fonctionne à pleine charge).

- Transfo de 100 KVA. (type BERLIN GERIN)

$$m = 100\% \rightarrow P_{cu} = 2,07 \text{ kW}$$

$$P_f = 6,1 \text{ KVAR}$$

- Transfo de 1000 KVA. (type BERLIN GERIN)

• Perte active à vide  $P_{cuV} = 2,3 \text{ kW}$

Perte active à 10% de charge  $P_{cu10\%} = P_{cuV} + \left(\frac{1}{10}\right)^2 P_{cuT}$

$$P_{cu10\%} = 2,3 + \left(\frac{1}{10}\right)^2 \times 12,1 = 2,42 \text{ kW}$$

• Perte de puissance réactive :

Soit étant la puissance apparente consommée à vide

$$P_{fv} \text{ Perte réactive à vide } P_{fv} = \sqrt{S_v^2 - P_{cuV}^2}$$

courant à vide  $I_0 = 2,4\% I_n$  ;  $I_n$  courant à pleine charge.

$$I_0 = \frac{1000 \cdot 10^3}{400 \sqrt{3}} = 1443 \text{ A}$$

$$I_0 = 2,4\% \times 1443 \text{ A} = 34,6 \text{ A}$$

$$S_v = 400\sqrt{3} \times I_0 = 400\sqrt{3} \times 2,4\% \times \frac{1000 \cdot 10^3}{400\sqrt{3}} = 2,4\% \times 1000 \cdot 10^3$$

$$S_v = 24 \text{ KVA}$$

$$\text{d'où } P_{F_v} = \sqrt{24^2 - 2,3^2} = 23,89 \text{ KVAR}$$

$$\text{Perte réactive de 10\% de charge } P_{F_{10\%}} = (P_{F_T} - P_{F_v}) \times \left(\frac{1}{10}\right)^2 + P_{F_v}$$

$$P_{F_{10\%}} = 23,89 + (72,5 - 23,89) \times \left(\frac{1}{10}\right)^2 = 24,4 \text{ KVAR}$$

d'où l'économie réalisée de :

$$\text{- En puissance active } P = 2,42 - 2,07 = 0,35 \text{ KW}$$

$$\text{- En puissance réactive } Q = 24,4 - 6,1 = 18,3 \text{ KVAR}$$

b) Est-il optimal de faire fonctionner 2 transformateurs de 215 KVA à la place d'un seul de 315 KVA pour une consommation de 200 KW ?

$$\text{- } P_{Cu_v} = 0,77 \text{ KW}$$

$$\text{- } P_{Cu_{2/3}} = 0,77 + \left(\frac{2}{3}\right)^2 \times 3,9 = 2,5 \text{ KW}$$

$$\text{- } P_{Cu_{1/3}} = 0,77 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 \times 3,9 = 1,2 \text{ KW}$$

$$\text{- } S_v = 6,3 \text{ KVA}$$

$$\text{- } P_{F_v} = \sqrt{6,3^2 - 0,77^2} = 6,25 \text{ KVAR}$$

$$\text{- } P_{F_{2/3}} = 6,25 + (18,3 - 6,25) \times \left(\frac{2}{3}\right)^2 = 11,6 \text{ KVAR}$$

$$P_{F_{1/3}} = 6,25 + (18,3 - 6,25) \times \left(\frac{1}{3}\right)^2 = 7,6 \text{ KVAR}$$

On voit que l'on gagne en puissance active par en perdre en réactive en faisant fonctionner les 2 transformateurs en parallèle mais de manière presque insignifiante.

Gain en puissance active :  $P = 2,5 - 1,2 \times 2 = 0,1 \text{ kW}$

Perte en puissance réactive :  $Q = 2 \times 7,6 - 11,6 = 3,6 \text{ kVAR}$

c) Établissement des courbes de pertes en fonction de la charge :

1) But : Faciliter la détermination des pertes actives et réactives selon la taille du transformateur et son facteur de charge ; ce, dans le but de décider de l'opportunité d'investir ou non en un petit transformateur pour la heures à consommation réduite par exemple.

2) Méthode :

• Considération : Le facteur de charge influe sur l'échauffement, donc sur la valeur de la résistance d'enroulement où sont enregistrées les pertes cuivre.

En effet, pour 2 charges  $P_1$  et  $P_2$ , la résistance des enroulements prend respectivement les valeurs  $R_1$  et  $R_2$  compte tenu des échauffements différents car liés aux charges  $P_1$  et  $P_2$ .

(A l'équilibre thermique  $\Delta \theta \propto I^2$ , par ailleurs  $I$  est proportionnel au facteur de charge  $n$ , d'où  $\Delta \theta \propto n^2$ )

Soit  $Q_0, P_0$  : les pertes à vide réactives respectivement actives

$Q_n, P_n$  : les pertes au facteur de charge  $n$  réactives respectivement actives

$Q_n, P_n$  : les pertes totales au facteur de charge  $n$ .

La variation de la résistance avec la température étant donnée par :

$$R = R_0 \frac{t + 234,5}{T + 234,5} \quad t, T \text{ en degrés centigrades.}$$

$R$  étant la résistance correspondant à la température  $t$ ,  $R_0$  celle

correspondant à la température ambiante  $T$

Le rapport de pertes cuivre liées aux charges  $P_1$  et  $P_2$  est donc :

$$\frac{P_{cu1}}{P_{cu2}} = \frac{R_1 I_1^2}{R_2 I_2^2} = R_0 \frac{234,5 + \theta_{f1}}{234,5 + \theta_0} \times \frac{234,5 + \theta_0}{234,5 + \theta_{f2}} \times \frac{1}{R_2} \left( \frac{I_1}{I_2} \right)^2$$

$$\frac{P_{cu1}}{P_{cu2}} = \frac{234,5 + \theta_{f1}}{234,5 + \theta_{f2}} \cdot \left( \frac{I_1}{I_2} \right)^2$$

Hypothèse :  
- température ambiante  $\theta_0 = 25,5^\circ\text{C}$   
- réchauffement à pleine charge  $75^\circ\text{C}$

$$\text{d'où } \Delta\theta_1 = 75^\circ - 25,5^\circ = 49,5^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$$

$$\text{d'où } \Delta\theta_n = 50 \text{ m}^2$$

$$\text{d'où } P_{cu_n} = P_{cu2} \cdot \frac{260 + 50 \text{ m}^2}{260 + 50} \text{ m}^2 = \frac{260 + 50 \text{ m}^2}{310} \text{ m}^2$$

$$\text{car } \theta_{fi} = \theta_{pi} - \theta_0 + \theta_2 = \Delta\theta_i + \theta_0$$

$\Delta\theta_i$  est la variation de température liée au facteur de charge  $i$

D'où les pertes cuivre au facteur de charge  $n$   $P_{cu_n}$  se déduisent des pertes cuivre à pleine charge par la formule

$$P_{cu_n} = \frac{260 + 50 \text{ m}^2}{310} \text{ m}^2 \cdot P_{cu2}$$

• Calcul des pertes réactives

$$Q_n = Q_v + n^2 Q_s$$

$$\text{avec } Q_v = \sqrt{S_v^2 - P_v^2} \quad ; \quad S_v = \% \frac{I_0}{I_n} \times S \quad ; \quad Q_s = Q_T - Q_v$$

$S$  est la puissance nominale du transformateur,  $Q_T = Q_{\text{Total}}$



Perdes de puissance active en fonction de la charge:

Puissance de Transfo [kVA]	$P_0$ [kW]	$P_1$	$P_{T1}$	$P_{T10}$	$P_{T10}$	$P_{T15}$	$P_{T20}$	$P_{T2}$	$P_{T2}$	$P_{T3}$	$P_{T3}$	$P_{T4}$	$P_{T4}$	$P_{T5}$	$P_{T5}$	$P_{T6}$	$P_{T6}$	$P_{T8}$	$P_{T8}$	$P_{T10}$	$P_{T10}$
1000	2,3	12,1	14,4	6,32	8,62	4,89	7,19	2,66	4,96	2,15	3,45	0,64	2,94	0,41	2,71	0,28	2,58	0,16	2,46	0,04	2,34
500	1,1	5,5	6,6	2,87	3,97	2,22	3,32	1,21	2,31	0,52	1,62	0,29	1,39	0,19	1,23	0,13	1,23	0,07	1,17	0,02	1,12
315	0,77	3,9	4,67	2,04	2,81	1,58	2,35	0,86	1,63	0,37	1,14	0,21	0,98	0,13	0,90	0,09	0,86	0,05	0,82	0,01	0,78
250	0,65	3,25	3,90	1,70	2,35	1,31	1,91	0,71	1,36	0,36	0,96	0,17	0,82	0,11	0,76	0,08	0,73	0,04	0,69	0,01	0,66
200	0,55	2,85	3,40	1,49	2,04	1,15	1,70	0,62	1,18	0,27	0,82	0,15	0,70	0,10	0,65	0,07	0,62	0,04	0,59	0,01	0,56
160	0,46	2,35	2,81	1,23	1,69	0,95	1,41	0,52	0,98	0,22	0,68	0,12	0,58	0,08	0,54	0,06	0,52	0,03	0,49	0,008	0,47
100	0,32	1,75	2,07	0,91	1,23	0,71	1,03	0,38	0,70	0,17	0,49	0,09	0,41	0,06	0,38	0,04	0,36	0,02	0,34	0,00	0,32



### d) Commentaires sur les courbes de pertes:

Il faut tout d'abord noter que les optimums de rendement se situent souvent au-dessous de la charge maximale;

c'est la cause pour laquelle, l'exemple du transformateur de 150 KVA qui remplaçait celui de 1000 KVA en "hors service" n'avait permis qu'une économie de 0,35 Kw alors que ceux de 150 KVA, 200 KVA, 250 KVA en auraient permis respectivement 1,1 Kw ; 1,2 Kw, 1,3 Kw ;

Mais le choix de transformateur plus gros fait perdre dans son ordre de grandeur plus élevé en KVAR.

De toute façon, ceci ne peut être rigoureusement discuté qu'en tenant compte du mode de comptage de l'énergie (comptage en avant ou en aval du transformateur) et de la valeur du cosφ (en appréciant les taxes ou bonifications que l'on tirerait de telle ou telle autre solution.)

Nous constatons que pour une installation consommant 1000 KVA à pleine charge et moins pendant les heures "hors pointe", il est possible d'économiser autant en puissances active que réactive, économie d'autant plus grande que le choix de transformateur de moindre taille est bien fait.

Seulement l'installation d'un deuxième transformateur implique d'autres investissements au niveau des protections d'où la nécessité d'analyser l'opportunité de ce choix en évaluant la période N sur laquelle les gains réalisés amortissent les investissements supplémentaires sur le petit transformateur et ses accessoires,

Pour cela, il suffit de calculer la valeur de  $N$  dans la formule donnant le gain en fonction du taux d'amortissement ( $t$ ), du coût du kilowatt-heure ( $e$ ), du nombre d'heures de fonctionnement ( $H$ ) et de la puissance consommée  $P$ .

-  $g$ : gain annuel =  $e \cdot P \cdot H$

-  $G$ : gain sur  $N$  années

$$G = e \cdot P \cdot H \left[ \frac{1}{1+t} + \frac{1}{(1+t)^2} + \dots + \frac{1}{(1+t)^N} \right]$$

$$G = e P H \frac{(1+t)^N - 1}{t (1+t)^N}$$

$N$  est le nombre d'années d'amortissement.

---

Ce Chapitre est principalement inspiré de:

- Électrotechnique à l'usage des ingénieurs - A. Fouillé
- Catalogue BERLIN GERIN.

KW

50

40

30

20

1,1

1,5

0,77

0,65

0,55

0,46

0,32

100

5

200

300

10

400

500

KVA

Perdes [KW] e  $\frac{1}{f}$  (charge [KVA])

500

1000 KVA

315

150

100

60

30

KVAR

20

40

30

20

10

2

100

5

200

300

400

500

KVA

Pertes (KVAR) = f (charge (KVA))

1000 KVA

500

250

150

100

75

50

## D COMPENSATION DE L'ENERGIE REACTIVE

### I. Introduction:

Le facteur de puissance est défini comme le rapport  $\frac{P [kW]}{S [kVA]} = \cos \phi$   
P étant la puissance active et S la puissance apparente.

Ce rapport met en évidence la proportion réellement utilisable de la puissance électrique installée, l'autre partie correspondant à la puissance réactive  $Q$  qui sert à la magnétisation de machines.

Le rapport  $\frac{P}{Q} = \tan \phi$  est un notion importante dans la facturation de la l'électricité de l'abonné haute ou moyenne tension et ne doit excéder 0,6 pour éviter les pénalités (majoration du coût global de kWh consommés).

#### 1) Inconvénients d'un mauvais cos $\phi$ :

a) Un transformateur alimentant une installation à faible cos  $\phi$  voit sa puissance active proportionnellement réduite et l'intensité du courant aux bornes du secondaire augmentée proportionnellement au carré du cos  $\phi$ , d'où l'augmentation des pertes Joule au niveau des câbles (chute de tension) et donc de la section des câbles.

b) Quand le  $\tan \phi$  excède 0,6 c'est à dire que l'énergie réactive consommée dépasse 60% de l'énergie active (soit  $\cos \phi < 0,8$ ) le distributeur facture à l'abonné l'énergie réactive.

#### 2) Ce qu'il faut éviter en vue de ne pas provoquer des inconvénients précités:

- La machine à faible charge ou à vide donc;
- Le surdimensionnement des moteurs et des transformateurs.

Mais on est souvent limité dans le respect de ces recommandations d'où l'on a recours à l'effet de la batterie de con-

densateurs ou de récepteurs fournissant du réactif (machines tournantes, compensateur statique).

## II Moyens de relèvement du cosφ:

Les principaux moyens de compensation de l'énergie réactive sont :

- l'installation d'une batterie de condensateur qui constitue le moyen le plus simple et le moins cher.
- les compensateurs automatiques qui constitue une simple amélioration du premier moyen car comporte un élément de mesure et de commande de la mise en marche des condensateurs.
- les compensateurs statiques pour les équipements électriques de forte puissance à régime de marche très variable.
- les machines synchrones fonctionnant en moteur ou en générateur peuvent fournir ou absorber du courant déphasé en avant ou en arrière sur la tension.

« Pour de plus amples informations à propos de ces différentes techniques de compensation d'énergie réactive, voir Annexe B ».



### III Exemple comparatif des gains apportés par l'installation d'un petit transformateur ou par compensation de l'énergie réactive par batterie de condensateurs:

Reprenons l'exemple de l'installation de 1000 KVA à pleine charge et 100 KVA hors des heures de plein service sous un  $\cos\phi$  égal à 0,7.

En supposant la totalité de la puissance active disponible consommée soit 700 kW et 70 kW respectivement pendant les heures de plein service et les heures de non activité pleine.

Il s'agit donc de comparer les gains apportés par le relèvement du  $\cos\phi$  jusqu'à la valeur de 0,87 (seuil de la pénalisation) et ceux apportés par l'installation d'un transformateur de 100 KVA pendant la fraction de temps de fonctionnement au valent; (soit par exemple  $\frac{3}{5}$  de temps).

#### a) Installation du transformateur de 100 KVA:

- l'installation du transformateur de 100 KVA permet les économies de 1,5 kW et 20 KVAR

Le gain dû à l'économie d'énergie active est:

- H = 4000 heures de fonctionnement annuel.

- e : coût du kWh = 70 F.CFA / kWh

$$G = P \cdot H \cdot e = 1,5 \text{ kW} \times 4000 \text{ h} \times 70 \frac{\text{F.CFA}}{\text{kWh}} = 420.000 \text{ F.CFA}$$

- Pénalités dues au  $\cos\phi < 0,87$  : p.

$$p = (87 - 70)\% \times 150 \frac{\text{F.CFA}}{\text{kW}} \times 700 \text{ kW} = 969850 \text{ F.CFA} \text{ de mois}$$

en effet, une majoration de 1% pour chaque centième de

coefficient au dessous de la valeur de 0,87 est appliquée.

• Durée d'amortissement des investissements sur le transformateur de 100 KVA

Le transformateur et ses accessoires est supposé revenir à 2000000 F.CFA après installation.

Soit  $N$  la durée d'amortissement en années et  $t$  le taux d'amortissement.

$$\text{ou } A.B = 2000000 \text{ F.CFA} \quad \text{avec } A = \frac{(1+t)^N - 1}{t(1+t)}$$

En prenant  $t = 10\%$ , on aboutit à une durée de  $N = 4$  ans et 5 mois.

<< Le gain en puissance réactive n'influe presque pas sur la valeur moyenne du coefficient et reste moyennement égale à 0,706 d'où les pénalités restent comme sans utilisation d'un petit transformateur >>.

b) Compensation de l'énergie réactive:

Le tableau 18, page 41, Norlin Gorin donne la valeur de 0,42 KVAR de puissance réactive à installer pour faire passer le coefficient de 0,7 à 0,86 (approximé à 0,87), ce par kW de puissance installée.

$$\text{Soit donc pour l'installation } 700 \text{ kW} \times 0,42 \frac{\text{KVAR}}{\text{KW}} = 294 \text{ KVAR}$$

• Pour une compensation globale, l'unique gain apporté est la suppression des pénalités dues au mauvais coefficient soit donc 969850 F.CFA.

Le coût des batteries de condensateurs est d'environ 2000000 F.CFA (protection comprise) soit donc une durée d'amortissement d'environ 2 mois.

On voit que pour des investissements égaux, la compensation de l'énergie réactive permet de baisser le facteur électrique de 969850 F.CFA par mois tandis que l'installation d'un petit transformateur laisse annuellement 11638200 F.CFA (12 x 969850) de pénalités pour ne procurer que 420.000 F.CFA d'économie seulement.

Il faut aussi préciser que si la compensation était réalisée plutôt que globale, elle aurait permis en plus de la suppression des pénalités, une économie au niveau des pertes de puissance active dues à l'effet Joule au niveau des câbles (chute de tension); en effet les pertes Joule sont proportionnelles au carré de l'intensité transmise donc inversement proportionnelles au carré du  $\cos\phi$ .

Évaluons la gain en puissance active au niveau d'un câble alimentant une armoire par lequel traverse 200 A sur une longueur de 50m,  $S = 5 \times 240 \text{ mm}^2$ ,  $H = 5000$  heures de fonctionnement annuel

$$W = 3RI^2t = 3 \times \rho \frac{L}{S} t = 3 \times 17,24 \times \frac{50 \cdot 10^{-3}}{240} \times 5000$$

$$W = 2155 \cdot 10^3 \text{ Wh}$$

$$\text{Soit } W = 2155 \text{ kWh} \quad \text{c'est pour } \cos\phi = 0,7$$

Si le  $\cos\phi = 0,87$ , l'intensité passe à  $I = 200 \text{ A}$  à  $I' = 200 \times \frac{0,7}{0,87}$ , donc les pertes Joule de  $W$  à

$$W' = \left(\frac{0,7}{0,87}\right)^2 W = \left(\frac{0,7}{0,87}\right)^2 \times 2155 \text{ kWh} = 1395 \text{ kWh}$$

$$\text{Soit une économie de } 2155 - 1395 = 760 \text{ kWh}$$

Puisque l'installation de 1000kVA fait compter sept (7) armoires parallèles, le gain fait être pour l'installation de

7 fois au plus selon la longueur des liaisons.  
de puissance disponible de l'installation passe de 700kW  
à 870 kW et pour la consommation actuelle, les câbles  
sont adaptés.

## Exemples réels d'économie par compensation de l'énergie réactive

1) La SSPT\* (Société Soudanaise des phosphates de Zéira),  
à l'aide d'un compensateur statique installé au niveau  
de son armoire générale permet des économies de 450.000  
FCFA/mois sans forme de bonification de la Société pour  
un cosφ atteignant la valeur de 1, au niveau Base Tension.  
Puissance installée : 600 KVAR pour 1450 KW

2) La STS : dans le cadre de ses diverses mesures visant à  
économiser de l'énergie a relevé son cosφ d'une valeur infé-  
rieur à 0,8 à une valeur de 0,98 :

Ceci dans le but d'éviter 8% de pénalité de la Société  
et profiter de 2,25% de bonification (pour  $\frac{3}{100}$  de cosφ  
supérieur à 0,95 avec un taux de 0,25% par  $\frac{1}{100}$ )

Amélioration sur consommation après calcul de 2,25% de  
bonification soit 2,25% de la facture mensuelle de 40 mil-  
lions de F.CFA ; soit 2.900.000 F.CFA.

Ces valeurs théoriques n'ont pas été atteintes, mais néanmoins  
le investissement se rente en quelques mois récupérés ;

Le tableau de la page suivante indique les variations mensuelles  
sur les dix premiers mois de l'année 1984.

\* Nouvelle installation de Abu Kagne

INCIDENCE DES ACCIDENTS SUR LA RISTOURNE SENELEC : 1984.

DESIGNATIONS	COS φ	Montant Facturé	Ristourne appliquée	Cumul Ristournes	Ristourne supplém. Si cos φ = 1.	Cumul Ristournes suppl. Si cos φ = 1.
83-19/4/84	0,96	38 543.560 HTVA TTC	1.114.023	1.114.023	278.505	278.505
84-28/2/84	0,99	53 432.354	1.566.386	2.658.409	108.011	426.516
84-20/3/84	0,99	34 110.171	786.072	3.664.481	266.518	673.034
84-17/4/84	0,9	39 660.939	853.147	4.497.628	586.766	1.259.798
84-25/5/84	0,97	53 264.668	757.181	5.254.809	1.135.771	2.395.569
84-20/6/84	0,97	39 486.326	569.750	5.846.759	862.965	3.232.494
84-26/7/84	0,99	17 204.096	477.203	6.343.962	124.300	3.362.794
84-17/8/84	0,98	27 523.048	572.046	6.906.008	396.677	3.757.491
84-17/9/84	0,97	43 803.037	623.382	7.529.390	935.073	4.692.564
84-11/10/84						1134 m

- Pour ajuster à 1 le cos φ de la S.T.S - investir 699.000 CFA amortis en 1 mois 1/2 (pose comprise) - Ristourne mensuelle complémentaire =

Ristourne totale mensuelle Future = 1.357.794 (moyenne) -  
 Actuelle = 836.598 (moyenne) -

51 -

Pour Porter le cos φ à 1 il faut répartir 192 KVARS sur les armures suivantes =

- T1 = 20 KVARS
- T2 = 20 KVARS
- T3 = 20 KVARS
- T4 = 10 KVARS
- T5 = 10 KVARS
- T6 = 15 KVARS

- T7 = 10 KVARS
- T8 = 10 KVARS
- T9 = 20 KVARS
- T10 = 20 KVARS
- T11 = 20 KVARS
- T12 = 5 KVARS
- T13 = 10 KVARS

sur T15 = 10 KVARS déjà posés.

