

Chapitre 3

Calcul de la charge électrique au niveau des entreprises industrielles

1. Introduction :

Le calcul de la charge électrique est une étape importante dans le dimensionnement d'un réseau électrique. En effet, le choix de l'alimentation (moyen de production ou les postes de transformations), les équipements de transport électrique (et/ou de la distribution) et de protection dépendent de ce calcul. Dans le cas d'une installation industrielle, ce calcul permet de choisir la tension, la section et la configuration optimale d'alimentation en énergie électrique.

Nous présentons dans ce chapitre les différentes méthodes utilisées pour le calcul de la charge électrique.

2. Puissance actives, réactive et apparente :

En courant continu, la puissance électrique **P** d'un récepteur a pour valeur :

$$P = V I \quad (1)$$

Si **P** est exprimée en watts (**W**), nous avons **V** en volts (**V**) et **I** en ampères (**A**).

En courant alternatif **V** et **I** varient avec le temps. Leurs valeur instantanée étant **v** et **i**, on peut définir une puissance instantanée **p(t) = v(t) i(t)**.

La puissance instantanée ne caractérise pas le courant alternatif, on est conduit à définir une valeur moyenne de cette puissance, encore appelée puissance active ou réelle.

Puissance actives ou réelle :

En courant alternatif et en monophasé, la puissance active (ou réelle) **P** d'un récepteur a pour valeur :

$$P = V I \cos(\varphi) \quad (2)$$

où :

V : tension efficace aux bornes du récepteur ;
I : courant efficace parcourant le récepteur ;
cos(φ) : facteur de puissance du récepteur.

Note : en réseau triphasé, la puissance active d'un récepteur est donnée par : **P = √3 U I cos(φ)** où **U** est la tension entre phases (tension composée).

La puissance active est mesurée avec un wattmètre. C'est la puissance consommée (payée).

2.2. Facteur de puissance :

Le facteur de puissance, ou $\cos(\varphi)$, est fonction du décalage de l'intensité par rapport à la tension. Il est toujours inférieur à 1 sauf pour une résistance pure où il est égal à l'unité.

Dans le cas d'un circuit purement résistif, la tension V (aux bornes d'un récepteur) est en phase avec le courant I (traversant ce même récepteur), voir figure ci-dessous. Dans ce cas, $\cos(\varphi) = 1$.

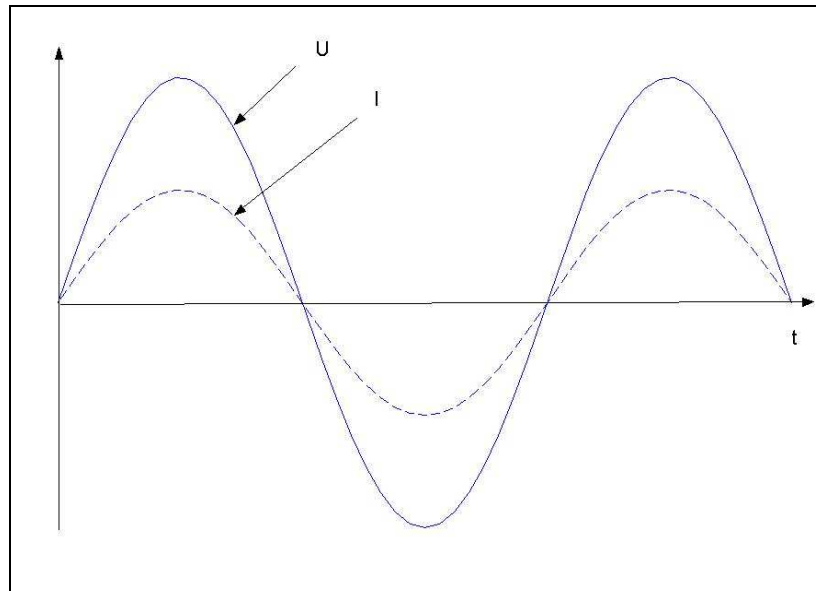


Fig.1. Circuit purement résistif.