Requis = 38 Modules Sécuritar 5 KVARS + 10 Modules de recharge.

- Achetez C.G.E 10 modules de 5 KVARS 230000 CFA HTVA - (disponibles)
- commander chez vous 38 Modules -

- 90 coses de 25mm<sup>2</sup> Ø 6 mm (à Seter)
- 2 mètres de câble SC 90W 4x26

## E. ECONOMIE D'ENERGIE AU NIVEAU DE L'ECLAIRAGE

### I Introduction:

La science de l'éclairagisme dont les applications sont nombreuses a des domaines aussi divers que la physiologie (qualité et fatigue de la vision avec ses répercussions dans la sécurité et l'efficacité) que l'économie de la production ou que l'art de vivre dans la cité moderne.

L'emploi rationnel de l'éclairage est pour une nation, comme tout acte rationnel d'ailleurs, un test de modernisme et de progrès social.

L'éclairagisme est donc à la fois une science et un art dont tout créateur de formes doit pressentir pour lui l'importance: l'efficacité de ses conceptions, de service social qu'il assume et enfin l'enrichissement de ses moyens d'expression, qu'il soit Ingénieur, Architecte, décorateur ou maître ou scène.

C'est pour ces raisons que nous choisissons de commencer ce chapitre de manière "littéraire"; en effet la recherche de l'optimum de l'éclairage ne s'arrête pas à la simple tentative de maximiser le rendement lumineux, mais au delà, faudra-t-il se soucier aussi du rendu des couleurs, de l'adaptation des types d'éclairage aux conditions de vie ou de travail, en termes de bien être social.

Ainsi tenterons nous ici de trouver la manière la plus rationnelle d'assurer l'éclairage d'un espace en tenant compte de l'économie, le rendu des couleurs, l'efficacité des sources.

## II Optimisation du choix de la source lumineuse:

On constate à partir du tableau comparatif des différentes sources lumineuses (voir Annexe C) que le premier paramètre de base d'optimisation de l'éclairage réside dans le choix du type d'éclairage à adopter ; mais ceci tenant compte des contraintes spécifiques de l'installation à éclairer.

En effet, si les lampes à incandescence sont cinq (5) fois moins efficaces que les fluorescentes et dix (10) fois moins que les lampes à décharge, il n'en demeure pas moins qu'elles restent assez répandues avec la couleur de leur lumière et leur rendu des couleurs de loin préférés aux autres.

Par ailleurs, les lampes à décharge ont un démarrage souvent très long et un rendu des couleurs très médiocre ce qui limite leur utilisation tandis que les fluorescentes sont très sensibles au nombre d'allumages qui affecte leur durée de vie qui risque de ne pas être atteinte dans le cas de nombre d'allumages excessif.

Le problème de rendu des couleurs et surtout de la couleur de la lumière a été aujourd'hui résolu par la combinaison des effets de fluorescence et d'incandescence pour aboutir à des lampes dites "économiques" de caractéristiques proches de celles des incandescentes de loin préférées avec de l'efficacité de loin supérieure (allant jusqu'à 100 lm/watt) ; comme exemple on peut citer les lampes SH ou PL de type Philips.



a) Vie optimale pour une lampe à incandescence

(inspiré de : "Sources lumineuses" par MERRY COMU, ed. Masson et Cie.)

Etant donné que les tarifs d'éclairage diffèrent d'un pays à un autre, que le renouvellement des lampes des grandes entreprises et celles d'éclairage public est onéreux et que le prix en est variable, il est important de tenir compte du fait que la durée de vie la plus économique des lampes à incandescence est fonction d'une part du prix de renouvellement et d'autre part du prix de l'électricité.

Si l'on cherche le prix de revient  $y$  du lumen-Heure, on a :

$$y = \frac{\text{coût de renouvellement de la lampe} + \text{coût de l'énergie}}{\text{lumens} \times \text{heures de fonctionnement}}$$

Soit  $P$  le prix de la lampe et du remplacement ;

$R$  le prix du kWh ;

$W$  le rapport de la puissance moyenne de la lampe à la puissance initiale absorbée ;

$W$  la puissance de la lampe en watt ;

$l$  la durée de vie.

- Le coût de l'énergie pendant la vie de la lampe sera égal

$$\text{à : } \frac{RWwl}{1000}$$

- Si  $y$  est le flux lumineux initial

$\gamma$  le rapport du flux moyen au flux initial

alors le prix de la quantité de lumière ou lumen-Heure est égal

$$\text{à } y = \frac{P + \frac{RWwl}{1000}}{\gamma l} \quad (1)$$

Si  $e$  est l'efficacité lumineuse de la lampe, on a  $e = \frac{\gamma}{W}$  ;

d'autre part on sait qu'au fonctionnement d'une lampe  $\alpha$  efficacité lumineuse  $\alpha$  correspond une durée moyenne  $l$ .

Si l'on fait maintenant fonctionner la lampe  $\alpha$  une efficacité  $E$ , il en résultera une durée moyenne  $L$ , et ces quantités sont reliées par la relation  $\frac{l}{L} = \left(\frac{E}{\alpha}\right)^b$

$$(1) \text{ s'écrit donc : } y = \frac{\frac{P}{L} + \frac{RWw}{1000}}{We\gamma} \quad \left(e = \frac{L}{w}\right)$$

$$y = \frac{\frac{P}{L} \left(\frac{L}{l}\right)^b + \frac{RWw}{1000}}{We\gamma}$$

$$y = \frac{P}{LW\gamma E^b} e^{bL} + \frac{RW e^{-L}}{\gamma \times 1000}$$

$$y_{\min} \Leftrightarrow \frac{\partial y}{\partial e} = 0 \Leftrightarrow \frac{(b-1) \times 1000 \cdot P}{LWRw} = \left(\frac{E}{\alpha}\right)^b$$

D'où la durée de vie optimale  $l_0$ :

par remplacement de  $\left(\frac{E}{\alpha}\right)^b$  par  $\frac{l_0}{L}$

$$l_0 = \frac{(b-1) \times 1000 \times P}{W \cdot R \cdot w}$$

$b$  étant fonction de la fabrication et du type de lampe, seulement en première approximation on peut prendre :

$b = 7,3$  pour les puissances élevées.

$b = 7$  pour les faibles puissances

$w = 1$  ( $0,97 \leq w \leq 0,98$ )

Il s'agit donc à notre niveau, de calculer la durée de vie optimale en fonction des paramètres actuels des lampes et

ensuite de voir comment, dans le choix du type de lampe, de sa puissance, de sa tension nominale et de là de sa tension de fonctionnement (paramètre au quel nous pouvons directement agir), nous pourrions réaliser les conditions de fonctionnement optimales.

b) Influence des variations de tension sur les paramètres des lampes à incandescence :

On sait que les lampes à incandescence sont sensibles aux variations de tension et que celles-ci ont une influence notable sur la durée de vie.

Les formules expérimentales suivantes permettent de calculer l'influence des variations de tension ( $V$ ) sur le flux lumineux  $\phi$ , la puissance consommée  $w$  et l'intensité de courant  $I$ .

$$\log[\phi/\phi_0] = A_2 \log[V/V_0]^2 + B_2 \log[V/V_0]$$

$$\log[w/w_0] = A_3 \log[V/V_0]^2 + B_3 \log[V/V_0]$$

$$\log[I/I_0] = A_4 \log[V/V_0]^2 + B_4 \log[V/V_0]$$

où l'indice 0 désigne le nominal.

En pratique, on néglige le terme au carré pour aboutir à :

$$\frac{\phi}{\phi_0} = \left(\frac{V}{V_0}\right)^{B_2} \quad \frac{w}{w_0} = \left(\frac{V}{V_0}\right)^{B_3} \quad \frac{I}{I_0} = \left(\frac{V}{V_0}\right)^{B_4}$$

$$\text{de même} \quad \frac{L}{L_0} = \left(\frac{V}{V_0}\right)^{-B_5} \quad \text{avec} \quad B_5 = 13,5 \text{ pour } W_0 \leq 150W$$

$$B_5 = 14 \text{ pour } W_0 \geq 150W$$

$L$  about la durée de vie.

Les constants  $A_i$  et  $B_i$  peuvent varier d'un type de construction à

un autre ; le tableau 2 Annex C en donne des exemples.

### c) Tubes fluorescents :

Beaucoup moins sensibles aux variations de tension qui conditionnent l'un des paramètres sur lequel nous pouvons agir en tant qu'utilisateur :

Il s'agit donc ici de bien choisir le type de tube fluorescent (en tenant compte de l'efficacité et de la couleur de la lumière), notamment les tubes dits "économiques" tels que SL et PL (Philips) qui atteignent des efficacités lumineuses de 80 à 100 lumens par watt.

Il existe par ailleurs des types de fluorescent qui peuvent être mis à la place d'une lampe à incandescence classique sans aucune modification de l'installation et consommant quatre (4) fois moins d'énergie (par exemple SL 18 de lumière proche de celle des incandescentes).

### III Moyens d'améliorer le rendement global d'un système d'éclairage :

- Assurer un entretien soigné afin d'éviter la baisse de rendement entraînant d'un taux de pollution trop élevé.
- Bien choisir le type de luminaire afin de profiter au maximum du flux.
- Minimiser la hauteur des luminaires (hauteur strictement nécessaire).
- Choisir des couleurs de mur à coefficient de réflexion assez élevé.
- mode de fixation de luminaire à optimiser.

#### IV Exemples pratiques d'économie d'énergie au l'éclairage:

a) par installation de lampes économiques (cas pratique)

• Bilan électrique:

d'installation et allumés 9h/j, 25 j/mois et 12 mois/an  
soit 2850 h.

Avant modification	100 lampes Philips 100W - 10000W 40 lampes PAR 150W - 6000W	→ 16000W
Après modification	140 SL 18	18W x 140 = 2520W
Economie d'énergie en kWh		13480 kWh
Economie d'énergie en Euro		13,48 x 2850 → 38418 kWh

• Bilan thermique:

Du fait de la réduction de la chaleur dégagée par les lampes d'éclairage pendant les 5 mois d'été, les refroidisseurs de zones froids en moins:

$$13,48 \times 9,5 \times 25 \times 5 = 16,007 \text{ kWh}$$

$$\text{Soit comme économie globale annuelle: } 16007 \text{ kWh} + 38418 \text{ kWh} \\ = 54425 \text{ kWh}$$

Remarque: Pour les jours froids, il faut retrancher de cette économie, les suppléments d'énergie de chauffage en hiver.

b) Economie réalisée à la STS au niveau de l'éclairage:

1) Séparation de l'éclairage de la passerelle (achevée), soit 10 lampes de 2 x 45W = 900W.

2.) Descente de l'éclairage du Tirage de 4,98 m à 3 m du sol en utilisant 2 tubes compensis de 45 W, au lieu de 3 dans les ensembles.

2 tranches (séparés) de 100 vasques prévues soit  $2 \times 5000 \text{ W} = 10.000 \text{ W}$  d'économie

Coût total unité :  $100 \times 6700 = 670.000 \text{ F.CFA}$   
par tranche.

Amortissement en 1 mois, gain économie mensuelle de 167500 F.CFA passant en même temps de 197 lux à 438 lux.

3.) Séparation éclairage de Caustiques pour coupure diurne de 8H à 18H.

18 vasques de  $2 \times 45 \text{ W}$  soit 22608 F.CFA / mois

1.) + 2.) + 3.) représente 200.000 CFA d'économie par mois d'énergie électrique

4.) Suppression de tout éclairage secondaire, soit des gains supplémentaires.

c) Optimisation de l'installation des lampes à incandescence:

- Demarche à suivre:

Après le calcul de la durée de vie optimale des lampes, la comparer avec la durée de vie des lampes disponibles qui est souvent de 1000 h à la tension nominale ;

si les valeurs sont différentes, établir l'installation de sorte que la tension d'alimentation des lampes fasse atteindre la vie économique des lampes.

ex: Lampes à vis:

$W = 40 W$	;	$P = 581 \text{ FCFA}$	;	$L = 1265 \text{ h}$
$W = 75 W$	;	$P = 581 \text{ FCFA}$	;	$L = 648 \text{ h}$
$W = 100 W$	;	$P = 603,5 \text{ FCFA}$	;	$L = 518 \text{ h}$
$W = 150 W$	;	$P = 900 \text{ FCFA}$	;	$L = 518 \text{ h}$
$W = 200 W$	;	$P = 1212 \text{ FCFA}$	;	$L = 519 \text{ h}$

Durée de vie optimale  $L_0$ :

$$L_0 = \frac{(b-1) \times 1000 P}{W R W} \quad \text{avec } b=7 \quad w=1.$$

$$R = 70 \text{ FCFA/kWh}$$

$$W \text{ [Watt]}$$

$$P \text{ [FCFA]}$$

$$L_0 = \frac{6000 P}{70 W} = 85,7 \frac{P}{W}$$

On voit que, mais à part la lampe de 40 W, la durée de vie optimale de lampes est en moyenne de 550 h.

Même si on a de se rapprocher de cette durée de vie optimale on peut augmenter la tension ;

En effet  $\frac{L}{L_0} = \left(\frac{V}{V_0}\right)^{-B_S}$  avec  $B_S = 13,5$  pour  $W \leq 150 W$   
 $B_S = 14$  pour  $W \geq 200 W$

ou en adoptant  $L_0 = 550 \text{ h}$ ,  $L = 1000 \text{ h}$   $V_0 = 220 V$ .

$$\frac{L}{L_0} = \frac{1000}{550} = 1,818 = \left(\frac{V}{220}\right)^{-13,5} \Rightarrow \boxed{V \approx 230 \text{ V}}$$

Gain en flux lumineux et en puissance :

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = \left(\frac{V}{V_0}\right)^{3,6} = \left(\frac{230}{220}\right)^{3,6} = 1,17$$

$$\Leftrightarrow \boxed{\Phi = 1,17 \Phi_0}$$

$$\frac{W}{W_0} = \left(\frac{V}{V_0}\right)^{1,58} = \left(\frac{230}{220}\right)^{1,58} = 1,07$$

$$\Leftrightarrow \boxed{W = 1,07 W_0}$$

" pour coefficient voir Annexe C tableau 2 "

On constate qu'il y a gain en efficacité lumineuse dans le rapport  $\frac{1,17}{1,07} = 1,09$  ; soit donc 9% par rapport à l'efficacité nominale ;

Gain qui aurait été d'autant plus grand que  $\frac{V}{V_0}$  aurait été grand, seulement on se serait aperçu alors de la vie optimale des lampes.

Le choix de la tension étant fait (230 V au lieu de 220 V), il devrait nécessaire de reconsidérer le choix des lampes car une lampe de puissance marquée  $W_0$  continue dans ce cas  $W = 1,07 W_0$  et fournit un flux lumineux  $\Phi = 1,17 \Phi_0$ , l'efficacité  $\eta$  étant donc de  $1,09 \eta_0$ .

Par exemple une lampe de puissance marquée  $W_0 = 100 \text{ W}$  de flux  $\Phi_0 = 1200 \text{ lm}$  d'efficacité  $\eta_0 = 12 \text{ lm/W}$  doit être considérée comme une lampe de :



$$W = 107 \text{ watt}$$

$$d = 1404 \text{ lumens}$$

$$\eta = 13,1 \text{ lm/w.}$$

Ceci peut se retrouver comme suit :

Il s'agit de faire la considération fictive qui consiste à dire que la lampe de 100 W correspond exactement à une lampe de  $1,17 \times 100 = 117 \text{ W}$  qui fonctionnerait à 220 V à la même efficacité que celle de 100 W soit 12 lm/w.

#### Conclusion :

La variation de tension pour le circuit de l'éclairage se fait de manière tout à fait simple : par exemple en limitant la chute de tension à une valeur assez basse de sorte à obtenir à l'arrivée la tension voulue ce qui constitue encore un gain supplémentaire (réduction économique des câbles) ou bien en agissant sur le réglage de tension du transformateur (charges de prises).

La recherche de la tension optimale peut aussi s'effectuer à l'aide d'un gradateur. (mais solution onéreuse en matière des investissements supplémentaires contrairement aux cas précédents).

On peut dire que le vrai économiseur d'une lampe dépend du coût du kWh dans votre pays à un autre ; chaque pays devrait effectuer ses commandes de lampes avec la précision de la durée de vie désirée.

Ce chapitre est principalement inspiré de :

- Sources lumineuses . NERRY COHU
- Notions d'éclairagisme . ANDRE SALOMON
- Philips lumière . catalogue PHILIPS

## F. MOYENS DE DIMINUER LE COÛT DU KILOWATT-HEURE - POINTE DE DEMARRAGE

### I Clauses de contrats:

de diversité des facteurs à prendre en compte dans les clauses de contrats entre une nouvelle entreprise ou une ancienne ayant subi des modifications importantes rend extrêmement complexe le choix de la forme de tarification à adopter. La seule méthode valable dans ce cas, consiste à se limiter à une véritable expérimentation pendant un certain temps, donc à conclure un contrat provisoire avec le distributeur, en vue de l'établissement d'un contrat définitif.

Avant de cette expérimentation, on effectuera un série de mesures, en particulier l'enregistrement de la puissance appelée instantanée (maximale) et de la puissance moyenne sur des temps assez courts (5 à 10 ms). On pourra également enregistrer le cosφ de l'installation. Le dépouillement de ces enregistrements permet alors de recalculer ce qui aurait été la dépense avec différentes formules de tarification, et donc de choisir la plus avantageuse.

On entend donc par là que:

- le choix de la puissance souscrite, dont le rapport avec la puissance installée est rarement favorable;
- le mode de tarification le plus avantageux qui dépend de la durée d'utilisation de la puissance souscrite, de la répartition de la consommation selon les tranches horaires.

Il est nécessaire que les marches suivies soient bien représentatives de la marche moyenne de l'usine, ce qui pose le problème de

l'incidence de l'ordonnement des fabrications sur le coût de l'énergie et aussi plus ponctuellement des mises en route d'appareils; Il faut tout mettre en œuvre afin d'éviter l'écrêtage des pointes en choisissant par exemple de décaler les démarrages des moteurs ou même tout simplement d'interdire à certaines heures la mise en route d'appareils secondaires. (heures de pointe ou de consommation élevée).

La gestion de ce type de contrat est connue - on le voit bien complexe. Il faut en effet:

- vérifier les factures au sens classique du terme: identité des quantités livrées et des quantités facturées, et le respect des conditions particulières du contrat;
- suivre l'évolution de la consommation et, en particulier les dépassements de la puissance souscrite, toujours très onéreux, et la consommation d'énergie réactive due à l'insuffisance du cosφ de l'installation.

D'un part, ces tâches vont aboutir à de demandes de règlement de consommation auprès du distributeur (SENELEC) en cas de facturation erronée. (presser si possible son propre comptage en parallèle). D'autre part, le suivi de consommation va aboutir à rechercher les causes des dépassements et moyens d'y remédier, soit en agissant sur la programmation de l'emploi des machines (Asservissement), soit sur les conditions techniques de l'utilisation (amélioration du cosφ, remplacement de moteurs surpuissants ou à faible rendement etc...)

Une bonne gestion de l'énergie électrique consiste à constamment s'assurer que la solution tarifaire choisie contribue

à être la meilleure possible, compte tenu de l'évolution de la consommation. Il est donc nécessaire de se livrer, à intervalles réguliers, à des simulations de tarif du genre de celle décrite ci-dessus, afin de voir si une autre forme de contrat ne conduirait pas à un prix du kWh (moyen) plus bas. Lorsqu'une telle possibilité est détectée, et qu'elle se confirme plusieurs fois, il faut demander au distributeur une modification du contrat et mettre au point la meilleure affaire.

## II Moyens d'optimiser une installation électrique:

### 1) La programmation:

Elle permet l'arrêt et la mise en fonctionnement réduit de certains récepteurs à certaines heures.

C'est le cas par exemple de l'éclairage des immeubles de bureaux, de la ventilation d'une usine, du chauffage des locaux, etc... La programmation peut aussi être utilisée pour limiter le fonctionnement de certains récepteurs à grande inertie ou à fonctionnement intermittent.

Cette pratique ne permet pas d'économiser de l'énergie, mais a les avantages suivants:

- incidence directe sur le coefficient de simultanéité, donc sur l'intensité de service et/ou sur le dimensionnement de l'installation.
- diminution de la prime fixe du contrat avec le distributeur d'énergie électrique (puissance souscrite minimale)
- diminution du nombre de kWh facturés en heure de pointe pour les abonnés haute et moyenne tension.

## 2) l'Asservissement :

Cette technique permet de ne consommer de l'énergie que lorsque c'est nécessaire, la grandeur contrôlée n'ayant pas une variation uniquement liée au temps (horloge).

L'asservissement peut se faire en tout ou rien ; c'est le cas de l'éclairage piloté par cellule photovoltaïque ou le chauffage piloté par sonde extérieure et thermostat.

On trouve de manière proportionnelle ; c'est le cas de la régulation de vitesse des turbomachines.

L'asservissement proportionnel a de plus que la programmation le fait qu'elle permet non seulement la consommation de l'énergie à temps et à temps seulement mais aussi en quantité strictement nécessaire.

## 3) Matériels d'économie d'énergie :

- Interrupteur horaire 24h
- Interrupteur horaire 7 jours.
- Interrupteur crépusculaire
- réseau de délestage
- variateurs
- économiseurs
- Automates programmables ex: BP 25 ; BP 100 ; AP 300

Ces derniers permettent la gestion optimale de l'énergie dans l'industrie comme dans le tertiaire. Programmation journalière, hebdomadaire, annuelle, décalage des consommations, délestage de circuits non prioritaires, régulation de la climatisation, autres possibilités pour consommer moins et ainsi réduire le coût du kWh.

- Il est bon de signaler le cas particulier du variateur de vitesse qui constitue un moyen de régulation proportionnelle dans

à l'étude, est consacré au chapitre entier (régulation par variation de vitesse des turbomachines).

Les variateurs de vitesse, appelés GRADATEURS fournissent au bout d'une variation de vitesse qui au démarrage à courant réduit.

---

Ce chapitre est principalement inspiré de :

- la gestion de l'énergie dans l'entreprise - BERNARD BAUDIN
- Catalogue MERLIN GERIN
- la variation de vitesse électronique - TELEMECANIQUE.

## G. OPTIMISATION DU CHOIX DE LA TENSION ET DU NOMBRE DE PHASES

### I Introduction:

La meilleure qualité de la tension et d'un réseau ou d'une installation industrielle, c'est d'être optimale.

Considérons d'abord un type particulier d'appareil, que l'on utilise pour fabriquer un certain produit ou fournir un service. Il existe pour ce type d'appareil un dimensionnement optimal, qui permet d'obtenir ce produit ou ce service au coût unitaire le plus bas (le coût comprenant la somme de l'amortissement de l'appareil et des dépenses de fonctionnement : énergie consommée et entretien). La tension à fixer pour cet appareil est une des caractéristiques du dimensionnement : sa valeur correspondant au dimensionnement optimal est dite : tension optimale ; elle dépend en particulier de la puissance de l'appareil (cette constatation est aussi valable pour le nombre de phases).

L'optimalité, comme nous l'avons déjà remarqué, est une notion relative ; elle varie dans le temps et dans l'espace ; ce qui est optimal en France ou au Canada, ne l'est pas forcément au Sénégal, dû aux différences des coûts d'installation et d'exploitation. Par exemple, la tension optimale d'un moteur de 100 kW est voisine de 1000 V en France ; mais faudrait-il indiquer le type de moteur pour pouvoir être précis. Par ailleurs, la tension optimale des lampes à incandescence classiques de 25 à 40 W est voisine de 120 V, alors que pour celles de 100 W et plus, elle est de 240 V. (Les projecteurs de 100 W et plus dont le filament est de construction spéciale (raccordé sur lui-même) ont une tension optimale de



d'ordre de 50V.)

L'utilisation d'un appareil quelconque, fonctionnant à une tension  $U$  différente de la tension optimale  $U_0$  entraîne des dépenses supplémentaires d'amortissement (vieillessement accéléré si  $U > U_0$ ) ou d'exploitation (rendement diminué). Celles-ci réduisent le bénéfice  $B$  résultant de l'usage de l'appareil, quel qu'ait le signe de  $U - U_0$ ; on peut donc écrire :

$$dB \approx \alpha (U - U_0)^2$$

(preuve : voir la preuve des 4 tomes de René Pelissier sur Les Réseaux d'énergie électrique (aspect technique du service); Pages 176 - 177 - 178)

Au sujet de la basse tension, René Pelissier (Professeur à l'École Supérieure d'Électricité, Contrôleur général de la Direction des Études et Recherches de l'Électricité de France - - -) conclut que pour les appareils d'utilisation, la tension nominale courante pourrait être choisie assez indifféremment dans la plage relativement large de 100 à 500V;

Comme le coût des lignes BT ne varie pas avec la tension dans ces limites, et celui des câbles souterrains faiblement seulement, on voit que la tension optimale des réseaux basse tension est celle qui minimise les pertes Joules et les chutes de tension; elle est donc dans la partie haute du domaine précédemment défini, mais un peu au-dessous de 500V, car le coût de certains matériels des postes peut alors s'accroître de manière sensible.

L'optimisation dans le choix de la tension d'une installation électrique tient compte de plusieurs facteurs dont les plus importants sont les coûts des lignes et des postes selon la puissance à transporter.

Il s'agit, après avoir présenté le modèle des coûts de ligne et des postes, de montrer la manière d'optimiser le transport d'énergie d'un point à un autre, ce qui, en toute rigueur, devrait constituer un préalable, au calcul de toute installation électrique.

## II Modèle de détermination des coûts:

### a) Coût des lignes:

a) Le coût économique de construction  $L$  peut se décomposer en trois termes:

- l'un dépendant de la section du conducteur directement
- l'autre dépendant de la tension  $U$
- un autre enfin dépendant de  $U$  et  $S$

Par mesure de simplification, nous adopterons le modèle suivant:  $L = L_0 + L_1 U + L_2 S$  ①

b) Le coût d'exploitation des lignes comprend les dépenses d'entretien et le coût des pertes Joule. Ces coûts sont calculables par unité de temps et par année. Pour les rendre comparables aux coûts de construction, il faut les actualiser et se faire le même sur la durée de vie de l'ouvrage considéré.

Les dépenses annuelles d'entretien faibles, proportionnelles aux coûts de construction sont souvent traitées, comme une simple proportion des coefficients de la formule ①.

Dans un bilucrite de ligne, la puissance perdue par effet Joule (pour 3 phases) est:  $3RI^2 = 3r \frac{I^2}{S} [W/km]$

$I$  étant exprimé en ampères et  $S$  en  $mm^2$

$r$  est la résistance d'un conducteur fictif de  $1 mm^2$  de section et de  $1 km$  de longueur.

Le coût de ce poste dépend aussi de :

- $h$  : nombre d'heures d'utilisation annuelle
- $k$  : prix moyen du kWh de fonte

Le coût actualisé des postes Joule s'écrit :

$$\textcircled{2} J = \frac{j_0}{5} I^2 \quad \text{ou} \quad j_0 = \alpha \cdot r \cdot k \cdot h$$

$$\text{avec} \quad \alpha = 3 \frac{(1+t)^n - 1}{t(1+t)^n}$$

$t$  : taux d'amortissement

$n$  : nombre d'années d'amortissement.

e) Le coût total de la ligne est donc :

$$\textcircled{3} L = L_0 + L_1 U + L_2 S + \frac{j_0}{5} I^2$$

NB : le mode de pose n'a d'influence que sur le terme  $L_0$

## 2) Coût des postes :

Le coût de construction des postes, y compris l'appareillage qu'ils contiennent est déterminé par la tension, par la puissance des appareils principaux (Transformateurs, disjoncteurs) qui sont directement liés à celles des lignes, et aussi par l'intensité nominale pour les jeux de barres et les auxiliaires de mesure et de contrôle (intensité qui est aussi liée à celle des lignes).

On peut alors exprimer le coût  $A$  d'un poste en fonction de la tension et de la puissance  $P$  des lignes qui y aboutissent (puissance qui est généralement la même pour toutes les lignes).

Malgré cette expression est complexe et imprécise car s'il existe de nombreuses structures possibles de postes, qui conduisent à des coûts très diversifiés non seulement par la puissance à transiter, mais

aussi en grande partie par la qualité de service à assurer (système de protection, Asservissement etc...).

Il nous faut donc nous fixer une qualité donnée de service qui détermine le coût du poste à une certaine valeur approximative.

Les données contrôlables découpent le coût des postes en :

- coût des cellules, y compris le troussin correspondant de jeu de barres et tous les auxiliaires de contrôle et de protection,
- Coût des transformateurs, y compris leur protection propre.

On constate que ces coûts sont fonction non seulement de la tension  $U$  et des calibres des appareils de protection et de contrôle, c'est à dire leur intensité nominale  $I$ , mais aussi de leur puissance nominale  $P$ .

Le coût d'un poste sera donné par une expression de la forme :

$$\textcircled{4} \quad A = A_0 + A_1 U + A_2 P + A_3 I$$

Il faut considérer cette formule comme imprécise, ce qui justifie que l'on tienne compte des dépenses d'exploitation actualisées par une simple majoration des coefficients. Les dépenses nouvelles d'exploitation aboutissent à un certain pourcentage  $k$  du coût de construction, l'actualisation de ces dépenses et leur incorporation dans la formule  $\textcircled{4}$  conduisent à majorer le coût de construction d'un pourcentage  $\alpha$ .

$$I = k \cdot \frac{(1+k)^n - 1}{1 + (1+k)^n} \quad n: \text{nombre d'années d'amortissement}$$

### III Optimisation du transport d'énergie d'un point à un autre:

(sans tension alternative triphasée).

Le problème que l'on cherche à résoudre ici est celui de la détermination des caractéristiques optimales de la ligne nécessaire pour transporter une puissance  $P$  définie (charge concentrée, série, etc...)

de traduction mathématique du problème est de rendre la fonction coût  $L$  minimale, à puissance fixe, c'est à dire:

- Rendre  $dL = 0$  ou  $dA = 0$

- sous la condition  $\frac{P}{\sqrt{S}} = UI$ .

Pour la puissance nominale et  $I$  le courant nominal, la méthode de résolution sera celle de Lagrange.

a) Optimisation de la ligne seule:

d'après la méthode de Lagrange, il existe un coefficient  $\lambda$  tel

qu :

$$\textcircled{5} \begin{cases} \frac{\partial L}{\partial U} = \frac{\lambda}{\sqrt{S}} \frac{\partial P}{\partial U} \\ \frac{\partial L}{\partial S} = \frac{\lambda}{\sqrt{S}} \frac{\partial P}{\partial S} \\ \frac{\partial L}{\partial I} = \frac{\lambda}{\sqrt{S}} \frac{\partial P}{\partial I} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} L_1 = \lambda I_0 & (5\alpha) \\ L_2 - j_0 \frac{I_0^2}{S_0} = 0 & (5\beta) \\ \frac{2 j_0 I_0}{S_0} = \lambda U_0 & (5\gamma) \end{cases}$$

où  $U_0, S_0, I_0$  sont les valeurs de  $U, S$  et  $I$  correspondant à la solution optimale.

a) Optimisation de la section seule:

On constate que l'équation (5 $\beta$ ) ne fait pas intervenir le coefficient de Lagrange  $\lambda$ , l'optimisation de la section ne dépend que du courant nominal optimal et l'on a :

$$\textcircled{6} S_0 = I_0 \sqrt{\frac{j_0}{k_2}}$$

où les deux termes  $L_2 S$  et  $j_0 \frac{I^2}{S}$  de l'expression (3) sont égaux :

" Cette conclusion est connue sous le nom de loi de Kelvin "

b) Optimisation de la tension: (sous la section optimale  $S_0$ )

Il faut remarquer que (58) peut s'écrire sous la forme  
 $hU_0 = 2\sqrt{L_2 I_0}$  (en introduisant la densité de courant optimale  
 $I_0 = I_0/S_0 = \sqrt{h_2 I_0}$  donnée par l'équation (6)).

On peut alors calculer le coefficient de Lagrange en multipliant membre à membre cette relation (58), ce qui donne :

$$L_2 = \sqrt{2L_1 \sqrt{3L_2 I_0}} / P$$

Et en remplaçant  $L_2$  par sa valeur dans  $hU_0 = \frac{2\sqrt{L_2 I_0}}{k}$ , on obtient

$$(7) \quad U_0 = \sqrt{2\sqrt{L_2 I_0} / L_1 \sqrt{3}} \cdot \sqrt{P}$$

On peut donc conclure que la tension optimale de la ligne est proportionnelle à la racine carrée de la puissance transmise.

### 2) Optimisation des postes :

Le poste, ou la fraction de poste considérée ici, est ce qui est nécessaire au raccordement de la ligne et sera donc défini pour la même puissance  $P$ . En remplaçant dans la fonction coût  $A$  le terme  $P$  en un terme en  $\sqrt{III}$ , la méthode de Lagrange conduit à écrire :

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial U} = \frac{h}{\sqrt{3}} \frac{\partial P}{\partial U} \\ \frac{\partial A}{\partial I} = \frac{h}{\sqrt{3}} \frac{\partial P}{\partial I} \end{cases} \quad (\Rightarrow) \quad \begin{cases} A_1 + A_2 \sqrt{3} I_0 = h I_0 \\ A_2 \sqrt{3} U_0 + A_3 = h U_0 \end{cases}$$

Ce qui se résout comme suit :

$$A_1 = (h - A_2 \sqrt{3}) I_0$$

$$A_3 = (h - A_2 \sqrt{3}) U_0$$

En multipliant membre à membre, on obtient l'expression de  $h$  en fonction de  $P$ :

$$h = A_2 \sqrt{3} = \sqrt{A_1 A_3 \sqrt{3} / P}$$

$$\text{d'où } U_0 = \sqrt{A_3 / A_1 \sqrt{3}} \cdot \sqrt{P} \quad (8)$$

Idem, comme pour la ligne seule, la tension optimale croît comme la racine carrée de la puissance.

L'impédance économique s'obtient comme suit:

$$\left. \begin{aligned} U_0^2 &= Z_e P \\ \frac{U_0}{\sqrt{3}} &= Z_e I \end{aligned} \right\} \Rightarrow Z_e = A_3 / A_1 \sqrt{3} \quad (9)$$

Cette impédance économique  $Z_e$  de postes est souvent très inférieure à celle des lignes ( $Z_e = 2 \sqrt{L_2 f_0} / L_1 \sqrt{3}$ ); ce qui justifie le fait qu'il est plus économique de faire fonctionner des puissances supérieures, aux puissances naturelles des lignes (égales à la somme des puissances de 3 ou 4 lignes).

### 3) Optimisation du transport d'un point à un autre sous tension alternative triphasée:

Les résultats de 1) et 2) montrent qu'il ne serait pas étonnant que les tensions optimales pour les postes d'extrémité et pour les lignes soient les mêmes;

la pratique montre d'ailleurs qu'elles sont souvent différentes. Il est donc nécessaire de reprendre le calcul d'optimisation sur le coût de l'ensemble des équipements couvrant au transport (lignes et postes).

Soit alors  $D$  la distance de transport en km, la fonction de coût devient:  $T = L D + A \quad (10)$

Remarquons cependant que la section  $S$  n'apparaît évidemment que dans le coût de la ligne  $L$  : et tout ce qui a été dit au paragraphe 1) sur l'optimisation de la ligne reste valable (ainsi que les conclusions relatives à la constance de la densité de courant).

Dans ce qui suit, on admettra que la section de la ligne est la section optimale donnée par la formule (6)

La formule (3) se simplifie alors puisque les deux derniers termes sont égaux (Kelvin), leur somme est égale à  $2\sqrt{L_2 I_0} \cdot I$

Dans ces conditions, la fonction de coût s'écrit :

$$\textcircled{2} T = (DL_0 + A_0) + (DL_1 + A_1)U + A_2\sqrt{3}UI + (2D\sqrt{L_2 I_0} + A_3)I$$

La méthode de Lagrange conduit à chercher le coefficient  $m$  tel

que :

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial U} = \frac{m}{\sqrt{3}} \frac{\partial P}{\partial U} \\ \frac{\partial T}{\partial I} = \frac{m}{\sqrt{3}} \frac{\partial P}{\partial I} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} DL_1 + A_1 + A_2\sqrt{3}I_0 = mI_0 \\ 2D\sqrt{L_2 I_0} + A_3 + A_2\sqrt{3}U_0 = mU_0 \end{cases}$$

Ce système se résout comme précédemment et donne :

$$m - A_2\sqrt{3} = \sqrt{\frac{(DL_1 + A_1)(2D\sqrt{L_2 I_0} + A_3)\sqrt{3}}{P}}$$

D'où il en déduit :

$$\bullet \text{ la tension optimale : } U_0 = \sqrt{\frac{2D\sqrt{L_2 I_0} + A_3}{(DL_1 + A_1)\sqrt{3}}} \cdot \sqrt{P} \quad \textcircled{12}$$

$$\bullet \text{ l'intensité optimale : } I_0 = \sqrt{\frac{DL_1 + A_1}{(2D\sqrt{L_2 I_0} + A_3)\sqrt{3}}} \cdot \sqrt{P} \quad \textcircled{13}$$

On conclut encore que :

- la tension optimale varie comme la racine carrée de la puissance transmise.



- la puissance économique de transport varie comme le carré de la tension de la ligne.
- Le courant nominal et donc la section optimale de la ligne varient tous les deux proportionnellement à la tension optimale.

Il conviendrait d'introduire ici encore la notion d'impédance économique qui intervient dans une formule suivante :

$$\left. \begin{aligned} U_0^2 &= Z_e P \\ U_0 &= \sqrt{3} Z_e I_0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow Z_e = \frac{2D\sqrt{L_1 Z_0} + A_3}{(DL_1 + A_1)\sqrt{3}} \quad (16)$$

on voit que la variation de  $Z_e$  en fonction de  $D$  est un arc d'hyperbole et l'on peut aussi remarquer que :

$$\text{pour } D=0 \quad Z_{e \min} = Z_e \text{ pote} = A_3/A_1\sqrt{3}$$

$$\text{et pour } D=\infty \quad Z_{e \max} = Z_e \text{ ligne} = 2\sqrt{L_1 Z_0}/L_1\sqrt{3}$$

#### IV Coût et Valeur du transport d'un point à un autre :

##### 1) Valeur du transport optimisé :

Pour un transport optimisé, la tension, le courant et la section s'expriment en fonction de la seule puissance  $P$  et l'on peut donc calculer les dépenses totales actualisées en fonction des deux paramètres du transport, la distance  $D$  et la puissance  $P$ .

Le coût optimal est le minimum des dépenses nécessaires au transport considéré, et tout autre choix de la tension et de la section des conducteurs conduit à un coût plus élevé.

On s'attend donc à ce que ce coût minimal représente la valeur économique du transport.

D'après les calculs ci-dessus, et en raisonnant à partir de la relation de coût (16) comme on l'a fait pour la ligne seule pour obtenir la relation  $L = L_0 + 2L_1 U_0$  (voir T3, P12), en regroupant les termes qui deviennent égaux dans un transport optimal, on obtient :

$$T_m = (DL_0 + A_0) + 2(DL_1 + A_1)\sqrt{Z_c P} + A_2 P \quad (15)$$

Le coût augmente évidemment avec la distance  $D$  et la puissance  $P$ ; ce qui conduit à introduire le produit de ces deux paramètres que l'on appelle : moment électrique du transport  $M_t = D.P$ .  
Et en rapportant la valeur  $T_m$  à ce moment, on obtient la valeur unitaire du transport, exprimée en Francs par watt.

$$\frac{T_m}{DP} = T_s = \frac{1}{P} \left( L_0 + \frac{A_0}{D} \right) + 2 \left( L_1 + \frac{A_1}{D} \right) \sqrt{\frac{Z_c}{P}} + \frac{A_2}{D} \quad (16)$$

ce qui trace de  $T_m$  en fonction de  $D$  pour différentes puissances  $P$ .  
Il faut que le facteur  $D$  est peu suffisant pour de petites valeurs et qu'au delà, le paramètre le plus représentatif n'est pas le moment électrique de transport  $M_t$  mais sa racine carrée  $\gg$ .

on peut donc écrire  $T_m = k \sqrt{D.P}$   $k$  à déterminer.

Il est évident que tous les développements jusqu'ici effectués ne conduisent, qu'à de résultats théoriques qui en pratique, auront du mal à être appliqués ;

En effet, les normes imposent des tensions et des sections bien définies d'une part, et d'autre part on ne saurait s'alimenter en une tension non disponible chez le distributeur d'énergie électrique, le seul paramètre que l'on contrôle "aisément" est la tension de transport de l'énergie à travers l'implantation propre à l'œuvre.

Ainsi, est-il d'intérêt d'établir les formules donnant les coûts de transport, à tension imposée ou à tension et section imposées.

2) Coût d'un transport à tension alternative imposée:

Il est bien souvent pas possible de choisir la tension optimale pour exploiter une ligne, par exemple parce que le réseau auquel elle fait partie est déjà en fonctionnement sous une tension autre que  $U_0$ , ou que la tension des récepteurs desservis est déjà fixée. On cherche ici alors à estimer la différence entre le coût du transport optimal et celui du transport à tension imposée; ceci, afin de fournir au moins les ordres de grandeur de la valeur techniquement possible et de l'optimum théorique.

On suppose pour cela que la section de la ligne considérée est la section économique correspondant à la puissance  $P$  et la tension  $U$  soit alors:  $S = \sqrt{D_0/L_2} \cdot \frac{P}{U\sqrt{3}}$

Les égalités (3) et (4) donnent alors le coût du transport de la puissance  $P$  à la distance  $D$  sous la tension imposée  $U$ :

$$(17) \quad T_u = (DL_0 + A_0) + (DL_1 + A_1)U + A_2 + \left( \frac{A_3}{U\sqrt{3}} + \frac{2D}{U} \sqrt{\frac{L_2 D_0}{3}} \right) \cdot P$$

soit (18)  $T_u = T_m + \frac{DL_1 + A_1}{U} (U - \sqrt{Z_c P})^2$

3) Coût du transport à tension et section imposées

Les égalités (3) et (4) donnent encore:

$$(19) \quad T_{us} = (DL_0 + A_0) + (DL_1 + A_1)U + (A_2 + A_3/\sqrt{3}U) \cdot P + (D D_0 / S) (P^2 / 3U^2)$$

Il est de normalisation de sections de lignes et de tensions demande souvent obligatoirement de valeurs économiques calculés; ainsi nous sommes obligés d'optimiser sous contrainte plutôt que d'avoir la latitude de chercher les valeurs efficaces comme précédemment effectués.

## V Nombre de phases:

des normes d'une part et la tension générale d'autre part limitent le choix du nombre de phases entre le monophasé et le triphasé.

Le choix du nombre de phases dépend surtout de la taille et de la tension d'alimentation des récepteurs constituant l'unité de production. Aussi, si un récepteur fonctionne en triphasé, on est obligé de l'alimenter en triphasé.

Par ailleurs, l'impédance caractéristique des postes est souvent très inférieure à celle des lignes, ce qui montre qu'il est plus économique de faire transiter par des postes des puissances supérieures aux puissances naturelles des lignes (égales à la somme des puissances de 3 ou 4 lignes).

Aussi le transport en triphasé permet d'économiser en cuivre; en effet comparé au monophasé, soit à tension de ligne et postes égales dans les fils de transmission, le triphasé permet d'économiser jusqu'à 25% de cuivre;

Les puissances transportées en triphasé respectivement en monophasé

$$P_t = \sqrt{3} |U| |I| \cos \phi$$

$$P_m = |U| |I'| \cos \phi$$

On en déduit donc pour des puissances et tensions égales ( $P_t = P_m$ )

$$\text{que : } |I'| = \sqrt{3} |I|$$

or les pertes dans les fils de transmission pour le triphasé respectivement pour le monophasé sont :

$$P_t = 3r |I|^2$$

$$P_m = 2r' |I'|^2 = 2r' (3|I|^2) \\ = 6r' |I|^2$$

Soit qu'à pertes égales ( $P_t = P_m$ ), la résistance du fil monophasé doit être deux fois plus élevée que celle du triphasé, donc deux fois

plus gros en section.