L'existence d'une inductance (cas des moteurs par exemple) provoque un retard de phase de l'intensité sur la tension, voir figure ci-dessous.

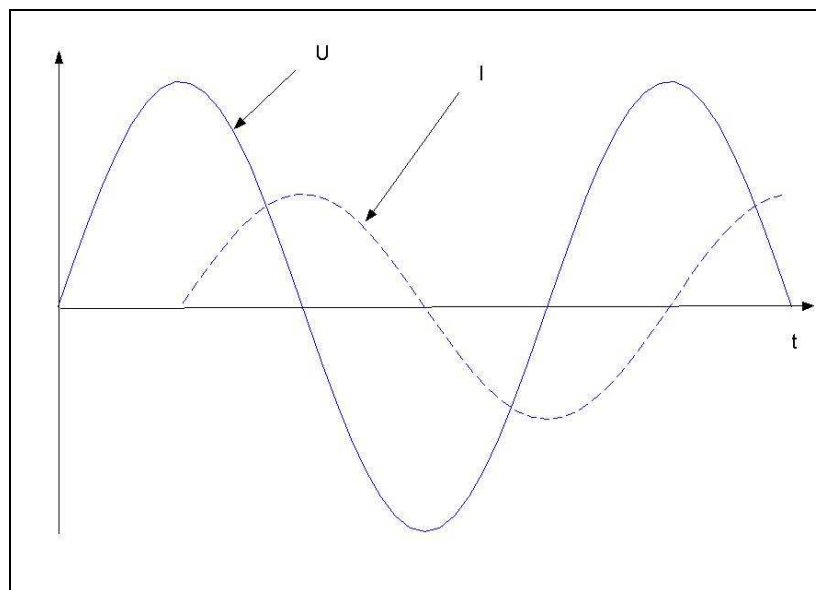


Fig.2. Circuit résistif et inductif.

Dans un circuit comprenant des résistances non inductives et des condensateurs, l'intensité est en avance sur la tension, voir figure ci-dessous.

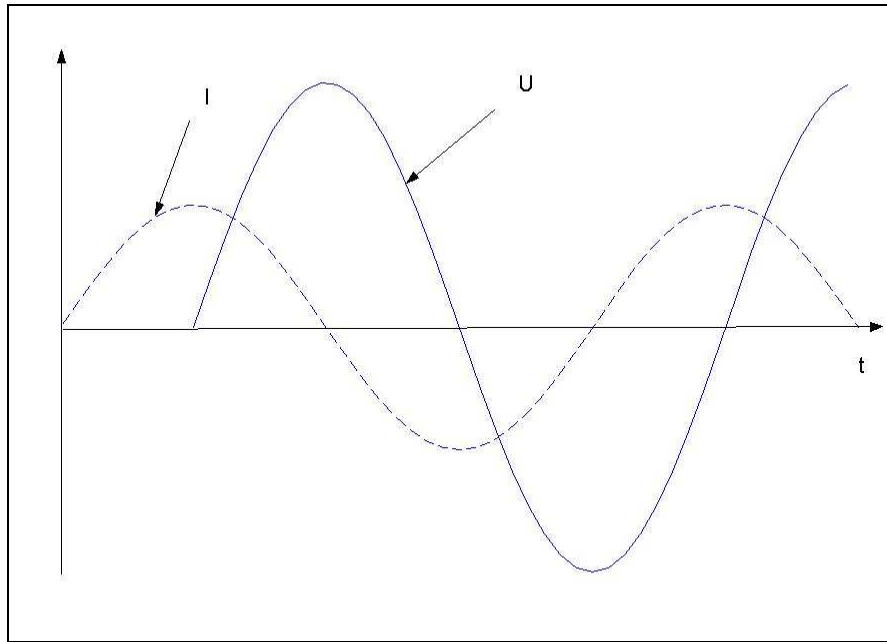


Fig.3. Circuit résistif et capacitif.