Dans pour deux fils en monophasé et trois fils en triphasé, mais deux fois plus petit que ceux du monophasé, il s'en suit une économie de 25% au la poids de fil à utiliser si nous choisissons le triphasé; mais ceci, à neutre non distribué.

Si maintenant nous choisissons de distribuer le neutre, afin de profiter de l'avantage du triphasé qui consiste à donner à la fois deux tensions différentes  $V$  et  $V/\sqrt{3}$ , alors l'économie n'est plus de 25%, mais n'est quant même pas nulle car le fil du neutre peut être choisi supérieur aux fils de phase.

Au niveau des récepteurs, un calcul d'optimisation pourrait être effectué afin de déterminer, à quel niveau de puissance, il est plus rentable de choisir un moteur triphasé plutôt qu'un moteur monophasé; ceci dépendant, aussi évidemment du coût de l'énergie; ce qui nous fait tout attendre penser que ce niveau est plus bas pour le Sénégal qu pour le Canada par exemple car il s'agit de voir à quel niveau de puissance le gain en efficacité (dans en énergie) compense, assez rapidement le surplus sur le prix du moteur triphasé par rapport au moteur monophasé de même puissance.

Les Faute de données suffisantes au niveau des prix, ce chapitre ne comportera pas d'exemple "frontière" >>.

Ce chapitre est entièrement inspiré de :

• Les réseaux d'énergie électrique - René Pelissier

+ Notes de cours ELEC 321 (EPT)

## H. REGULATION PAR VARIATION DE VITESSE DES TURBOMACHINES

### I Introduction:

Les turbomachines receptrices (pompes, ventilateurs, soufflantes, compresseurs etc...) requièrent, dans tous les procédés industriels, un réglage du point de fonctionnement afin d'adapter la machine aux paramètres d'exploitation.

Le point de fonctionnement est défini comme l'intersection de la courbe caractéristique de la machine, qu'elle soit axiale, centrifuge ou hélico-centrifuge, et de la courbe caractéristique du réseau la desservant.

Les modes classiques de réglage utilisés pour déplacer ce point de fonctionnement tels que : vannage, laminage, calage d'aube, jeu directeur, découlent tous du même principe, modifier la caractéristique du réseau initial par introduction d'une perte de charge supplémentaire.

Le résultat cherché est certes atteint mais, dans tous les cas, la turbomachine absorbera une puissance supérieure à la puissance effectivement requise.

La variation de vitesse électrique, technique déjà largement diffusée est, dans ce cas, un procédé applicable à toutes les familles de turbomachines, dans lequel le réglage du point de fonctionnement est obtenu cette fois, en laissant la caractéristique du réseau inchangée et en modifiant celle de la turbomachine receptrice.

Dans ce cas, il y a identité entre la puissance absorbée et la puissance effectivement requise.

Au niveau d'études d'applications, la vitesse variable se révèle être un procédé générateur d'économie d'énergie, mais aussi, d'économie sur les investissements propres à la machine entraînée notamment, si des surcharges temporaires ou des réserves de sécurité doivent être prises en compte dans le dimensionnement de l'installation.

## II Caractéristiques de fonctionnement et régulation des turbomachines réceptrices:

Le fonctionnement de chaque turbomachine est défini par l'évolution de la hauteur et du rendement en fonction du débit traversant la machine pour une vitesse de rotation donnée.

d'ailleurs la courbe caractéristique est fonction:

- du type de machine (axiale, radiale ou mixte)
- de la nature du fluide (fluide incompressible ou gaz compressible)
- du nombre d'étage
- des caractéristiques géométriques des aubes.

Toutes les courbes caractéristiques des différents turbomachines sont qualitativement identiques, ainsi l'étude pour un type reste valable pour tout autre type;

Ainsi prenons nous ici l'exemple d'un compresseur centrifuge. La courbe caractéristique d'une installation, quelle que soit sa forme (purement résistante, hauteur constante, ou la combinaison des deux) est généralement variable, car elle doit permettre à l'utilisateur d'adapter sa machine, aux conditions d'exploitation variables:

- variation du débit pour une pression de refoulement constante ou variable
- pression de refoulement à débit constant
- point de fonctionnement constant pour des conditions d'aspiration variables : variations climatiques (température) ou de la composition du gaz.

Pour pouvoir réaliser ces différentes conditions de fonctionnement, une régulation du compresseur est nécessaire.

Les modes de régulation principalement utilisés sont :

- le rampage au refoulement de la machine ;
- le lambrage à l'aspiration ;
- le réglage par aubes directrices ajustables ;
- la vitesse variable.

L'étude qualitative de ces quatre types de réglage sera effectuée pour un fonctionnement hors du point nominal à débit réduit et à hauteur de refoulement constante.

(Voir Annexes D)



### III Moyens utilisés pour la variation de vitesse par moteurs électriques:

a) La solution la plus utilisée jusqu'au début des années 80 est celle du moteur à courant continu avec redresseur contrôlé; dans les applications converties, le moteur a une caractéristique à excitation séparée, laquelle peut être soit constante, soit variable.

Le variateur de vitesse RECTIVAR VA4-50 42 Q (TELEMECANIQUE) est un régulateur de vitesse destiné à cette fin.

b) Le cascade hyposynchrone permet le contrôle du glissement du moteur asynchrone (donc de sa vitesse) tout en récupérant l'énergie correspondante pour la renvoyer au réseau.

Les variateurs de vitesse ALTIVAR (TELEMECANIQUE) sont particulièrement adaptés à la commande des moteurs asynchrones, en fournissant une fréquence et une tension variable à partir du secteur.

c) Les GRADATEURS (GRADIVAR VA1-SA 2121) sont des convertisseurs alternatif-alternatif.

Ils conservent la fréquence du réseau et réduisent la tension.

Ces gradateurs triphasés à thyristors sont surtout utilisés:

- comme variateur de tension: éclairage, chauffage
- comme variateur de vitesse pour moteurs asynchrones
- comme démarreurs de moteurs asynchrones.

Pour de plus amples informations sur la plan technique à ce sujet, voir Annexe D >>

## II Exemple d'application de la variation de vitesse :

### a) Circulateur pour unité de synthèse : (Cas réel)

#### a) Conditions de fonctionnement :

Ce circulateur permet de véhiculer le gaz à travers les tubes des catalyseurs du proces, la partie de charge du circuit restant sous fonction de l'état d'encrassement des tubes. Le compresseur doit permettre de réaliser tout point de fonctionnement de la zone hachurée de la figure 8)

#### b) Caractéristiques maximales de dimensionnement :

- Débit aspiré : 130.000 kg/h
- Pression d'aspiration : 168 bar abs.
- Température d'aspiration : 43°C
- Poids moléculaire du gaz : 4,6
- Pression de refoulement : 200 bar
- vitesse de rotation : 9800 tpm
- Puissance absorbée : 5400 kW

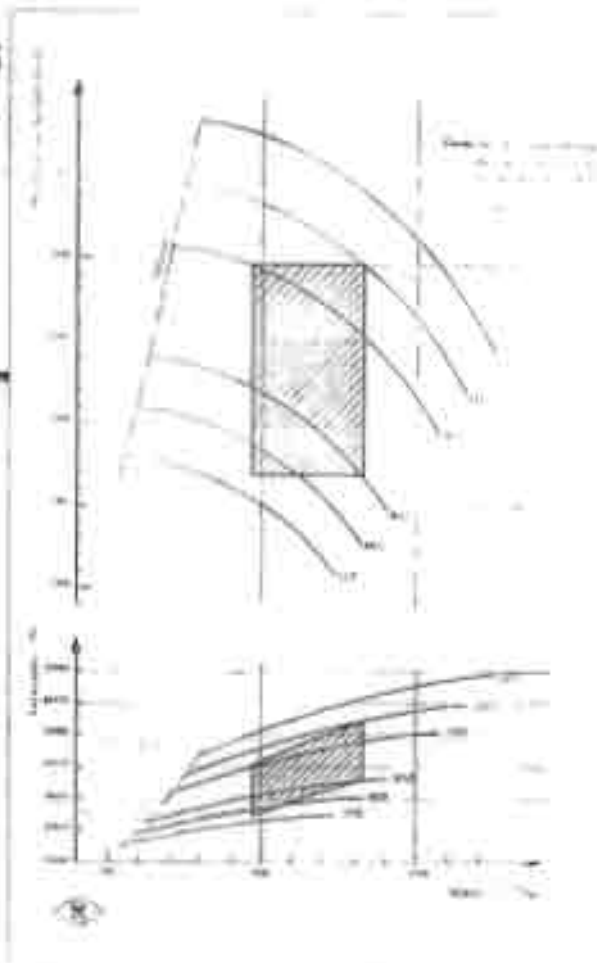


Fig. 8. Courbe de performance d'un compresseur de recyclage.

c) Etude comparative des puissances consommées

La figure 9 représente l'évolution de la consommation de puissance pour un débit délégué fixe ( $130.000 \text{ kg/s}$ ) en fonction de la puissance de refoulement pour un réglage à vitesse variable et un lairage à l'aspiration. Pour la pression minimale ( $187 \text{ bars}$ ), l'écart de consommation de puissance est de  $33\%$ .

La figure 10 représente l'évolution de la consommation de puissance en fonction du débit délégué et de la pression de refoulement ( $200 \text{ bars}$  et  $187 \text{ bars}$ ).

La vitesse variable permet de réduire sensiblement la consommation d'énergie entre  $200$  et  $187 \text{ bars}$ ; par contre, la consommation d'énergie est pratiquement identique en cas de lairage à l'aspiration.

La vitesse variable permet de réaliser des économies sensibles surtout lorsqu'on doit refouler à  $187 \text{ bars}$ .

Pour chiffres au gain, supposons que la première année d'exploitation, la production soit de  $80\%$  de la capacité nominale; les tubes étant froissés, le compresseur ne devra refouler qu'à  $187 \text{ bars}$ , la vitesse variable permettra de réduire les coûts d'exploitation de  $1.300.000 \text{ F.F}$  par rapport au lairage à l'aspiration. (Gain qui aurait plus que doublé au Sénégal vu le coût, et l'énergie bien plus élevée).

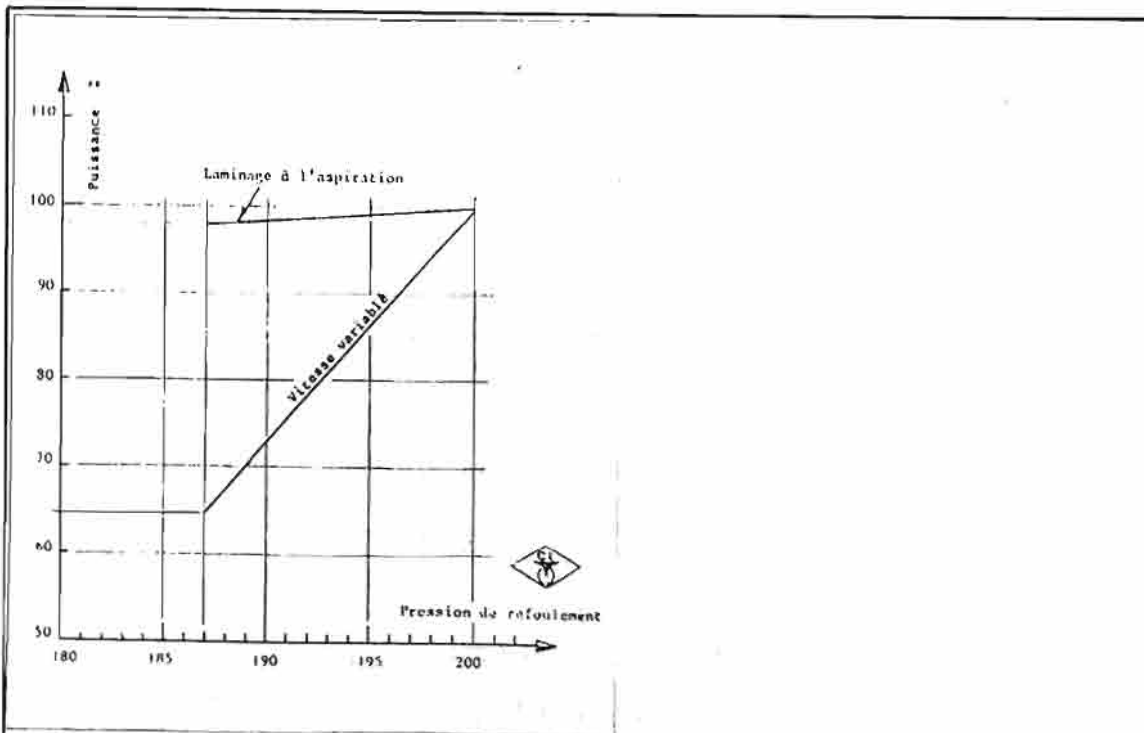


Fig. 9. Compresseur de recyclage : consommation de puissance à débit constant.

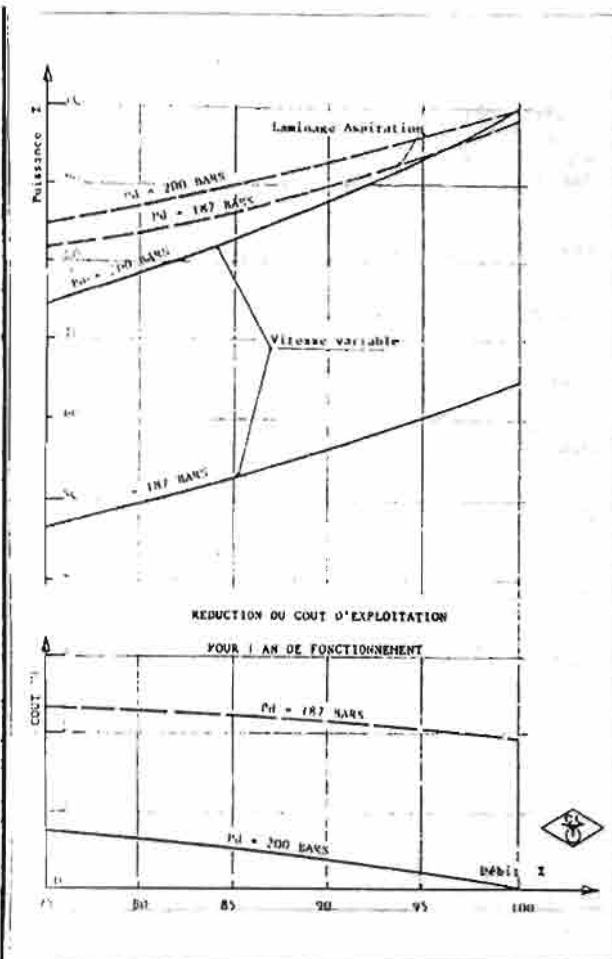


Fig. 10. Compresseur de recyclage : consommation de puissance à vitesse de rotation variable et laminage à l'aspiration.

## 27 Station de reinjection de gaz naturel :

### a) Caractéristiques nominales de fonctionnement :

Le dimensionnement des compresseurs (ligne de trois corps) a été réalisé pour les conditions suivantes :

- débit aspiré : 3,3 millions  $m^3/j$
- Pression d'aspiration : 14 bars abs.
- Température d'aspiration :  $65^\circ C$
- Poids moléculaire : 22,7
- Pression de refoulement : 425 bars abs.
- Vitesse de rotation : 10450 tpm
- Puissance absorbée : 26 000 kW

### b) Conditions de fonctionnement :

La pression de refoulement est constante (425 bar). Les conditions d'utilisation sont essentiellement variables :

- variation de débit entre 75 % et 105 % du débit nominal (le débit subjectif étant fonction du nombre de puits en exploitation).
- variation de la composition du gaz naturel avec le temps : poids moléculaire allant de 22,7 à 29,2
- variation des conditions climatiques journalières et saisonnières : la température d'aspiration du gaz peut varier de  $25^\circ C$  à  $65^\circ C$ .

### c) Etude comparative des puissances consommées :

de comparaison ont encore été faites entre la régulation par lauvage à l'aspiration et par variation de vitesse.

### c) Influence du poids moléculaire

La figure 11 permet de comparer, pour le poids moléculaire de dimension

22,7, la consommation de puissance en fonction du débit process avec réglage de la vitesse de rotation (courbe 1), laminage à l'aspiration (courbe 2) et laminage au refoulement (courbe 3).

La figure 12 compare la consommation de puissance pour les trois poids moléculaires : 22,7 - 25,8 et 29,2

Le tableau ci dessous permet de chiffrer les gains réalisables pour la régulation à vitesse variable pour un débit désiré de 80% du débit de dimensionnement.

Poids moléculaire	Réglage vitesse	Réglage de la pression d'aspiration H-cb	Gain	Réduction du coût journalier d'électricité
	% Puissance nominale	% Puissance nominale		
22,7	82	86	5%	4700 FF
25,8	77	94	18%	16800 FF
29,2	75	Hors plage		

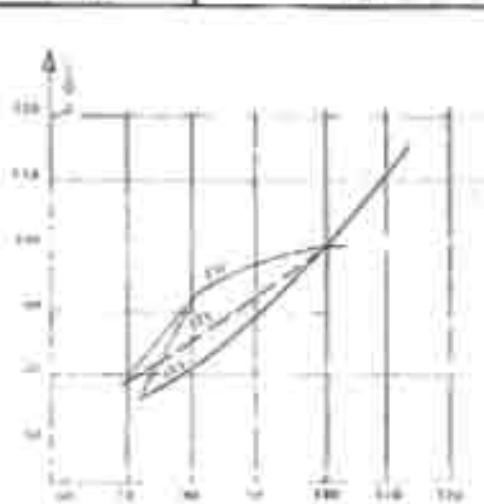


Fig. 11. Compresseur de réinjection.  
Puissance = 1 (Or amont veine de laminage) pour un poids moléculaire donné MW = 22,7.  
(1) Vitesse variable.  
(2) Laminage à l'aspiration du compresseur.  
(3) Laminage au refoulement du compresseur.

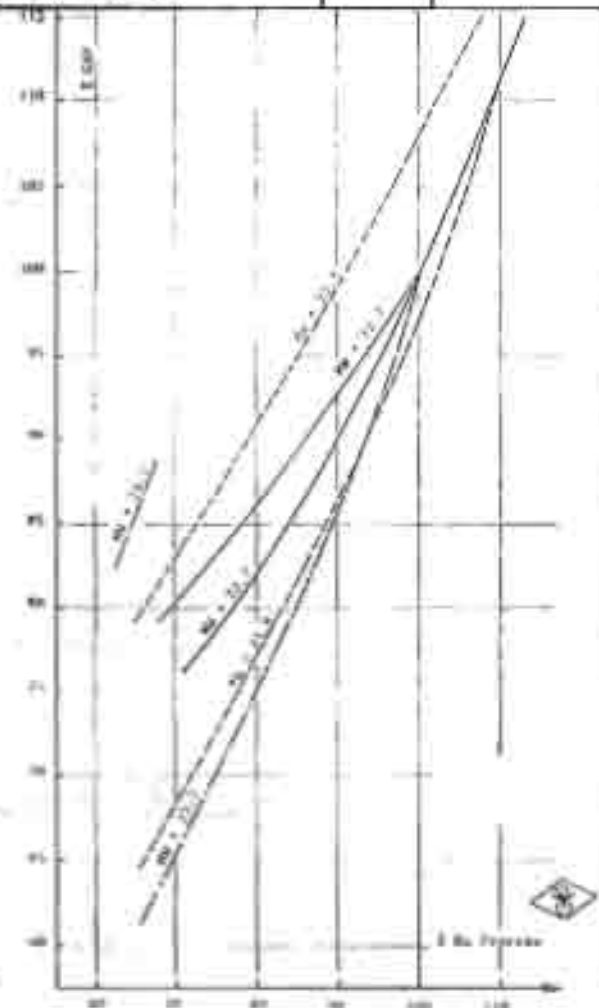


Fig. 12. Compresseur de réinjection.  
Puissance = 1 (Or process) pour MW = 22,7  
MW = 25,8 MW = 29,2

c) Influence de la température d'aspiration:

La figure 13 compare la consommation de puissance hors du point de dimensionnement pour les deux régulations : l'ajustage à l'aspiration et vitesse variable. Pour un type, les variations de puissance ne sont que légèrement influencées par la température (65°C, 45°C, 25°C).

Le tableau ci-dessous donne les gains réalisés pour un point de fonctionnement à 80% du débit nominal.

La vitesse nominale est non seulement la solution la plus économique, mais également celle qui donne la plus de flexibilité d'adaptation à des conditions variables.

Régula	Régula vitesse	Régula pression d'aspiration	Gain	Réduction du coût journalier d'exploitation
	% Puissance nominale	% Puissance nominale		
T <sub>a</sub> 65°C	82	86	5%	
T <sub>a</sub> 45°C	80	86	7,5%	
T <sub>a</sub> 25°C	82	87	6%	

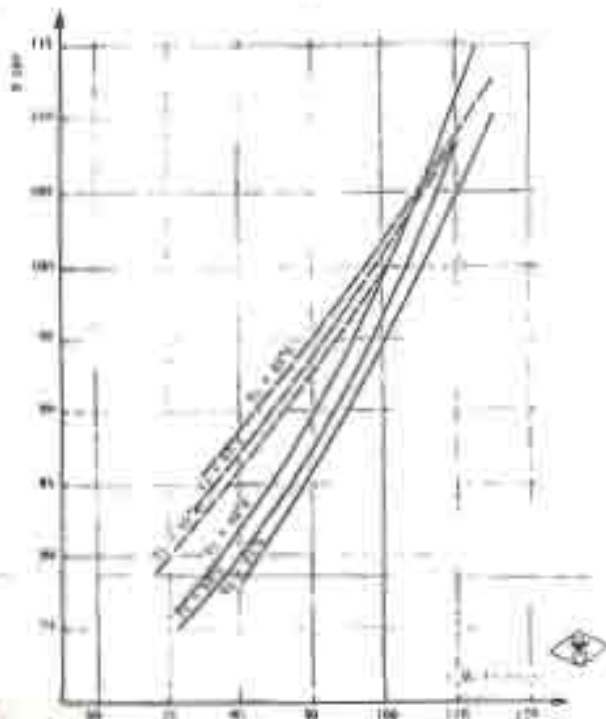


Fig. 13. Compresseur de réinjection.  
Puissance = f (Qv process) pour T<sub>1</sub> = 25°C  
T<sub>2</sub> = 45°C      T<sub>3</sub> = 25°C

### 3) Pompes centrifuges et hélico-centrifuges:

Dans cette installation comportant une pompe centrifuge dont le point de fonctionnement nominal est défini par:

$$H = 181 \text{ m}$$

$$Q_n = 2040 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\eta = 86\%$$

$$P = 610 \text{ kW}$$

L'étude est portée sur la comparaison des puissances consommées par l'utilisation, soit d'une vanne au refoulement, soit de la vitesse variable pour obtenir une variation de débit de  $Q_{n/2}$  à  $Q_n$ .

Le réseau équivalent est supposé pouvoir être, soit à pression constante, soit muni avec 25% de pertes de charge et dans les deux cas, deux réseaux (au point nominal) sont envisagés, soit

$$H = 1 \text{ (181 m)}, \text{ soit } H = 0,25 \text{ (151 m)}$$

Les courbes de puissance en fonction du débit dans les quatre cas de figures donnent l'image de l'économie réalisée par l'utilisation de la vitesse variable, en particulier, au débit moitié, l'écart de la puissance absorbée varie de 100 à 240 kW pour une puissance de 610 kW.

En utilisant une pompe hélico-centrifuge dont le point nominal est :

$$H = 140 \text{ m}$$

$$Q_n = 1870 \text{ m}^3/\text{h}$$

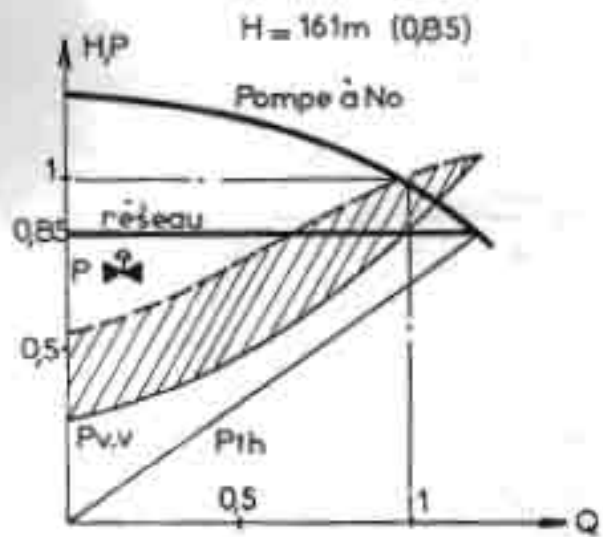
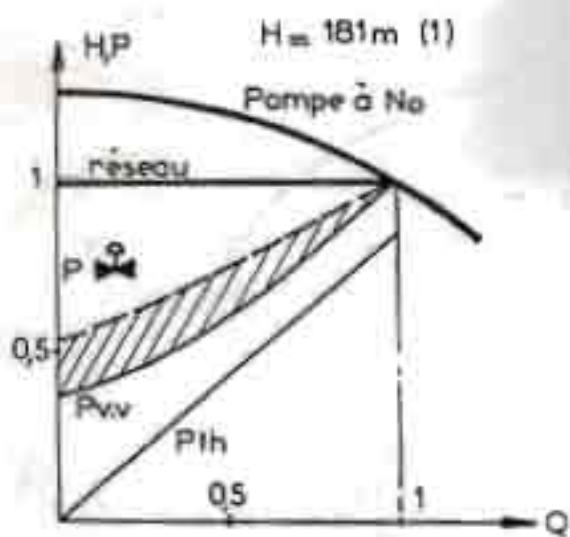
$$\eta = 83\%$$

$$P = 860 \text{ kW}$$

Une étude semblable fait apparaître des écarts à débit moitié compris entre 150 et 450 kW pour une puissance nominale de 860 kW.



CAS 1. - Réseau à pression constante



CAS 2. - Réseau avec pertes de charge (25%)

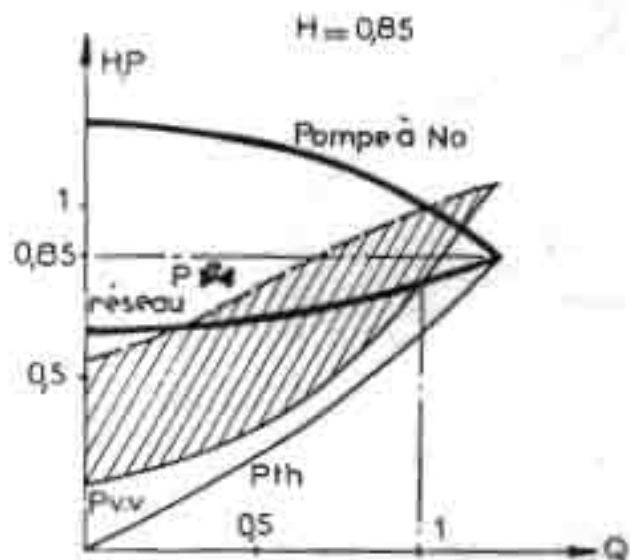
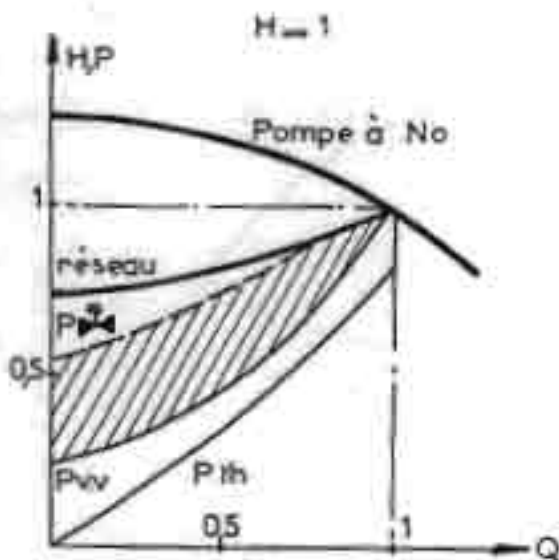
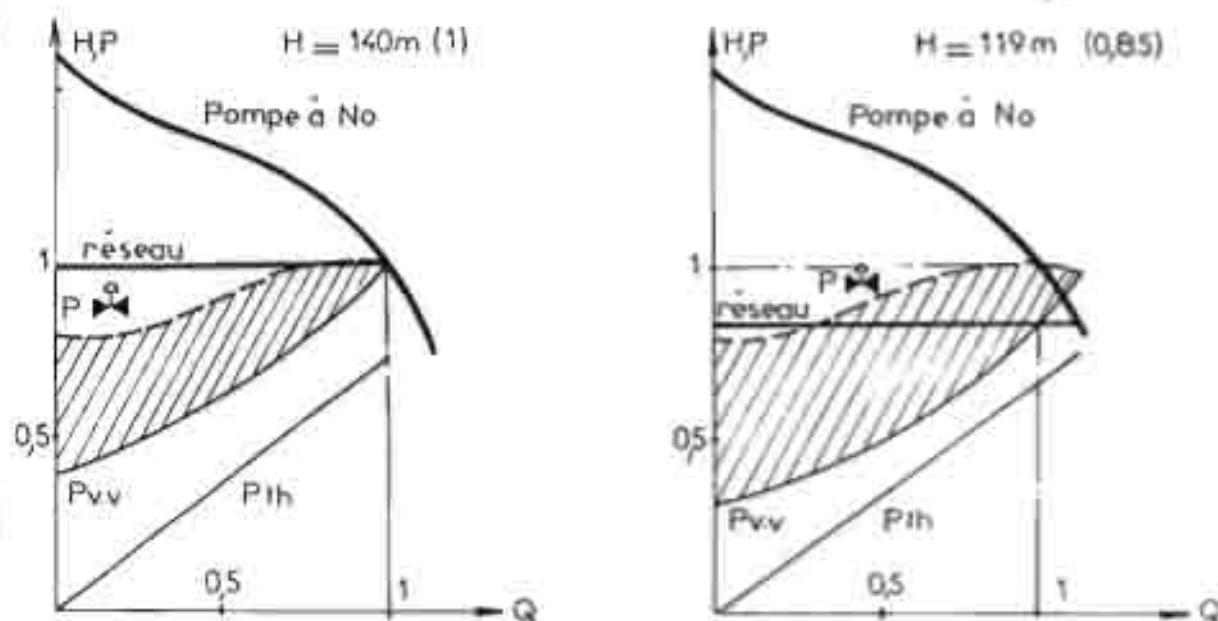


Fig. 14. Application pompe centrifuge.  
 Comparaison vitesse variable.  
 Pompe type MR10 - Point nominal (meilleur rendement)  
 $H = 181 \text{ m}$        $Q = 1,040 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $\eta = 84\%$        $P \text{ absorbée} = 270 \text{ kW}$

CAS 1. - Réseau à pression constante



CAS 2. - Réseau avec pertes de charge (75%)

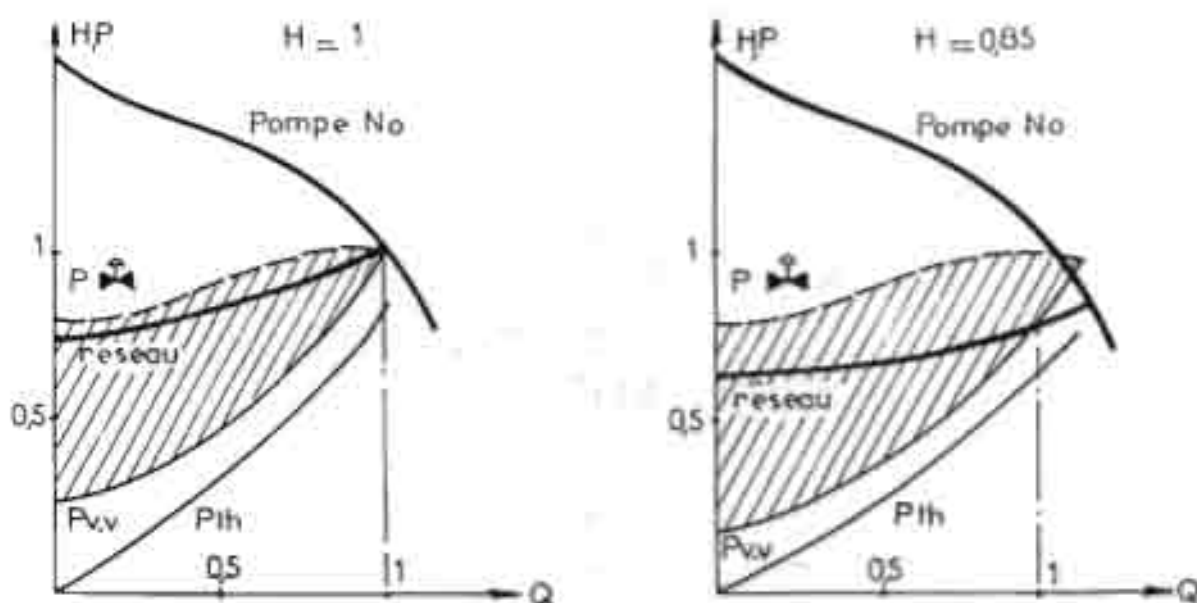


Fig. 15. Application pompe hélicocentrifuge.  
 Comparaison vannage/vitesse variable.  
 Pompe type FC500 - Point nominal (meilleur rendement)  
 H = 140 m Q = 3 870 m<sup>3</sup>/h  
 η = 82% P absorbée = 660 kW

Ces deux exemples d'application font apparaître au moins qualitativement deux conditions au pompe et son environnement qui doivent susciter le "reflexe" vitesse variable.

- Pompe à caractéristique tombante
- Réseau à caractéristique ascendante.

Par ailleurs, et en dehors du gain d'énergie, il faut noter que l'utilisation de la vitesse variable, en permettant aisément la linéarisation des débits demandés, peut aider à réduire l'environnement de la station de pompage proprement dite (volume des réservoirs et de antibalanciers, utilisation plus rationnelle des surpresseurs)

#### 47 Ventilateur centrifuge:

Dans une installation utilisant ce ventilateur centrifuge, les caractéristiques demandées étaient:

- débit nominal :  $600.000 \text{ m}^3/\text{h}$
- dépression maximale :  $1200 \text{ mm CE}$

Par ailleurs, l'unité de ventilation devait être capable de fournir un débit maximal de  $750000 \text{ m}^3/\text{h}$  dans de bonnes conditions de dépression de  $1600 \text{ mm CE}$

L'étude a porté sur l'utilisation soit d'inclinaeurs à aspiration, soit d'un entraînement à vitesse variable.

Dans chaque cas, une géométrie optimale de roue a été conçue : - avec inclinaeurs, la vitesse de la roue est  $1000 \text{ tpm}$  et les aubages à pleine ouverture ( $90^\circ$ ) pour obtenir un débit maximal à  $1450 \text{ mm CE}$  (ou le débit nominal à  $1600 \text{ mm CE}$ )

- avec entraînement à vitesse variable, la vitesse nominale est fixée à 1057 tpm pour obtenir le débit et la pression nominaux.

Au point maximal, la vitesse est portée à 1209 tpm.

La comparaison entre les deux solutions porte à la fois sur la technologie de la roue et sur la puissance requise au point nominal.

Si l'on prend 1 comme référence des grandeurs poids, diamètre de roue  $PO^2$ , de la roue à vitesse fixe, la roue à vitesse variable a pour valeurs respectives: 0,7, 0,8 et 0,33, ce qui constitue un gain appréciable sur l'investissement propre du ventilateur.

Au point nominal ( $600.000 \text{ m}^3/\text{h}$ ;  $1200 \text{ mm CE}$ ), la puissance absorbée ressort à 2615 kW avec aubages contre 2308 kW avec vitesse variable, soit un gain de 12% environ.

A partir de ces éléments, tenant compte de la diminution du prix du ventilateur, il est possible de déterminer pour chaque point de fonctionnement de l'unité, le temps d'amortissement de la plus-value correspondante à l'équipement électrique à vitesse variable.

Sur la base de 0,13 FF le kWh, ce temps d'amortissement est:

- 8,5 mois si l'unité fonctionne à 50%
- 12 mois si l'unité fonctionne à 90%
- 21 mois si l'unité fonctionne à 100%

Ces chiffres ne tiennent pas en considération la réduction possible de la centrale de lubrification par suite du poids réduit de la roue à vitesse variable (et aussi de l'écartage réduit du courant).

## V Conclusion:

Il faut souligner que les critères essentiels, faisabilité industrielle et prix de revient, reportent pour chaque solution d'adaptation de turbomachines retenue, des limites dans le plan puissance/vitesse.

Un organe d'entraînement dont la vitesse de rotation est variable sur une certaine plage présente les avantages suivants :

- gain maximal de la consommation d'énergie par rapport à tout autre mode de régulation pour tout point différent du point de dimensionnement.

Cela est dû au fait que l'on ajuste la puissance absorbée à la puissance requise par l'installation grâce à l'adaptation de la caractéristique de la machine ;

- grande amplitude de fonctionnement permettant :

- d'adapter la turbomachine à des conditions variables d'utilisation
- variation des conditions climatiques, de la composition du gaz ;
- de corriger les risques d'imprécision de fabrication
- d'optimiser le point de fonctionnement afin d'éviter les excitations préjudiciables à la tenue mécanique de la machine ( pulsation de couple, décrochages, etc -- )
- de faciliter le démarrage
- de minimiser les courants de démarrage.

ii A ces avantages, il faut ajouter, ceux obtenus au niveau strictement électrique, tels que l'amélioration du rendement d'un moteur asynchrone par réduction de sa tension, ou à faible charge, surtout par l'amélioration de son facteur de puissance dans les mêmes conditions. (cf. Electrotechnique à l'usage des ingénieurs Tome 2, 10<sup>e</sup> édition Page 302) >>

Ce chapitre est inspiré de :

- Revue Générale de l'électricité, T. 88 - N° 5, mai 1979
- la variation électronique de vitesse - TELEMECANIQUE
- Electrotechnique à l'usage des ingénieurs - A. Fouille  
Tome 2.

## Discussion et Recommandations:

Gérer l'énergie, c'est:

- mettre en place un service énergie;
- choisir au mieux ses appareils (tension, phases, taille etc...);
- transformer éventuellement l'énergie en fonction des critères techniques et économiques;
- la transporter et l'utiliser dans les meilleures conditions d'exploitation et d'entretien;
- Pousser les consommations et les comptabiliser
- et enfin et surtout animer, susciter, conseiller, réaliser et vérifier toutes les actions visant à économiser l'énergie.

Ainsi est-on conduit par exemple à l'établissement de plans d'économie qui ont pour but d'établir un programme d'amélioration dans le temps de ratios énergétiques de l'entreprise.

Ces plans vont donc englober principalement les études et les investissements à effectuer en vue d'économiser l'énergie.

On distingue deux cas d'investissements selon qu'il s'agit de cas de mise en place d'une nouvelle entreprise ou de transformation ou soit d'une entreprise déjà existante:

- les investissements directement en rapport avec la production, la transformation et la distribution de l'énergie (ou le service énergie car la maîtrise d'œuvre et la responsabilité des études)
- les investissements ayant trait aux fabrications et aux infrastructures pour lesquels le service Énergie n'auroit qu'un rôle de participant, avec pour objectif, de faire prendre en compte le facteur Énergie par le maître d'œuvre du projet.

« Il est évident qu'il importe que tout projet doit être optimisé ».

Les thèmes de la campagne d'économie d'énergie peuvent être choisis par exemple parmi :

- la chasse aux consommations inutiles : machines inutilisées au fonctionnement, éclairages en plein jour etc...
- le refroidissement excessif des locaux
- les excès de ventilation (portes ouvertes, courroies cassées, moteurs bloqués)
- chasse aux fuites (vapeur, air comprimé, combustibles)
- d'austérité du matériel
- le choix optimal du mode opératoire (il peut être par exemple plus intéressant de choisir comme système frigorifique une machine à absorption plutôt qu'un compresseur électrique, aussi longtemps que le rapport entre le prix de l'électricité et celui de la valeur dépense la valeur de 9 !)

#### Generalités sur l'optimisation de l'installation et d'utilisation des machines électriques :

Penser à :

- Placer le transformateur au centre de gravité des charges autant que possible, ce qui offre les avantages suivants :
  - chute de tension minimale
  - Inversements à distance minima
  - réduction de la section des câbles
  - facilité de l'installation et flexibilité accrue
- accepter la surcharge des moteurs si elle est peu fréquente ou de courte durée (sécurité thermique).
- refroidir le moteur par convection forcée afin d'augmenter sa puissance maximale admissible



- dimensionner les moteurs de sorte à leur faire atteindre leur rendement pratique maximal (qui est celui tel que la puissance de rendement maximal égale sa puissance thermique équivalente définie par son utilisation). (cf. Electrotechnique à l'usage des Ingénieurs 10<sup>e</sup> édition (A. Fouillé) Tome 2. Pages 41-42-43)

- à installer un régulateur de puissance reactive qui donne l'excitation optimale aux moteurs synchrones ; ceci bien sûr à partir d'une certaine puissance.

- à travailler les moteurs surdimensionnés en étoile si le fonctionnement normal est en triangle. (ceci peut se présenter lors d'un dimensionnement qui doit inévitablement prévoir une extension future assez importante).

- à installer un volent sur l'arbre du moteur pour le cas de demande de puissances passagères, afin de réduire la puissance du moteur à installer. (cf. Page 34-38, T2, Fouillé).

- Faire le calcul de rentabilité entre un moteur asynchrone à fluxeurs polarisés et un autre type de moteur n'offrant la possibilité de variation de vitesse qu'accompagnée d'un variateur à vitesse proprement dit ; ceci dans le cas d'un procédé exigeant une vitesse variable sur une plage assez large.

Il ne nous reste ici à préciser simplement que ce qui est important, c'est l'utilisation rationnelle de l'énergie, le non gaspillage, l'attention portée à l'utilisation de chaque unité d'énergie, que chaque kWh soit utilisé pour le meilleur service.

## Conclusion

Les limites de cette étude auront été en grande partie au niveau de la collecte de prix des différents équipements électriques; raison pour laquelle par exemple le chapitre sur l'optimisation de la tension et du nombre de phases ne comporte pas d'exemples pratiques de peur de traiter d'exemple inconsciemment biaisé.

Nous avons aussi été limités au niveau de la documentation sur les automatismes programmables d'où la suppression du chapitre sur le choix entre le contrôle par relais ou automate programmable.

Ce qu'il ne faut surtout pas perdre de vue pour l'exploitation de ce présent document, c'est l'aspect dynamique du sujet; en effet autant des considérations subjectives telles que celles émanant directement du décideur que purement objectives telles que la variation des prix de l'énergie ou des équipements électriques influent sur les résultats auxquels l'on aboutit.

Tous les chapitres ici traités offrent des possibilités réelles d'économies d'énergie; (quelquefois heureusement surprenant d'ailleurs) possibilités à exploiter selon leurs opportunités; en effet, c'est selon l'importance du coût de l'énergie relativement au capital global qu'une entreprise choisira de concentrer ses efforts sur la recherche de l'optimisation de ses installations électriques; mais il n'en demeure pas moins vrai que c'est un manque à gagner que de ne pas rendre optimal ce qui se fait pas encore.

Les résultats obtenus montrent que la politique énergétique au Sénégal (comme dans tous les pays où l'énergie a un coût de revient relativement élevé) doit commencer par la réalisation de l'optimisation. La bonne gestion des installations existantes, avant de se lancer dans des campagnes telles que l'exploitation des énergies renouvelables qui ont un investissement initial trop élevé comparé à celui nécessaire aux solutions ici proposées.

Ces résultats conduisent également à penser que les normes sénégalaises sur le plan électrique (comme cela pourrait être le cas dans d'autres domaines) devraient prendre en compte l'aspect économique de la question afin d'"obliger" les entreprises naissantes comme en fonctionnement à le mieux envisager sinon consciemment du moins "obligatoirement";

C'est ainsi qu'au niveau de la protection des câbles par exemple, les coupe-circuit à fusibles devraient être préférés aux disjoncteurs;

qu'à partir d'un certain seuil d'intensité transmise et de longueur de câble, (introduire par exemple une notion définissant le produit de l'intensité par la longueur du câble) que le choix d'une action économique supérieure à la action technique soit nécessaire ou

qu'à partir d'une certaine puissance de turbomachines, et pour une plage de fonctionnement assez large, que le choix du mode de régulation par variation de vitesse soit préféré etc...

Une multitude de considérations de ce genre, sur ce sujet, des continuations, son dépassement pourrait inspirer.