Du point de vue de l'utilisateur, la puissance active **P** est la seule puissance qui soit transformable en puissance mécanique, calorifique ou chimique. Or, $\mathbf{P = V I \cos(\varphi)}$ et le courant en ligne est $\mathbf{I = \frac{P}{V \cos(\varphi)}}$. En triphasé nous avons $\mathbf{I = \frac{P}{\sqrt{3} U \cos(\varphi)}}$, où **U** et la tension entre phases (tension composée).

On constate donc que pour une puissance donnée, le courant de ligne **I** est inversement proportionnel au **cos(φ)** arrière. Nous voyons que les pertes en lignes et dans les machines (par effet joule) sont d'autant plus grandes que le facteur de puissance est plus faible. Les conséquences d'un faible facteur **cos(φ)** pour Sonelgaz sont une mauvaise utilisation des lignes, puisque la puissance perdue par effet joule est grande.

2.3. Puissance réactive :

La puissance réactive **Q** s'exprime en volt – ampère réactif (**VA_r**). En monophasé, elle a pour valeur :

$$\mathbf{Q = V I \sin(\varphi)} \quad (3)$$

où :

- V** : tension efficace aux bornes du récepteur ;
- I** : courant efficace parcourant le récepteur ;
- cos(φ)** : facteur de puissance du récepteur.

Note : en réseau triphasé, la puissance réactive d'un récepteur est donnée par : $\mathbf{Q = \sqrt{3} U I \sin(\varphi)}$, où **U** et la tension entre phases (tension composée).

Le condensateur est un générateur de puissance réactive. Celle-ci en générale ne se mesure pas mais se calcule.

2.4. Puissance apparente :

La puissance apparente S s'exprime en volt – ampère (VA). Elle a pour valeur :

$$S = V I = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (4)$$

où :

V : tension efficace aux bornes du récepteur ;

I : courant efficace parcourant le récepteur ;

Note : en réseau triphasé, la puissance apparente d'un récepteur est donnée par : $S = \sqrt{3} U I$, où U est la tension entre phases (tension composée)

Cette puissance se mesure avec un voltmètre et un ampèremètre.

3. Diagramme de charge :

3.1. Définition :

On appelle diagramme de charge, le graphe donnant la variation de la charge électrique en fonction du temps. La charge électrique peut être, l'intensité du courant ou la puissance active ou réactive absorbée. Elle est variable et aléatoire.

On distingue diverses sortes de diagrammes :

- Journalier : donnant la variation de la puissance en fonction du temps durant 24 heures ;
- Mensuel : donnant la variation de la puissance en fonction du temps durant un mois ;
- Semestriel : donnant la variation de la puissance en fonction du temps durant un semestre ;
- Annuel : donnant la variation de la puissance en fonction du temps durant une année.

3.2. Puissances :

On distingue :

- **Puissance calculée** : c'est une puissance constante qui provoquerai le même effet thermique dans les éléments d'un système qu'une charge (puissance) variable. Elle est utilisée pour le choix et le dimensionnement des équipements électriques car l'effet

thermique agit sur les isolants en accélérant leur vieillissement ; une augmentation de la température diminue donc leur durée de vie.

L'équipement électrique en service atteint sa température maximale à un temps égal trois fois la constante de temps thermique. Le temps de référence peut être pris égal à 30 min, d'où $P_{\text{moy max}}^{30}$ est la puissance moyenne maximale pendant une durée de 30 min ; dans ce cas, la puissance calculée P_{cal} est égale à :

$$P_{\text{cal}} = P_{\text{moy max}}^{30} \quad (5)$$

- **Puissance active moyenne** : c'est une puissance active constante consommée par une installation. Elle est calculée à partir de la relation mathématique suivante :

$$P_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (6)$$

$$P_{\text{moy}} = \frac{W}{T} \quad (7)$$

Où

$p(t)$: est la puissance instantanée consommée par l'installation ;

T : la période de calcul (par exemple 24 heure, voir figure ci-dessous) ;

W : l'énergie électrique consommée (égale à $\int_0^T p(t) dt$).