## Annexes

## Annexe A

### Calcul de la section économique:

#### I. Problématique:

Le Lord Kelvin, en 1884, établit le principe général qui stipule que la section économique est celle qui égalise l'investissement sur la charge et la valeur des pertes d'énergie; en ce point, leur somme est minimale. ».

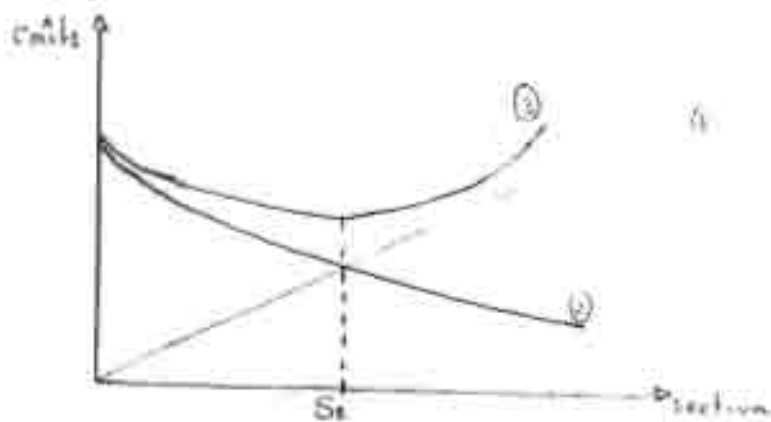
Les Progrès techniques qui se manifestent tous les jours dans les isolants ont pour effet de minimiser la section technique qui est celle respectant les contraintes thermiques de l'isolant, la chute de tension et les courants de court-circuit, et donc un accroissement des pertes par effet Joule qui se traduit par un gaspillage d'énergie (important et coûteux surtout dans les pays comme le Sénégal).

Lors de l'établissement d'un projet, on a donc intérêt à rechercher, compte tenu de ces pertes, quelle section conduit au coût annuel total le plus bas (ce, après s'être fixé un taux et une durée d'amortissement).

Donc pour un type de câble et un régime d'utilisation donnés, la somme des coûts d'établissement et d'exploitation, tracée en fonction de la section, passe par un minimum correspondant à la valeur de la section économique. (voir figure page suivante).

Dans la plupart des cas, la section économique est

supérieure à la section technique, l'écrit tendant à augmenter par suite du renchérissement de l'énergie et du développement de matériaux isolants, autorisant des températures de fonctionnement élevées.



- ① Courbe des coûts d'établissement
- ② Courbe des coûts d'exploitation
- ③ Courbe des coûts totaux.

L'aspect économique n'est donc pas à négliger et la solution à adopter pourra d'ailleurs être différente selon les critères adoptés pour choisir en particulier entre :

- les avantages à long terme de la section économique
- les avantages à court terme d'un investissement minimal, notamment en cas de loyer de l'argent élevé et de longueur de liaison importante.

## II Principe de calcul de la section économique:

Le calcul rigoureux de la section économique se heurte en pratique à la complexité des paramètres à considérer et l'incor-

études concernant leur évolution dans le temps (charges à transporter, coût de l'énergie électrique, nombre d'heures de service, taux d'actualisation etc...) pour l'amortissement de l'installation.

a) Loi de variation du prix P d'achat du câble en fonction de la section :

En première approximation, on admet que la représentation de prix en fonction de la section est une droite  $P = F + G \cdot S$ .  
Soit pour un câble de longueur  $L$  [km],  $E = PL = (F + GS)L$ .  
 $F$  et  $G$  étant des constantes à déterminer, leur valeur peut être déterminée graphiquement à partir de prix barèmes.  
Nous verrons qu'en pratique, seule la connaissance de la valeur de  $G$  est nécessaire.

$$G = \frac{P_2 - P_1}{S_2 - S_1} \quad \begin{array}{l} P_i \text{ : prix} \\ S_i \text{ : section} \end{array}$$

b) Coûts d'exploitation

Il comprend le coût des pertes d'énergie dans les câbles, dans l'isolant et dans les écrans, les frais d'entretien, les frais généraux associés à la liaison et est assimilé à une somme payée à la fin de chaque année.

Dans le cas des liaisons de basse et moyenne tension, on pourra se passer de négliger le coût des pertes diélectriques et des pertes dans les écrans et ne considérer que le coût annuel des pertes Joule dans les conducteurs qui est approximativement :

$$W = e \eta f \frac{L I^2}{S} \cdot 10^{-3}$$

où  $W$  est le montant des fonds Toufe [FCFA]

$e$ : le prix de l'énergie [FCFA/kWh]

$\eta$ : le nombre de conducteurs actifs

$\beta$ : la résistivité du métal à la température de service  $\left[\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{km}}\right]$

$L$ : la longueur de la liaison

$I$ : l'intensité du courant à transporter

$H$ : le nombre d'heures de service

$S$ : section du conducteur.

Les coûts  $E$  et  $W$  n'ayant pas la même échelle, il est nécessaire de les rendre homogènes afin d'effectuer leur minimisation. Ceci peut se faire en actualisant les coûts d'exploitation payés à la fin des années successives c'est à dire en les ramenant à l'époque de l'achat de la liaison.

• Actualisation de  $W$ :

$$W_a = W \left[ \frac{1}{1+t} + \frac{1}{(1+t)^2} + \dots + \frac{1}{(1+t)^N} \right] = W \frac{(1+t)^N - 1}{t(1+t)^N} = A \cdot W$$

$N$ : durée d'amortissement en années

$t$ : taux d'actualisation

• La section économique est la valeur de  $S$  qui minimise les coûts totaux  $CT = W_a + E$

$$CT = PL + A \cdot e \cdot \eta \cdot \beta \frac{L I^2 H}{S} \cdot 10^{-3}$$

$$CT = (F + GS)L + A e \eta \beta \frac{L I^2 H}{S} \cdot 10^{-3}$$

$CT_{\min}$  si  $GS L = A e \eta \beta \frac{L I^2 H}{S} \cdot 10^{-3}$  car leur produit est constant et  $F \cdot L$  est aussi constant.

$$\text{d'où } S_e = I \sqrt{\frac{A e \eta \beta H \cdot 10^{-3}}{G}}$$



## Annexe B

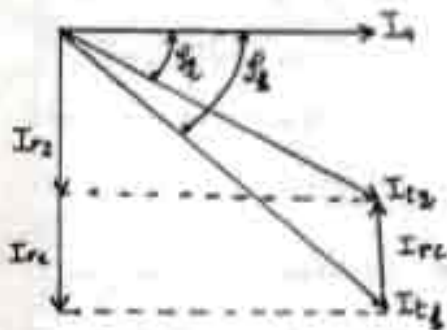
### Différents systèmes de compensation de l'énergie réactive:

#### I Compensation par batterie de condensateurs:

La installation d'une batterie de condensateurs constitue un moyen simple, définitif et très averti.

En effet, le condensateur se comporte comme un générateur autonome d'énergie réactive car sa consommation propre est presque nulle (présentant de l'ordre de 0,5 à 1 Watt pour 1000 VAR produits).

#### Principe:



#### Effet du condensateur sur le triangle des courants:

$I_a$  : courant actif, consommé

$I_t$  : courant total avant compensation

$I_{t2}$  : courant total après compensation

$I_{r1}$  : courant réactif avant compensation

$I_{r2}$  : courant réactif après compensation

$I_{rc}$  : courant réactif fourni par le condensateur.

#### Où installer les condensateurs?

##### o Au niveau de la source BT:

En effet, la batterie restant en service de façon permanente pendant la durée normale de l'installation, assure donc un amortissement rapide des condensateurs (nombre d'heures de fonctionnement élevé).

Surtout, ce mode de compensation intervient l'économie de facturation et le dimensionnement du transformateur n'est bien adapté qu'à des systèmes groupés de moyenne puissance car ne soulage pas les installations en aval (le courant circulant dans les câbles en aval reste inchangé) et il y a risque de surcompensation lors des faibles charges.

(risque de surtension); ce risque est éliminé par compensation automatique avec batteries déconnectées au gradius.

### 2) A l'entrée de chaque atelier:

Par rapport au précédent, ce mode de compensation soulage le câble d'alimentation de chaque atelier et l'optimisation de la taille des batteries est plus facile.

### 3) Aux bornes des moteurs:

Si la puissance de moteurs est importante relativement à la puissance de source, il ya lieu de raccorder les batteries directement aux bornes du moteur.

La puissance de la batterie est d'environ 25% de celle du moteur, mais elle dépend aussi de la vitesse du moteur (la taille, voir annexes sur ce sujet) (la valeur de 25% est donnée par NERLIN GERIN)

### 3) Aux bornes du transformateur:

Afin de compenser les fuites magnétiques du transformateur, on raccorde la batterie de condensateur, aux bornes du secondaire du transformateur.

cf Pour l'optimisation économique des batteries de condensateurs  
cf Cahier technique n° 100 NERLIN GERIN >>>

## II. Compensation automatique:

Un relais varnétique détecte la valeur du cosφ et commande l'enclenchement des gradius en fonction de la charge et du cosφ désiré.

## III. Compensateurs statiques:

Le fonctionnement d'équipements électriques de forte puissance et à régime de marche très variable (démarrages fréquents de gros moteurs) entraîne principalement des fluctuations rapides de tension pouvant perturber

le bon marche de certains recepteurs.

Les fluctuations de tension sont dues essentiellement à de brusques variations d'énergie réactive. La compensation par condensateurs (même automatique pas gradés) risque d'être trop lente à cause des temps de réponse des appareils de commande.

Les compensateurs statiques comprenant une batterie de condensateurs fixes associée à trois (3) reactances variables commandées par thyristors permettent une compensation exacte, continue et ultra-rapide, et régulent au mieux les variations de tension.

#### IV Machines Asynchrones fournissant du courant réactif:

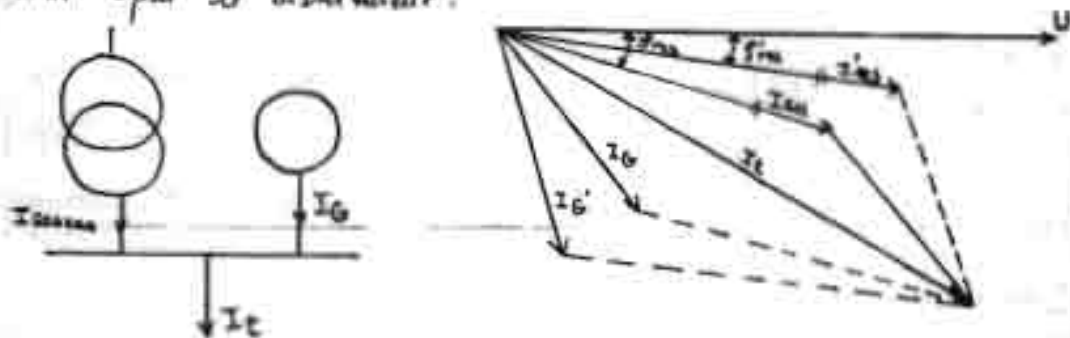
Les machines synchrones (par exemple) fonctionnant en moteur ou en générateur, peuvent fournir un courant déphasé en avant ou en arrière sur la tension. Cette variation de phase s'obtient par variation du courant d'excitation de la machine.

Ces machines peuvent fonctionner soit:

- en compensateur pur (compensateurs synchrones)
- en fournissant de la puissance mécanique sur leur arbre et de la puissance réactive au réseau.

Mais ce procédé est peu utilisé dans l'industrie, dû au fait que l'excitation et la protection sont très délicates.

Par contre si le groupe machine se trouve en parallèle avec le réseau (Sewalec), on peut en le suralimentant améliorer le cos du courant fourni par le distributeur.



Le courant  $I_c$  étant fixe, ainsi que son déphasage  $\varphi$ , si l'on veut diminuer la pénalité en surchargeant l'alternateur, le courant réseau (SENELEC) voit son déphasage diminuer jusqu'à ce que  $I_c$  reste fixe.

#### V Problèmes particuliers liés aux condensateurs :

- la norme des condensateurs de puissance (C.54.100) prévoit que les condensateurs doivent tenir 110% de la tension nominale. Au delà, leur durée de vie s'abrège très vite. En effet,  $P = U^2 C \omega$ . Si il apparaît une surtension de 20%, la puissance du condensateur s'accroît de 44%

- Les condensateurs créent des surtensions :

Ces surtensions correspondent à la ddp obtenue par le passage du courant capacitif dans les inductances du réseau amont.

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot L \omega \cdot I_c = \sqrt{3} \cdot X \cdot I_c$$

$$\left. \begin{array}{l} P_{cc} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_{cc} \\ I_{cc} = \frac{U}{\sqrt{3} X} \end{array} \right\} \Rightarrow X = \frac{U^2}{P_{cc}}$$

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot \frac{U^2}{P_{cc}} \cdot I_c \Rightarrow \frac{\Delta U}{U} = \frac{U I_c \sqrt{3}}{P_{cc}}$$

$$\boxed{\frac{\Delta U}{U} = \frac{\omega}{P_{cc}}}$$

$I_c$  étant le courant capacitif,  $Q$  la puissance réactive et  $P_{cc}$  la puissance de court-circuit doit être installée la batterie.

- Surintensité à l'essorage :

Le condensateur déchargé se comporte à la mise sous tension, comme un court-circuit pendant un très court instant.

Facteur à tenir en considération pour le réglage des protections.

- Sensibilité aux harmoniques :

Dans un réseau, la tension n'est jamais une sinusoïde pure; elle se décompose donc en une infinité d'harmoniques de fréquences multiples et d'amplitudes décroissantes au fur et à mesure que le rang augmente.

Le phénomène est surtout à considérer lorsque le réseau comporte des éléments statiques (résistances, inducteurs, condensateurs).

### Conséquences:

• Surintensités: L'impédance d'un condensateur ( $\frac{1}{C\omega}$ ) est d'autant plus faible que le rang d'harmoniques est élevé. Il s'exerce des surintensités harmoniques pour les condensateurs. La norme prévoit que les condensateurs peuvent tenir une surcharge permanente de 30% (qui correspond par exemple à celle due à une harmonique 3 dont l'amplitude est 10% du fondamental); en effet  $I = U_f C\omega + \frac{U_3}{10} \times 3C\omega = 1,3 U_f C\omega = 1,3 I_f$ .

### • Risque de résonance:

Les condensateurs forment avec le réseau avant un circuit parallèle d'impédance:

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{jL\omega} + \frac{1}{\frac{1}{jC\omega}} \Rightarrow |Z| = j \frac{L\omega}{1 - LC\omega^2}$$

$$|Z| \rightarrow \infty \text{ si } \omega \rightarrow \omega_0 = \sqrt{LC} = 2\pi f_0$$

$f_0$  étant la fréquence de résonance.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

### Annexe : C

Il faut préciser qu'il ya intérêt à employer autant que possible les lampes de fortes puissances dont la lumière est fournie dans des conditions plus économiques;

Le rapport de la puissance dissipée par le gaz de l'ampoule au rayonnement, lequel est proportionnel à la surface du filament, diminue lorsque le diamètre du filament croit; ce fait explique pourquoi les lampes à basse tension ont un meilleur facteur d'efficacité que les lampes de même puissance à tension plus élevée;

Ce qui montre le tableau suivant donne en guise d'exemple

Tableau 1. (Lampes à filament rectifié).

Puissance [W]	TENSION 127 V		TENSION 220 V	
	Flux lumineux [lm]	Efficacité lumineuse [lm/w]	Flux lumineux [lm]	Efficacité lumineuse [lm/w]
100	1400	14	1200	12
250	4300	17,2	3500	14
500	9600	19,2	8200	16,4
1000	20600	20,6	19700	19,7

tiré de: "Sources lumineuses." - MERRY COHU.

Tableau 2. constantes  $A_i$  et  $B_i$  qui entrent dans les formules donnant les lois de variation des paramètres des lampes à incandescence en fonction des variations de tension

constantes	Lampes à vide		Lampes à gaz.	
	25 à 60 W $\eta = 20 \text{ lm/W}$	40 à 50 W $\eta = 22,5 \text{ lm/W}$	60 à 150 W	200 à 500 W
$A_2$	0,346	1,425	1,663	1,607
$B_2$	3,513	3,685	3,613	3,384
$A_3$	0,023	0,057	0,057	0,083
$B_3$	1,5805	1,523	1,523	1,543
$A_4$	0,028	0,067	0,057	0,083
$B_4$	0,5805	0,523	0,523	0,543

$$\log [\phi/\phi_0] = A_2 \log [V/V_0]^2 + B_2 \log [V/V_0]$$

$$\log [w/w_0] = A_3 \log [V/V_0]^2 + B_3 \log [V/V_0]$$

$$\log [I/I_0] = A_4 \log [V/V_0]^2 + B_4 \log [V/V_0]$$

d'indice 0 désignant le nominal

$\phi$  [lumen]

$w$  [watt]

$I$  [Ampère]

Le tiré de : "Sources lumineuses" - NERRY COMU.

Tableau 3. Comparaison des différentes sources lumineuses.

TYPE	Watts	Vis/hz	Lumens initiaux	lumens/ watt	Description
Incandescent	100	1000	1380	13,8	Depole
	150	1500	2500	17,00	Depole
	150	2000	1900	12,60	Reflector
Fluorescent	20	18000	4155	67,75	Couleur blanc chaud
	40	18000	3200	80	Couleur blanc chaud
	34	15000	2800	82,35	Couleur blanc chaud
	40	18000	3200	80	Couleur blanc
	34	15000	2800	82,35	Couleur blanc
Vapeur de mercure	125	10000	6350	60,8	blanc de lune
	250	10000	12500	50	blanc de lune
	400	16000	22400	56	blanc de lune
Halogenure de metal	400	12000	34000	85	clair
	1000	8000	100.000	100	clair
Sodium haute pression	150	16000	16000	100	clair
	250	15000	25500	102	clair
	400	20.000	50000	125	clair
	1000	20.000	130000	130	clair
Sodium basse pression	35	18000	4800	137	clair
	55	18000	8000	145	clair
	90	18000	13500	150	clair
	135	18000	25000	185	clair
	180	18000	33000	183	clair

tiré de : "Guide technique" - Economie d'énergie.



## Annexe D

### Modes de régulation:

Les principaux modes de régulation utilisés sont:

- le vannage au refoulement
- le laminage à l'aspiration
- le réglage par aubes directrices ajustables
- la vitesse variable

L'étude qualitative de ces 4 types de réglage sera effectuée pour un fonctionnement lors du point nominal à débit réduit et à hauteur refoulee constante (Point B).

#### 1) Vannage au refoulement: (fig 3)

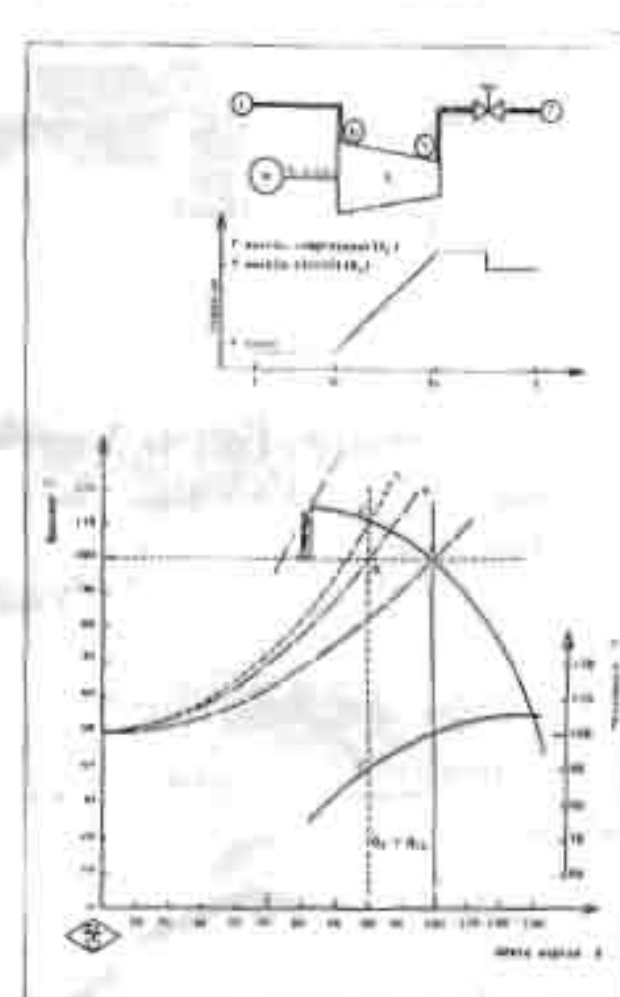
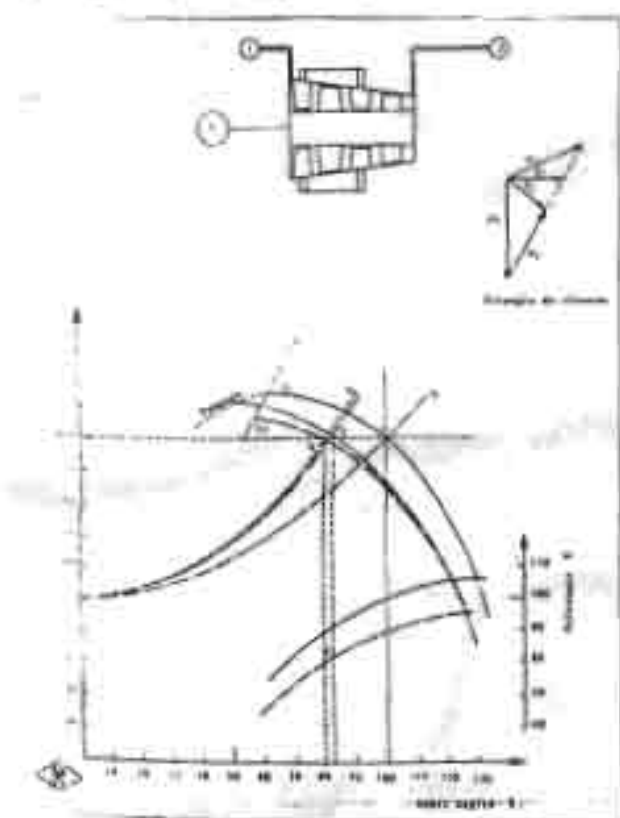
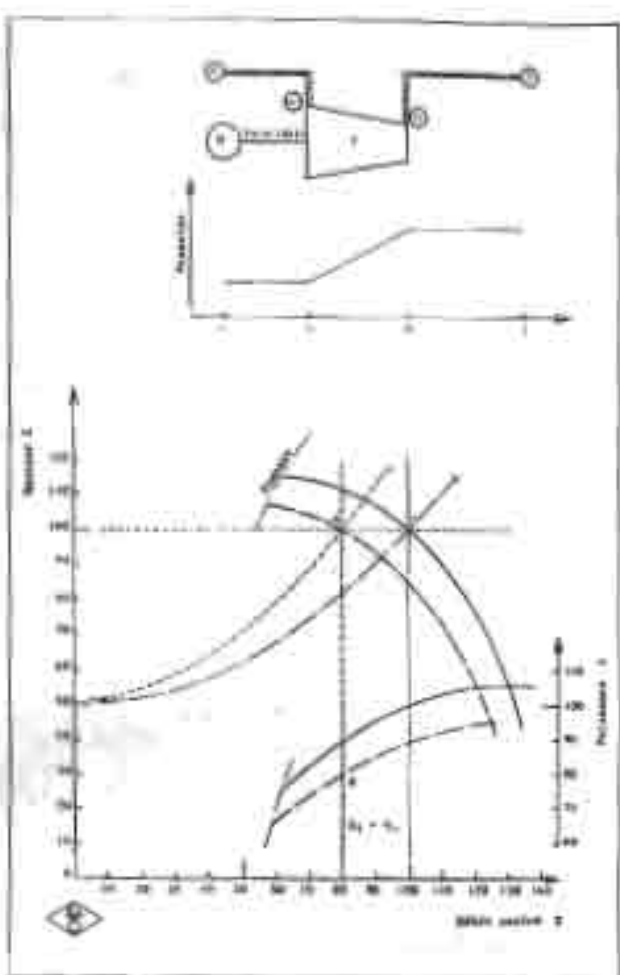
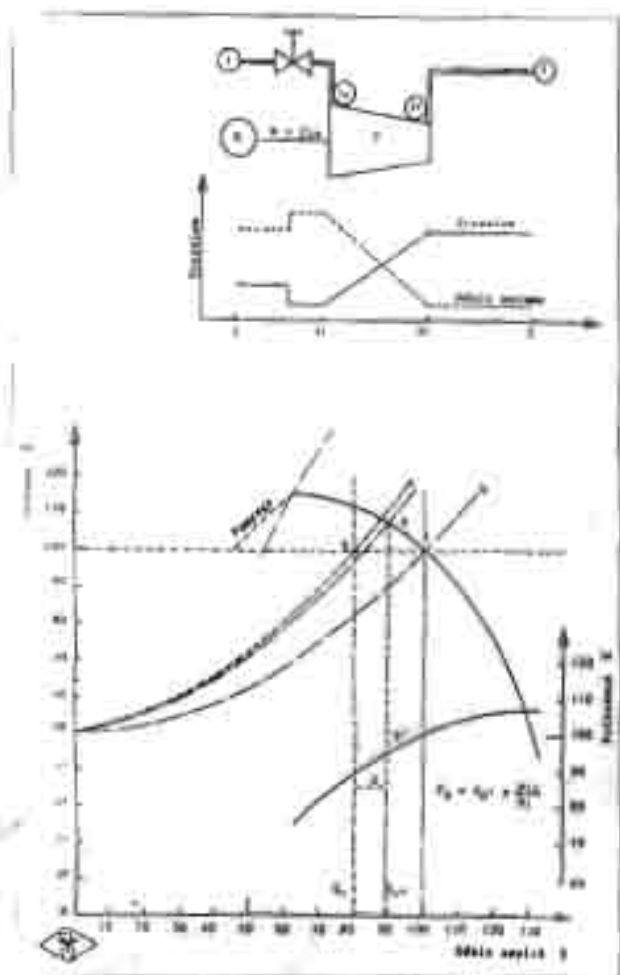
Pour réaliser le point B ( $H_B, Q_B$ ), on amène le compresseur au point de fonctionnement C de débit  $Q_C$  par changement de la caractéristique du circuit et on augmente l'énergie par vannage ou laminage de  $H_C$  en  $H_B$ .

#### 2) Laminage à l'aspiration: (fig 4)

Pour réaliser les conditions du point B ( $H_B, Q_B$ ), le compresseur fonctionne au point D de sa caractéristique, soit avec un débit volume supérieur du fait du laminage. Ce point est obtenu par changement de la caractéristique du réseau. La puissance consommée est inférieure à celle du point D' du fait que la pression d'entrée du compresseur  $P_{eC}$  est inférieure à  $P_2$ .

#### 3) Réglage par aubes directrices ajustables: (fig 5)

Pour réaliser les conditions du point B ( $H_B, Q_B$ ), le compresseur fonctionne au point E d'une nouvelle caractéristique machine. Ce



point E peut à la limite être confondu avec le point B si le laminage résultant du changement de calage du premier distributeur est négligeable, ce qui n'est généralement pas le cas, surtout si c'est une machine mouvantage : la puissance consommée est celle relative au point E de la nouvelle courbe de puissance.

#### 4) Vitesse variable (fig 6)

Pour réaliser les conditions du point B, on adapte la courbe caractéristique du compresseur par changement de la vitesse de rotation de façon à ce que l'intersection des courbes de friction mouvant machine et installation soit au B. C'est le mode de régulation le plus économique. La figure 7 est le résultat d'un étude comparative, qualitative et quantitative des 4 types de réglage présentés auparavant.

Pour un point de fonctionnement hors du point de dimensionnement de la machine, on peut le classer comme suit quant à l'économie d'énergie :

1. Vitesse variable
2. aubes directrices ajustables
3. laminage à l'aspiration
4. laminage au refoulement

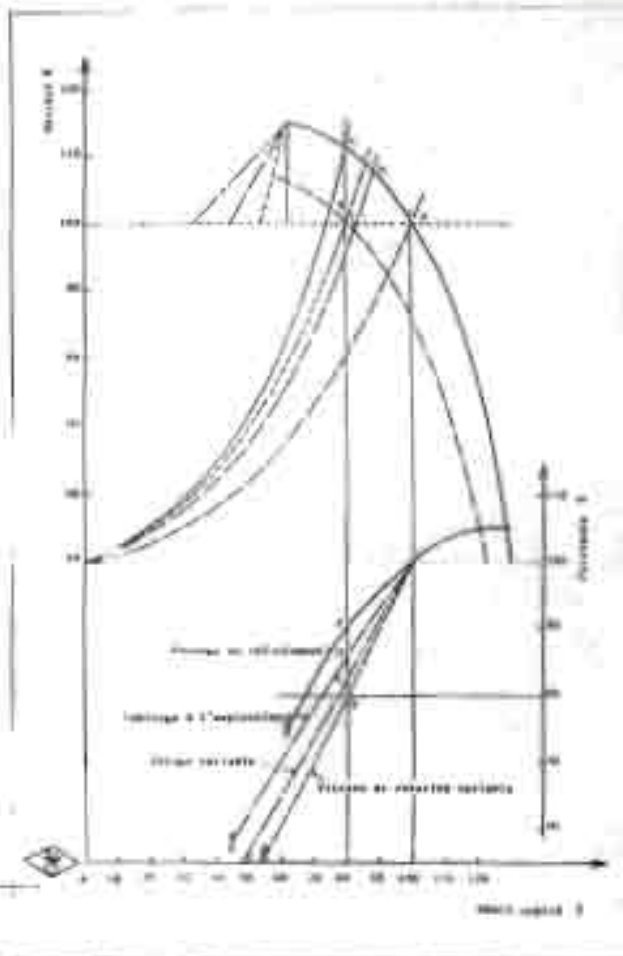


Fig. 7. Comparaison des puissances consommées.

# La variation de vitesse électronique

## Introduction

### Introduction

Le variateur électronique, basé sur l'emploi de semi-conducteurs, est l'un des procédés les plus modernes de variation de vitesse destiné aux moteurs électriques à courant continu ou alternatif.

Les performances techniques et technologiques des composants électriques actuels permettent de proposer à l'industrie des produits très adaptés et d'une grande fiabilité, parfaitement compétitifs avec les autres solutions existantes.

La variation électronique de vitesse répond à 2 types d'application:

- l'alimentation des moteurs à courant continu, obtenu par variation de la tension d'induit et éventuellement de la tension d'excitation (puissance constante).
- l'alimentation des moteurs à courant alternatif, de type asynchrone, obtenue par variation de la tension d'alimentation dans le cas des gradateurs, par la variation de la tension et de la fréquence, dans le cas des convertisseurs de fréquence, ou encore par la variation de la fréquence seule, en mode désexcité.

Ces techniques sont complémentaires: la variation de vitesse des moteurs à courant continu peut couvrir une plage de 1 à 100, voire plus, celle des moteurs à courant alternatif s'échelonne de 1 à 10, ou plus, leur emploi s'imposant là où les conditions d'environnement sont sévères.

A puissance égale, le moteur à courant continu est le plus onéreux, viennent ensuite le moteur asynchrone à bagues puis le moteur asynchrone à cage résistante enfin le moteur asynchrone à cage standard. Actuellement le coût d'un variateur à courant continu est équivalent à celui d'un gradateur, par contre, celui du convertisseur de fréquence est plus élevé, car il fait appel à une électronique beaucoup plus sophistiquée.

Le choix du couple moteur-variateur reste donc lié aux performances souhaitées, en fonction des contraintes d'utilisation (cf tableau ci-dessous)

Fonction recherchée	Gamme de vitesse	Moteur		Type de Variateur
		standard	spécial	
Démarreur		asynchrone		gradateur
Variateur	1 à 3*	asynchrone à bagues	asynchrone à cage résistive	gradateur
Variateur	1 à 10	asynchrone		convertisseur de fréquence
	1 à 100		synchrone	- Id -
Régulateur	1 à 100	moteur à courant continu		régulateur de vitesse

\* Cette gamme atteint 1 à 20 par variation de la tension statique ou par variation du courant rotorique

# La variation de vitesse électronique

## Procédés de variation de vitesse

### Procédés de variation de vitesse

D'autres procédés de variation sont utilisés

Dans l'univers industriel, le variateur électronique de vitesse côtoie d'autres procédés issus de technologies hydraulique, mécanique ou électromécanique.

Le choix de la technique la plus appropriée est lié aux caractéristiques de la machine à équiper et aux performances attendues.

Dans cette optique, il est primordial d'analyser l'ensemble machine-moteur et variateur afin de définir le meilleur MOTO-VARIATEUR.

La position du variateur par rapport au moteur constitue l'une des principales distinctions entre les moto-variateurs mécaniques et électroniques, selon les critères ci-après :

#### Moto-variateur mécanique



#### Moto-variateur électronique



Les procédés les plus fréquemment rencontrés sont les suivants :

**Motovariateur hydraulique :** Il se compose, dans un même bâti, d'une pompe et d'un moteur hydrauliques. La variation de vitesse est obtenue par le réglage du rapport entre le débit de la pompe et le débit absorbé par le moteur. Les réglages de la pompe et du moteur sont dissociés ce qui offre une grande gamme de vitesse (1 à 10 environ) par contre la reprise est lente et le rendement mauvais.

**Motovariateur mécanique :**

- A poulies et courroies.
- A chaînes et poulies à gorge.

La variation de vitesse est obtenue par la modification de diamètre des poulies (gamme de vitesse de 1 à 6).

**Motovariateur :**

- A friction à bagues.
- A plateaux et galets.

Dans le premier cas, l'arbre moteur porte un disque d'entraînement en contact avec une bague à friction en matière synthétique soudure de l'arbre de sortie.

Dans le deuxième cas, ces galets sont insérés entre les plateaux d'entrée et de sortie.

Le réglage de leur positionnement permet d'obtenir la variation de vitesse (gamme de vitesse 1 à 6).

- A talles.

# La variation de vitesse électronique

## Procédés de variation de vitesse

D'autres procédés de variation de vitesse, sont utilisés:

**Coupleur à courant de Foucault:**

Dans ce coupleur se produit un glissement entre l'arbre moteur et l'arbre d'utilisation, ce qui crée la variation de vitesse (gamme de vitesse 1 à 15).

**Coupleur à poudre:**

Dans ce coupleur, le glissement résulte de l'hétérogénéité de la poudre magnétique située entre les deux rotors (gamme de vitesse 1 à 5).

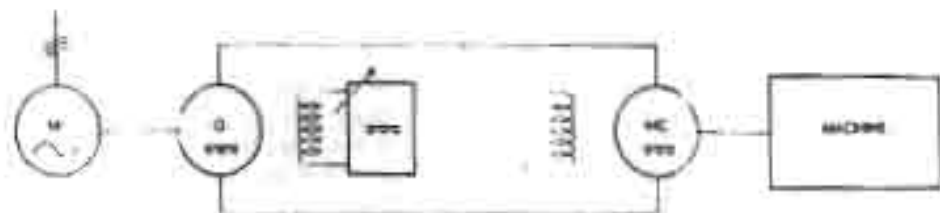
**Moteur à décalage de balais:**

C'est un moteur asynchrone à vitesse de construction spéciale, comportant les circuits qui permettent par déplacement des balais autour du collecteur, de fonctionner à vitesse variable (gamme de vitesse 1 à 3).

**Groupe WARD-LEONARD:**

Ce groupe se compose:

- D'un moteur asynchrone d'entraînement (ME) à vitesse pratiquement fixe
- D'une génératrice (G) liée mécaniquement au moteur d'entraînement
- D'un moteur à courant continu (MC) alimenté par la génératrice



La vitesse du moteur (MC) est liée à la tension délivrée par la génératrice (G), qui elle-même est liée à son excitation. Dans ce cas, la variation de vitesse est directement liée à la variation du courant d'excitation de la génératrice.

**Groupe tournant**

Ce groupe se compose:

- D'un moteur d'entraînement (ME) à vitesse variable (par variation de vitesse mécanique ou électronique)
- D'un alternateur (A) lié mécaniquement au moteur d'entraînement
- D'un ou plusieurs moteurs à courant alternatif (MA) raccordés à distance, à l'alternateur



La vitesse du ou des moteurs (MA) est liée à la tension et à la fréquence délivrées par l'alternateur, ce qui est elle-même liée à la vitesse de celui-ci, donc, du moteur d'entraînement (ME).

# La variation de vitesse électronique

## Rappels techniques et pratiques

### Rappels techniques et pratiques

#### Unités:

Système international SI

M = masse : m (kg)

L = longueur : l (m)

T = temps : t (s)

#### Mécaniques:

##### Cinématique:

Longueur: L

Angle: grandeur sans dimension

$\Theta$  en radian, avec  $\Theta = \frac{\theta}{r}$

Vitesse:  $LT^{-1}$

$$v = \frac{dl}{dt} = \frac{l}{t} \quad \text{en m/s}$$

Vitesse angulaire:  $T^{-1}$

$$\omega = \frac{d\Theta}{dt}$$

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} \quad N \text{ en tr/min}$$

$$v = \frac{l}{t} = r\omega$$

$\omega$  en rad/s

Accélération:  $LT^{-2}$

$$a = \frac{dv}{dt} \quad \text{en m/s}^2$$

Accélération:  $T^{-2}$

$$\gamma = \frac{d\omega}{dt} \quad \text{en rad/s}^2$$

##### Dynamique

Force:  $MLT^{-2}$

$$F = m\gamma \quad \text{en N (Newton)}$$

Travail:  $ML^2T^{-2}$

$$W = F \times l \quad \text{en J (Joule)}$$

Couple:  $ML^2T^{-2}$

$$C = F \times r \quad \text{en mN}^2$$

(N.m)

Couple de mise en mouvement

$$C = J \frac{d\omega}{dt}$$

J = moment d'inertie en  $kgm^2$

Travail:  $ML^2T^{-2}$

$$W = C\Theta \quad \text{en J (Joule)}$$

Puissance:  $ML^2T^{-3}$

$$P = \frac{W}{t} = \frac{Fl}{t} = Fv \quad \text{en W (Watt)}$$

$$1 \text{ Watt} = 1 \text{ Joule}$$

seconde

Puissance:  $ML^2T^{-3}$

$$P = \frac{C\Theta}{t} = C\omega$$

$$= C \frac{2\pi N}{60}$$

##### Energie

L'énergie cinétique est caractérisée par la vitesse du corps

$$W = 1/2 mv^2$$

$$W = 1/2 m r^2 \omega^2 = 1/2 J \omega^2$$

Dans certains textes C est maladroitement exprimé en Nm



# La variation de vitesse électronique

## Rappels techniques et pratiques

Anciennes unités:

Force: 1 kgp = 9,81 N  $\approx$  environ 10N  $\approx$  1 daN

Travail: 1 kpm = 9,81 mN = 9,81 J

Puissance: 1 kpm/s = 9,81 mN/s = 9,81 J/s = 9,81 W

1 ch = 75 kpm/s = 75 x 9,81 = 736 W

Couple: 1 m.kgp = 9,81 m.N

Autres rappels:

Moment d'inertie J en kg.m<sup>2</sup>:

$$J = mr^2 = \frac{mD^2}{4}$$

M = masse

m = masse kg

r = rayon de giration

D = diamètre

L'inertie d'un disque patiné en mD<sup>2</sup>, dans ce cas, il faut diviser par 4 pour avoir la valeur de J

Le moment d'inertie J1, tournant à une vitesse N1, rapporté à un autre tournant à une vitesse N2, a pour valeur:

$$J2 = J1 \left(\frac{N1}{N2}\right)^2$$

Rayon de giration

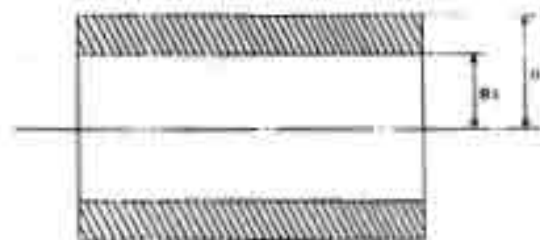
Cylindre plein:  $r^2 = \frac{R^2}{2}$

R = rayon cylindre

r = rayon de giration

soit r = 0,707 R

Cylindre creux:  $r^2 = \frac{R1^2 + R2^2}{2}$



$$\text{soit } J = mr^2 = m \frac{R1^2 + R2^2}{2}$$



### Applications aux machines

#### Fonctionnement au démarrage et à l'arrêt:

La machine accouplée au moteur présente essentiellement un moment d'inertie  $J$  ( $\text{kg.m}^2$ ) auquel il faut ajouter celui du moteur, parfois important. Il permet l'étude des régimes transitoires : démarrages et arrêts, mais n'intervient pas en régime établi.

#### Mouvement de rotation:

Si la machine est entraînée par l'intermédiaire d'un réducteur à la vitesse  $N1$ , son moment d'inertie ramené au moteur tournant à la vitesse  $N2$  s'exprime par la formule:

$$J \text{ (mach ramené au moteur)} = J \text{ (mach)} \left(\frac{N1}{N2}\right)^2$$

#### Mouvement de translation:

Si la machine entraînée, de masse  $m$  ( $\text{kg}$ ), se déplace à la vitesse linéaire  $V$  ( $\text{m/s}$ ), pour la vitesse de rotation  $\omega$  ( $\text{rads}$ ) du moteur d'entraînement, le moment d'inertie au niveau de l'axe d'entraînement s'exprime par la formule:

$$J \text{ (mach)} = m \frac{V^2}{\omega^2} = m \frac{V^2}{\omega^2} \cdot \frac{60}{2\pi N} \quad \text{avec } \omega = \frac{2\pi N}{60}$$

#### Démarrage:

Démarrage



Pour démarrer dans un temps imposé (passage de l'arrêt à une vitesse angulaire  $\omega$ ), la connaissance du moment d'inertie ( $J$ ) permet de déterminer le couple accélérateur.

$$C_a \text{ (Nm)} = J \text{ (kg.m}^2) \frac{d\omega \text{ (R/s)}}{dt \text{ (s)}}$$

$$= J \text{ (kg.m}^2) \frac{2\pi \cdot N \text{ (tr/mn)}}{60 \text{ (s)}}$$

Le couple accélérateur et le couple résistant déterminent le couple moteur nécessaire au démarrage.

$$C_d = C_r + C_a$$

#### En pratique:

- en courant continu

$$C_d = k C_n \quad \text{ou } C_d = C_{\text{couple maximal moteur}}$$

$k$  = Coefficient de surcharge du moteur. Il est lié au temps de surcharge et à la température.  $k$  est généralement compris entre 1,2 et 1,4 (voir caractéristique Constructeur moteur).

- en courant alternatif

Se référer aux caractéristiques de couple et de puissance données par le constructeur constructeur.

#### Arrêt:

Arrêt moteur



Si la machine est laissée indifféremment à la coupure (il la fonction stabilisée), le couple est instantanément égal au couple résistant.

$$C_a = C_r = J \frac{d\omega}{dt}$$

L'arrêt se produit au bout d'un temps ( $t$ ) lié au moment d'inertie.

$$t = \frac{J}{C_r} \omega$$

Freinage



Sens d

Freinage

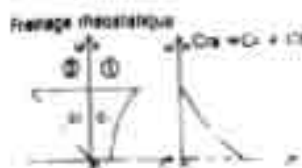


# La variation de vitesse électronique

Applications aux machines

g (m/s)  
vitesse

sur l'axe  
l'axe



Si ce temps est insuffisant, il faut augmenter le couple de ralentissement d'un couple de freinage électrique  $C_f$  tel que  

$$C_{ra} = C_r + C_f - J \frac{dn}{dt}$$

Le freinage peut être du type rhéostatique; se rappeler toutefois que son efficacité est proportionnelle à la vitesse ( $C_f = kn$ ).

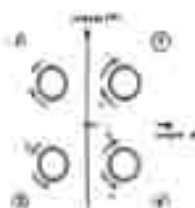
Le sens  
de rotation  
l'axe

## Sens de fonctionnement

Le croquis ci-dessous montre les 4 possibilités de fonctionnement (4 quadrants) dans le plan couple vitesse.

Les 4 possibilités de fonctionnement sont résumées dans le tableau.