La figure ci-dessous donne un exemple d'une courbe de charge.

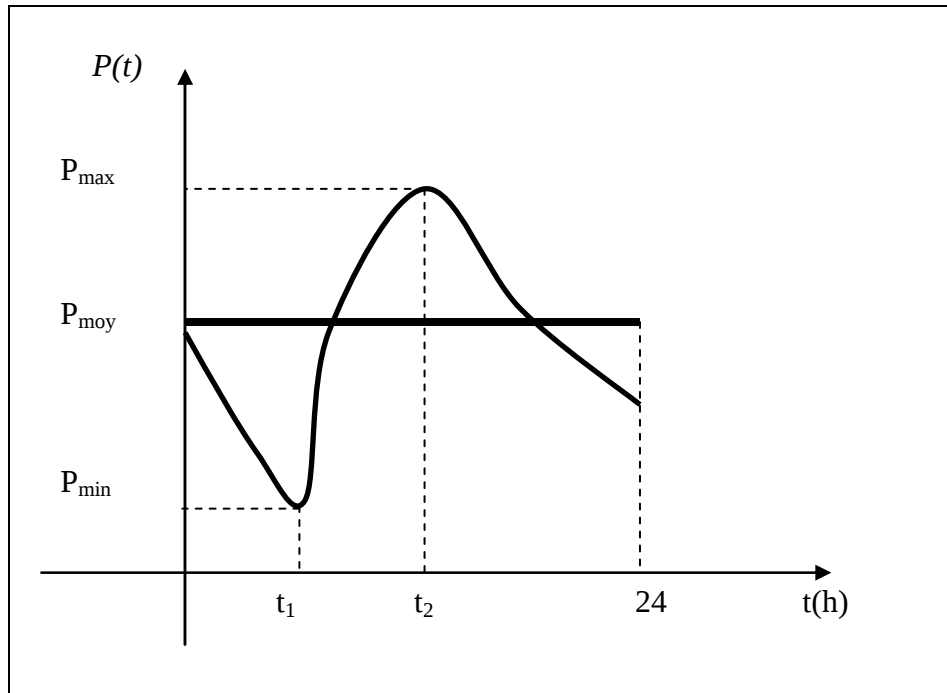


Fig.1. Exemple d'une courbe de charge.

3.3. Diagramme annuel de charge :

L'énergie électrique consommée annuellement est donnée par la relation suivante :

$$W = p_1 t_1 + p_2 t_2 + p_3 t_3 + + p_n t_n = \sum_{i=1}^n p_i t_i \quad (8)$$

$$P_{\text{moy an}} = \frac{\sum_{i=1}^n p_i t_i}{T} \quad (9)$$

avec :

W : l'énergie électrique consommée durant une année ;

p_i : puissance active moyenne consommée durant une période t_i (24 heures par exemple) ; $i = 1, 2, \dots, n$; cette puissance est calculée en utilisant l'expression (6) ;

T : la période de calcul (une année convertis en nombre d'heure) ;

$P_{\text{moy an}}$: puissance active moyenne consommée durant une année.

La figure ci-dessous donne un exemple d'une courbe de charge annuelle.

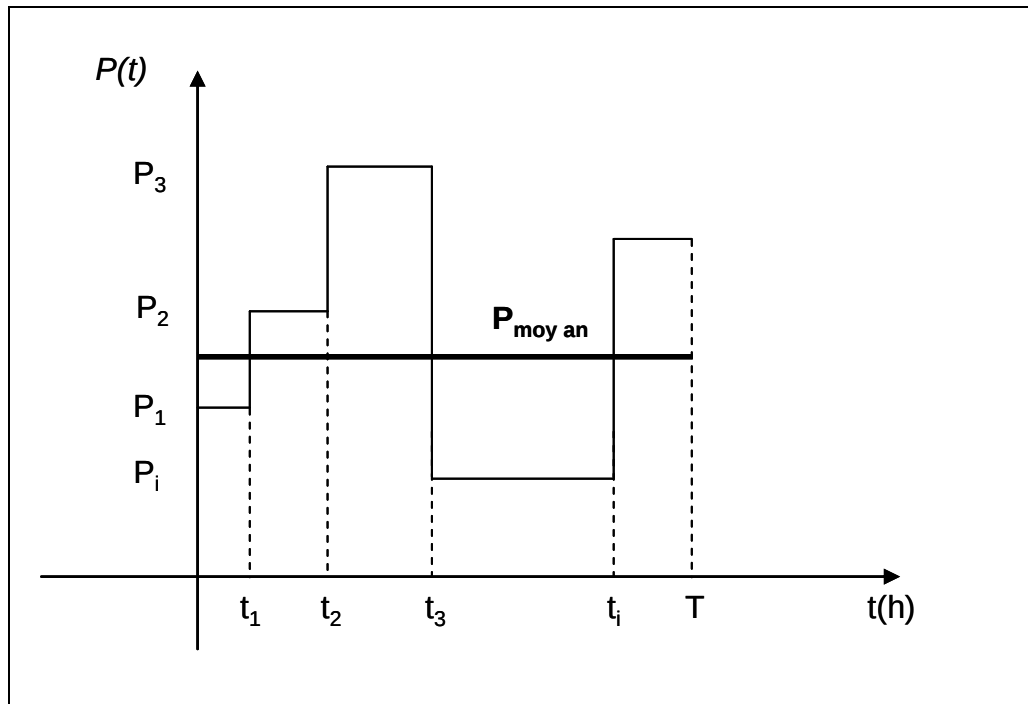


Fig.2. Diagramme de charge annuel.

Le temps d'utilisation de la puissance maximale, T_{max} , est calculé comme suit :

$$T_{\text{max}} = \frac{W_T}{P_{n \text{ max}}} = \frac{P_{\text{moy}} T}{P_{n \text{ max}}} \quad (10)$$

où :

W_T : énergie consommée par un groupe de consommateur G durant une période T ;
égale au produit de la puissance active moyenne de ce groupe durant T et cette période ;

$P_{n\max}$: puissance active nominale maximale du même groupe G de consommateurs.

4. Facteurs caractérisant le diagramme de charge :

Dans tous ce qui suit, nous entendons par **puissance nominale** (P_n) la puissance devant alimenter un équipement électrique pour produire une puissance utile (P_u). P_n et P_u sont lié par le rendement (η) comme suit : $P_u = \eta P_n$

Remarque : Il est à noter que sur les plaques signalétiques des équipements électriques la puissance nominale est en réalité la puissance utile.

4.1. Facteur de marche :

Le facteur de marche représente le temps de fonctionnement des équipements électriques dans une installation. Il est donné par la formule suivante :

$$f_m = \frac{t_{tr}}{t_{tr} + t_{rep}} = \frac{t_{tr}}{t_c} \quad (11)$$

avec,

f_m : facteur de marche ;

t_{tr} : temps de fonctionnement d'un équipement ;

t_{rep} : temps de repos d'un équipement ;

t_c : temps de cycle d'un équipement.