Le sens  
de rotation  
l'axe



1er sens  
de rotation

en moteur  
en générateur

Couple C	vitesse n	Produit C x n	Quadrant
+	+	+	I
-	+	-	II
-	-	+	III
+	-	-	IV

2e sens  
de rotation

en moteur  
en générateur

# La variation de vitesse électronique

## Moteurs à courant continu

### Moteurs à courant continu

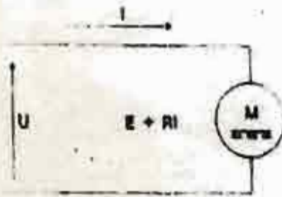


Fig. 1

Alimenté en courant continu ou redressé, sous une tension  $U$ , le moteur réagit en opposant une force contre-électromotrice  $E$  telle que:

$$E = U - RI$$

$RI$  représente la chute ohmique interne de l'induit.

#### Vitesse:

La f.c.e.m.  $E$  est liée à la vitesse et à l'excitation par la relation:

$$E = k\omega\Phi$$

où  $k$  représente une constante propre au moteur,  $\omega$  la vitesse et  $\Phi$  le flux. On voit qu'à excitation constante, la f.c.e.m.  $E$ , proportionnelle à  $\omega$  est une image de la vitesse.

#### Couple:

Le couple du moteur a pour expression:

$$C = k\Phi I$$

à excitation constante, le couple  $C$  est proportionnel à l'intensité.

En maintenant la tension d'alimentation constante, la vitesse du moteur varie en fonction de la charge (excitation constante). Ce sont des courbes classiques des moteurs à excitation shunt ou séparée.

L'alimentation à partir du réseau par l'intermédiaire d'un variateur à thyristors permet:

- de contrôler la vitesse par régulation de la tension d'alimentation permettant de compenser la chute  $RI$
- de contrôler le couple par contrôle de l'intensité pendant le démarrage

Exemple

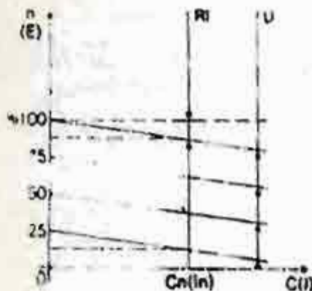


Fig. 2

#### Puissance:

À vitesse  $\omega$  et couple  $C$  la puissance fournie par le moteur a pour expression:

$$P = C\omega$$

#### Forme de courant:

Lorsqu'il s'agit d'un variateur à thyristors, le courant traversant le moteur est un courant pulsé présentant:

- une valeur moyenne:  $I_m$
- une valeur efficace:  $I_{eff}$
- une valeur crête:  $I_c$

## Moteurs à courant continu

Le courant moyen  $I_m$  produit le couple.

Le courant efficace  $I$  est provoqué l'échauffement de tout le circuit concerné

- contacteur de commande
- variateur.
- relais de protection,
- moteur,
- connexions.

Le courant de crête  $I_c$  affecte la commutation du moteur. Il est de l'ordre de 3 fois le courant moyen  $I_m$ .

Le facteur de forme a pour valeur:

$$F = \frac{I_{\text{eff}}}{I_m}$$

Il est pour un pont motor monophasé, voisin de 1,1.

### Exemple

On a à commander un mélangeur présentant un couple  $C = 10 \text{ mNm} = 0,01 \text{ Nkg}$  constant dans une gamme de vitesse de 350 à 3000 tr/min

Compte tenu de l'entraînement mécanique, on souhaite avoir le couple de démarrage à 1,3 m.N. Le moteur doit être fixé, patte au mur, en position verticale, l'axe d'arbre vers le bas. L'ambiance est propre. Le réseau d'alimentation est de 380 V monophasé.

Definition du moteur et de son relais de protection

Puissance mécanique nécessaire:

$$P = 10 \times 2\pi \times \frac{3000}{60} = 3140 \text{ Watts soit } 3,1 \text{ kW}$$

Le rendement d'un moteur de 3,1 kW étant environ de 0,83, le courant d'induit moyen en régime établi sera, pour une tension d'induit de 280 V:

$$I_m = \frac{3100}{0,83 \times 280} = 13,3 \text{ A}$$

$$I_{\text{eff}} = F \times I_m, \text{ d'où} \\ = 1,5 \times 13,3 = 19,9 \text{ A}$$

Ce qui conduit à choisir un relais thermique réglé 20 A.

Pour approvisionner le moteur, il est important de préciser:

- Moteur pour courant pulsé
- Réseau 380 V monophasé
- Puissance 3,1 kW
- Vitesse 3000 tr/min
- Tension d'induit 280 V
- Tension d'inducteur 190 V
- Gamme de vitesse de travail 350 à 3000 tr/min
- Degré de protection IP 27
- Montage à patte - Axe vertical vers le bas.

# La variation de vitesse électronique

Moteurs à courant continu

Moteurs :

Définition du variateur associé:

Le couple de démarrage choisi, fixe le rapport  $k$

$$k = \frac{C_d}{C_n} = \frac{13}{10} = 1.3$$

Le courant d'induit moyen maximum admissible devient:

$$I_{\max} = I_m \times k = 13.3 \times 1.3 = 17.5 \text{ A}$$

Le choix du calibre du variateur se portera sur celui qui sera le plus proche, par excès, de cette valeur, sachant que la limitation d'intensité devra être réglée à 17.5 A afin de ne pas autoriser d'a coups de démarrage supérieur à 1.3.

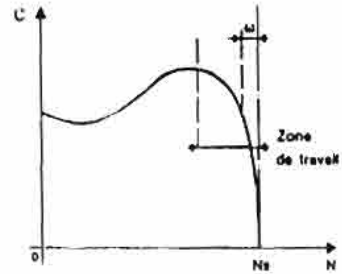
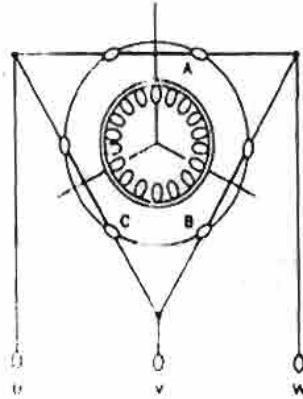
Compte-tenu du moment d'inertie du malaxeur  $0.07 \text{ m}^2 \text{ kg}$  et du moteur  $0.045 \text{ m}^2 \text{ kg}$ , le temps nécessaire pour atteindre la vitesse de 3000 t/mn sera de:

$$t = \frac{J \times 2\pi \times N}{60 \times C_n} = \frac{0.115 \times 2\pi \times 3000}{60 \times (13 \cdot 10)} = 12 \text{ sec}$$

# La variation de vitesse électronique

## Moteurs asynchrones

### Moteurs asynchrones



Pour un moteur asynchrone, en fonction de la vitesse, le couple varie comme le carré de la tension.

$$(1) C = k_0 \frac{\Phi^2 R \omega g}{R^2 + L^2 \omega^2 g^2}$$

$$\text{soit } C = K \Phi^2$$

L - inductance rotor

R - résistance rotor

$\omega g = \omega - \omega_r$

$\omega g$  - vitesse angulaire du champ par rapport au rotor

$\omega$  - vitesse angulaire du synchronisme.

$\omega_r$  - vitesse angulaire du rotor.

g - glissement

Si: U - k f et  $\omega g$  - constant

le  $\Phi$  est proportionnel à U

d'où C - k U<sup>2</sup>

Le couple max, pour une fréquence donnée, est d'autant plus faible que la tension statorique est faible.

Le couple croît, passe par un maximum et s'annule à la vitesse du synchronisme. Le couple maximum est défini à partir de (1). Divisons par R  $\omega g$  le second membre:

$$C = K_0 \frac{\Phi^2}{\omega g \left( \frac{R}{\omega g} + L^2 \omega g \right)}$$

Le produit des deux termes du nouveau dénominateur est constant, le dénominateur est minimum et le couple est maximum quand:

$$\frac{R}{\omega g} = L^2 \omega g \quad \text{soit } R^2 = L^2 \omega^2 g^2 \quad \text{ou } \omega g = \frac{R}{L}$$

La valeur maximale devient:

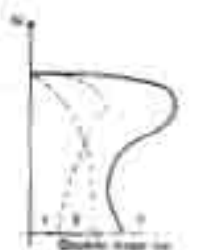
$$C = k_0 \frac{\Phi^2}{2L} \quad \text{qui est indépendante de } \omega g \text{ et de } R.$$

Au-delà de la fréquence correspondant au couple maximal le fonctionnement du moteur est stable, en deça le moteur décroche.

# La variation de vitesse électronique

## Moteurs asynchrones

La caractéristique couple-vitesse des moteurs asynchrones à simple cage (voir courbe), présente un faible couple de démarrage. C'est le cas des machines anciennes.



- Doublé cage ou encoches profondes :
- 1 Courte de 6 à 10 mm profondeur
  - 2 Coupe de 4 à 10 mm profondeur
  - 3 Coupe de 6 à 10 mm profondeur
  - 4 Coupe de 10 mm

Détails de construction :



Simple cage



Double cage



Encoches profondes

Pour améliorer le couple de démarrage, les moteurs modernes disposent de rotor à double cage ou 3 encoches profondes. C'est par exemple, les moteurs utilisés sur les convertisseurs de fréquence.

Les moteurs à cage résistante sont particulièrement utiles là où la vitesse de rotation est relativement faible. C'est le cas des ventilateurs, pompes, etc. des applications.

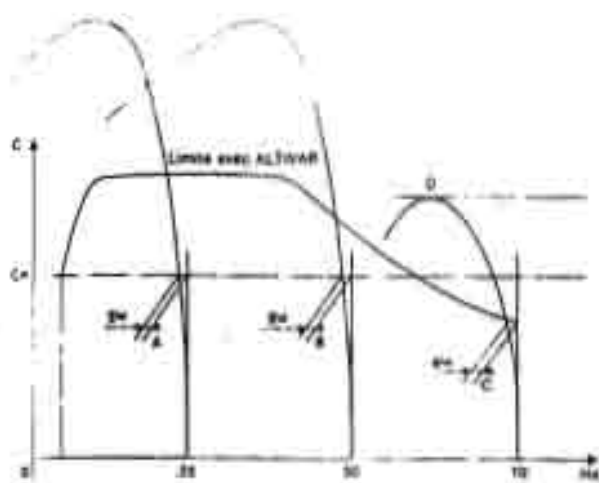
Alimenté à partir d'un convertisseur de fréquence, le comportement d'un moteur asynchrone à une charge constante, est le suivant :

de 5 à 50 Hz,

la tension d'alimentation a un rapport  $U = k f$

# La variation de vitesse électronique

## Moteurs asynchrones



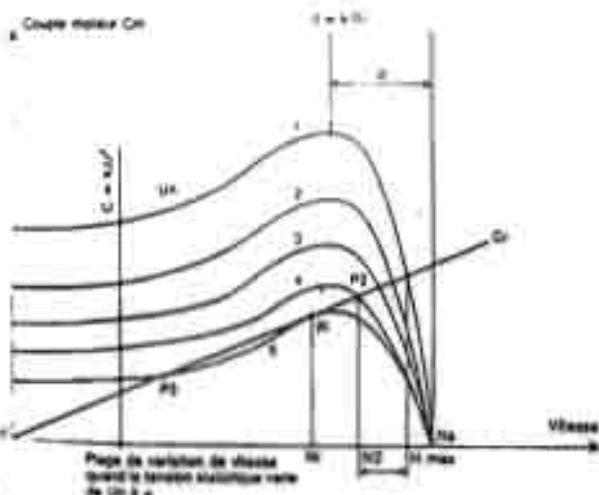
De ce fait, le flux et le nombre de "tours glissés" - qui restent constants, il s'ensuit que les caractéristiques de couple, en fonction de la fréquence, restent parallèles à celle à 50 Hz.

Au-delà de 50 Hz,

la tension  $U$  n'augmente plus, le flux décroît dans un rapport  $\frac{1}{50}$ , ce qui entraîne deux conséquences :

- au courant nominal, le glissement restant constant, le nombre de "tours glissés" qui augmente dans un rapport  $\frac{1}{50}$
- le couple disponible diminue dans un rapport  $\frac{50}{1}$

Par ailleurs, le couple maximal diminue dans un rapport de  $\frac{50}{1}$



Par réduction de la tension statorique, le couple disponible diminue, le fonctionnement évolue sur des caractéristiques à couple décroissant telles que celles que l'on a représenté de 1 à 5.

Par exemple, passant de  $n_1$  à  $n_4$ , la vitesse diminue de  $N$  maximum à  $N_2$ .

Au-delà, il y a risque de décrochage car en 5 le fonctionnement possible en P1 est à la limite de l'instabilité.

Le moindre supplément de  $C_r$  entraîne une amorce de chute de vitesse. Le couple moteur  $C_m$  devient plus petit que celui du couple résistif  $C_r$ , ce qui a pour conséquence d'accroître la chute de vitesse jusqu'à P3, où  $C_m$  redevient égal à  $C_r$  et où le moteur se stabilise.

Ces possibilités de fonctionnement peuvent être évitées en utilisant des artifices (1) qui ont pour effet d'obtenir le couple maximum du moteur à une fréquence très basse.

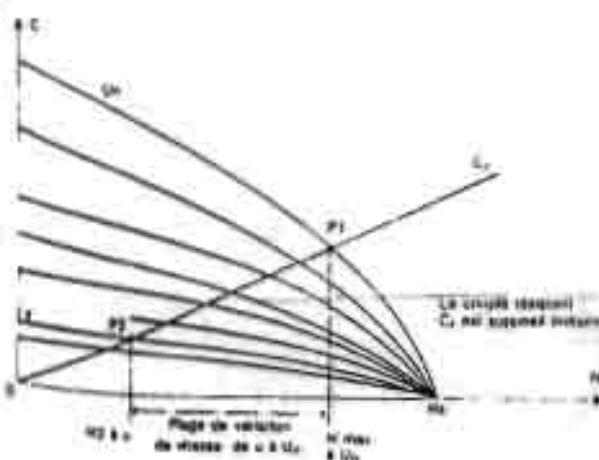
Comme  $C_{max}$  est obtenu pour  $\omega_r = \frac{R}{L}$ , il suffit d'augmenter

la résistance rotorique  $R$  pour accroître  $\omega_r$ , vitesse angulaire des champs par rapport au rotor, ce qui a pour conséquence d'augmenter le glissement donc la zone de stabilité de fonctionnement du moteur.

Les moyens les plus courants sont :

- par usage d'un moteur à cage résistante
- par usage d'un moteur à rotor bobiné avec résistances rotoriques à l'extérieur et convenablement ventilé.

Ces moyens sont principalement utilisés avec les gradateurs quand ils sont utilisés en variateur de vitesse.





# La variation de vitesse électronique

## Moteurs asynchrones

### Exemple

Soit à commander un ventilateur, à vitesse variable, de débit maximal 50 000 m<sup>3</sup>/m, sous Circuit  
pression de 245 Pascal à 3000 tours/rev, avec un rendement de 0,68

#### Définition du moteur

l'usurateur (deux fois) par le ventilateur

$$P_u = Q \times M \times P$$

Q - Débit d'air en m<sup>3</sup>/s

M - Masse de l'air en kg/m<sup>3</sup>

P - Pression en Pascal ou N/m<sup>2</sup>

$$P_u = \frac{50\,000 \times 1,293 \times 245}{3600 \times 0,68} = 6470 \text{ W}$$

#### Définition du variateur

L'emploi d'un convertisseur de fréquence type ALTIVAR pour alimenter le moteur, amène  
déclassement de 0,8 à la vitesse considérée

$$P_m = \frac{P_u}{0,8} = \frac{6470}{0,8} = 8087 \text{ W}$$

soit un moteur normalisé de 9 kW.

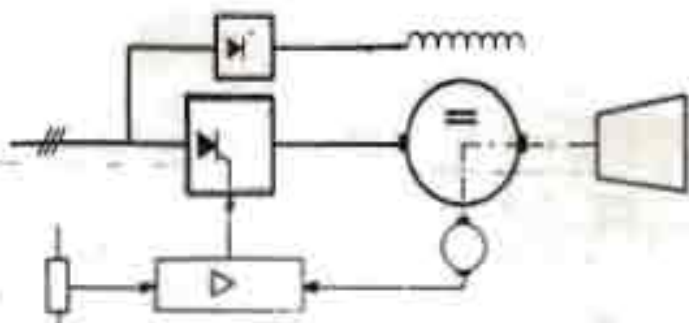
Le choix du calibre du variateur se portera sur celui qui sera le plus proche, par excès, soit  
cet exemple, un ALTIVAR de 11 kW référencé VP3-FK501.

Le dioc



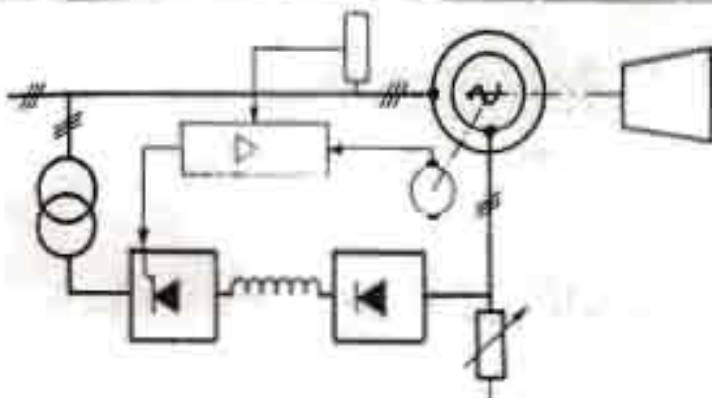
Le thyri





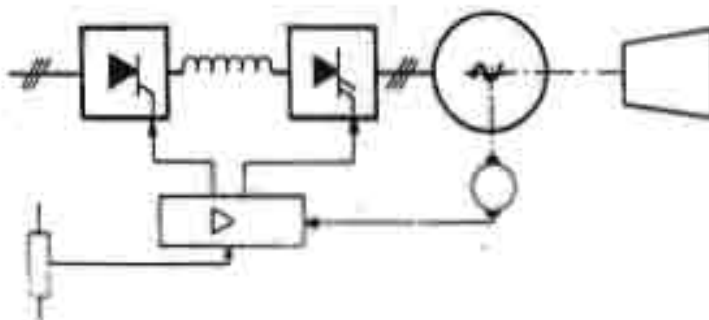
MOTEUR A COURANT CONTINU  
AVEC REDRESSEUR CONTROLÉ

Critère de choix: solution  
la plus simple



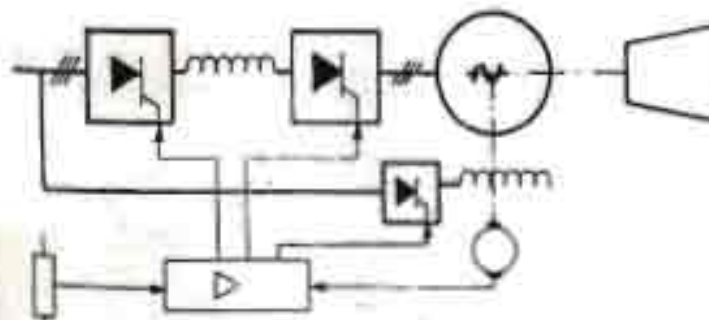
MOTEUR ASYNCHROME A BAGUES  
AVEC CASCADE HYPOSYNCHRONÉ

Critère de choix: le moteur  
existe déjà



MOTEUR ASYNCHROME A CAGE  
AVEC REDRESSEUR-COMMUTEUR

Critères de choix:  
-Puissances moyennes  
-Performances Puissance/  
vitesse  
-Environnement dangereux  
ou agressif (immérgé)



MOTEUR SYNCHROME AUTOPILOTE  
AVEC REDRESSEUR-ONVULTEUR

Critères de choix:  
-Moyennes et grandes  
puissances  
-Performances Puissance/  
vitesse  
-Environnement dangereux  
-Alimentation MT

Fig. 17 Principales solutions d'alimentations électriques à vitesse variable.

Avec la cascade hyposynchrone, des limitations semblables consécutives à la présence des bagues apparaissent: pratiquement la vitesse sera limitée à 1500 tr/mn, la puissance pouvant varier entre 300 kW - 400 kW jusqu'à plusieurs MW; cette limitation de puissance, au moins en valeur basse étant surtout de nature économique; cette solution parfaitement adaptée à des couples résistants en  $K \cdot N^2$  avec plage de va-

riation de vitesse réduite (1 à 2) apparaît intéressante dès lors que le moteur à bagues existe déjà.

Il convient d'obtenir avec les entraînements à fréquence variable avec moteurs alternatifs une «capacité» dimensionnelle supérieure à celle de la solution continue sans en avoir la limitation fonctionnelle.

## References et Bibliographie:

### Volumes:

- A. FOUILLE , Electrotechnique à l'usage des ingénieurs,  
10<sup>e</sup> édition , Tome 1 ; 297 pages  
Tome 2 ; 375 pages  
Tome 3 ; 235 pages  
ed. Dunod . 1975
- A. GUILBERT . Circuits magnétiques à flux alternatif  
Transformateurs - théorie fonctionnement et  
calcul ; ed. Nathan et Cie , 303 pages, 1973
- MERRY COHU , Sources lumineuses , ed Nathan et Cie ,  
126 pages . 1966
- BERNARD BAUDIN , Le Gestion de l'énergie dans l'entreprise  
ed. Entreprise moderne d'édition , 157 pages , 1977
- TECHNIQUES DE L'INGENIEUR . D. 2 U , Matériaux -  
conducteurs et isolants .  
situation de Juin 1983
- FINK & CARROLL , Standard Handbook for Electrical  
Engineers , ed. Mc Graw-Hill  
Book Company , 7<sup>th</sup> edition , 1969
- R. Palumbo . Le système d'Énergie Électrique  
Grand Traités , Tome 13 .  
Édition 1970 (Ciba, Berne, Kluwer)

## Catalogues et Revues :

- TELEMECANIQUE : la variation de vitesse électronique - ouvrage à l'usage des enseignants, 155 pages, 1986.
- Facon : Catalogue d'électricité, 513 pages, 1979.
- MERLIN GERIN : cahier technique - CFP stage G
- MERLIN GERIN : guide de l'installation électrique, 156 pages, Tauverex 1982.
- SILEC : catalogue général - Département Câbles électriques, 190 pages, 1980.
- Westinghouse - Selecteur aclair : Appareillage électrique d'installation, 326 pages, 15<sup>e</sup> édition, 1980.
- PHILIPS - philips lumière, 33 pages, 1982.
- Revue Générale de l'électricité (RGE), Tome 88 - n° 5, mai 1979.
- ANNEXE "TARIFICATION" : Au cahier des clauses et conditions générales du service public de l'électricité mis à jour le 30/8/85.