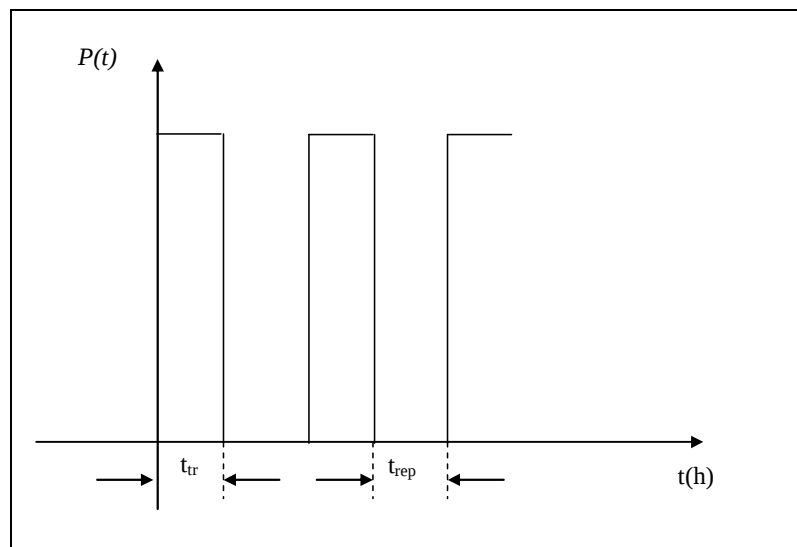


Fig.3. Diagramme de charge d'un équipement.

4.2. Facteur de simultanéité :

Le facteur de simultanéité f_s est le rapport de la somme des puissances nominales des équipements électriques susceptibles de fonctionner simultanément et de la somme des puissances nominales de tous les appareils alimentés par le même circuit ou par la même installation ; la valeur de ce facteur dépend, d'une part, de la nature des appareils et, d'autre part, des conditions d'exploitation de l'installation et des conditions d'utilisation des différents appareils : ce facteur est estimé pour chaque circuit et pour l'ensemble d'une installation.

4.3. Facteur de demande :

Le facteur de demande est le rapport entre la puissance calculée d'une installation et la somme du produit de la puissance nominale d'un équipement électrique et de son facteur de simultanéité. Le calcul de ce facteur se fait donc par l'expression suivante :

$$f_d = \frac{P_{cal}}{\sum_{i=1}^N f_{s\ i} P_{ni}} \quad (12)$$

avec :

f_d : facteur de demande de l'installation ;

$f_{s\ i}$: facteur de simultanéité de l'équipement i ;

P_{ni} : puissance active nominale de l'équipement i ;

N : nombre total d'équipements électriques dans une installation.

Le facteur de demande est toujours égal ou inférieur à l'unité. Il nous offre la possibilité de déterminer la puissance calculée. Il est généralement déterminé à partir des statistiques.

4.4. Facteur d'utilisation :

Le facteur d'utilisation est le rapport entre la puissance moyenne et la puissance nominale. Pour un équipement électrique i , ce facteur est calculé de la manière suivante :

$$f_{ui} = \frac{P_{moy\ i}}{P_{ni}} \quad (13)$$

avec :

f_{ui} : facteur d'utilisation de l'équipement électrique i ;

$P_{moy\ i}$: puissance active moyenne de l'équipement électrique i ;

P_{ni} : puissance nominale de l'équipement électrique i .

Pour une installation, le facteur d'utilisation f_u est donné par la formule suivante :

$$f_u = \frac{\sum_{i=1}^N f_{ui} P_{ni}}{\sum_{i=1}^N P_{ni}} = \frac{\sum_{i=1}^N P_{moy i}}{\sum_{i=1}^N P_{ni}} \quad (14)$$

Remarque : Une définition optimale du facteur d'utilisation est donnée en utilisant les énergies électriques consommées réellement et théoriquement. Cette définition est donnée par l'expression suivante :

$$f_u = \frac{W_r}{W_t} \quad (15)$$

où :

W_r : énergie consommée réellement ; elle est égale à $W_r = P_{moy} T$;

W_t : énergie consommée théoriquement ; elle est égale à $W_t = P_n T$ et ce à condition que chaque équipement consomme sa puissance nominale.

Le facteur d'utilisation f_u est indiqué dans la documentation d'une installation, par exemple :

- Moteur électrique à charge nominale (Ventilateur, pompe, compresseur,...) en régime continu : $f_u = 0,65$; $\cos(\varphi) = 0,8$;
- Moteur électrique des machines outils (Tour, perceuse, fraiseuse,...) : $f_u = 0,15 \div 0,35$; $\cos(\varphi) = 0,6 \div 0,65$

4.5. Facteur de maximum :

Le facteur de maximum f_{max} d'un équipement électrique est le rapport de sa puissance calculée P_{cal} et de sa puissance moyenne P_{moy} ; son expression est donc :

$$f_{max} = \frac{P_{cal}}{P_{moy}} \quad (16)$$

En multipliant et divisant le second membre de l'équation ci-dessous par la puissance nominale de l'équipement électrique, son facteur de maximum devient égal au rapport de ses facteurs de demande f_d et d'utilisation f_u , voir expression ci-dessous.

$$f_{max} = \frac{P_{cal}}{P_{moy}} \frac{P_n}{P_n} = \frac{f_d}{f_u} \quad (17)$$

Remarque : le facteur de maximum f_{max} est calculé à partir du facteur d'utilisation et du nombre efficace n_{eff} .

4.6. Nombre efficace :

Un nombre donné d'équipements électriques de puissances nominales différentes peut être représenté par un nombre fictif de consommateurs ayant une puissance nominale identique. Ce nombre fictif est appelé nombre efficace et il est donné par l'expression suivante :

$$n_{eff} = \frac{\left(\sum_{i=1}^N P_{ni}\right)^2}{\sum_{i=1}^N P_{ni}^2} \quad (18)$$

avec :

n_{eff} : nombre efficace d'équipements électriques dans une installation ;

N : nombre réel d'équipements électriques dans une installation ;

P_{ni} : puissance active nominale de l'équipement électrique i .

La figure ci-dessous donne la valeur du facteur de maximum f_{max} en fonction du facteur d'utilisation et du nombre efficace.

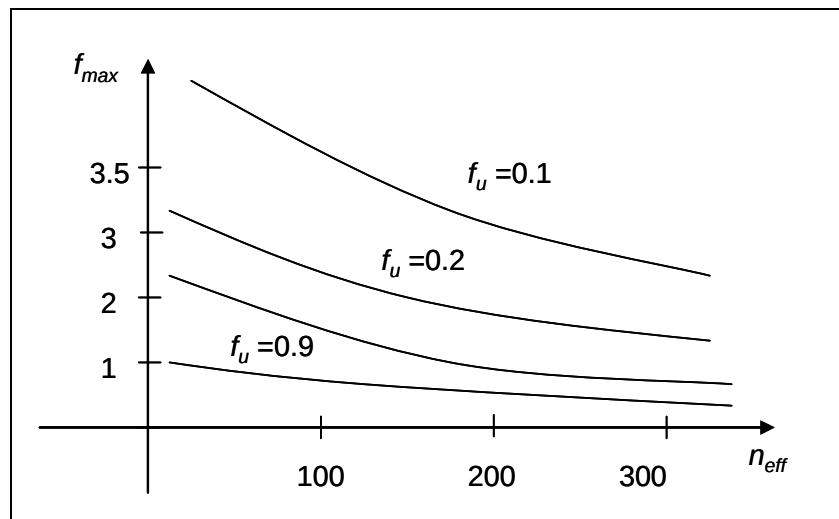


Fig.3. Abaques pour le calcul du facteur de maximum.

5. Méthodes de calcul des charges électriques :

5.1. Calcul de la charge électrique en utilisant le facteur de demande :

En utilisant cette méthode, la charge électrique d'une machine ou d'une installation est donnée par la formule suivante :

$$P_{cal} = f_s f_d P_n \quad (19)$$

5.2. Méthode de consommation spécifique :

En sachant qu'en un temps T , un volume V [m3] est produit à la sortie d'une usine et que cette dernière a une consommation spécifique W_0 [KWh/m3], la charge électrique de cette usine est calculée de la manière suivante :

$$W = W_0 V \quad (20)$$

$$P_{cal} = \frac{W}{T_{max}} \quad (21)$$

Cette méthode est adaptée aux entreprises qui travaillent en régime continu. Elle est précise. La consommation spécifique est citée dans les catalogues des entreprises.

5.3. Méthode du facteur de maximum :

En utilisant cette méthode, la charge électrique d'une machine ou d'une installation est donnée par la formule suivante :

$$P_{cal} = f_{max} P_{moy} = f_{max} f_u P_n \quad (22)$$

$$Q_{cal} = f_{max}^Q Q_{moy} \quad (23)$$

avec :

Q_{cal} : puissance réactive calculée ;

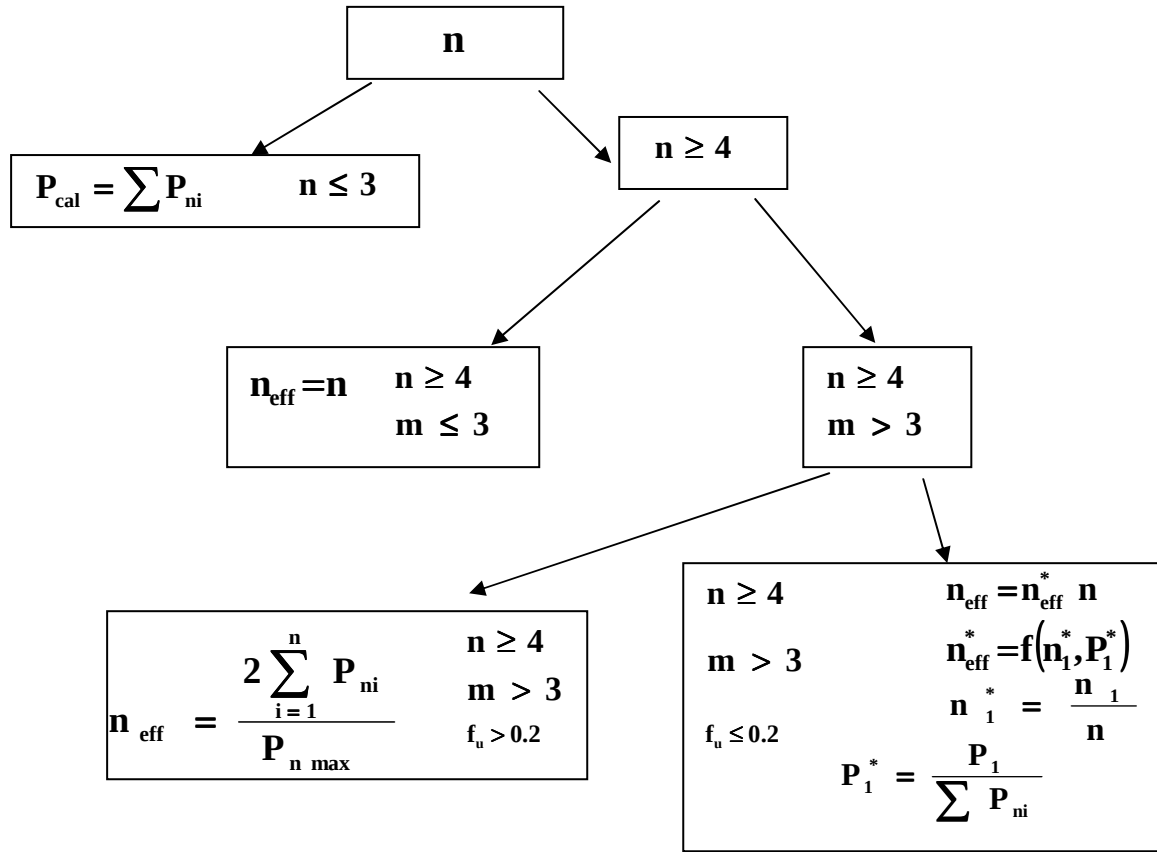
f_{max}^Q : facteur de maximum de la consommation réactive ; il est égal à 1 si $n_{eff} > 10$ et à 1,1 si $n_{eff} \leq 10$;

Q_{moy} : puissance réactive moyenne.

Si le nombre de consommateurs (équipements dans une installation) est très grand, il sera difficile de déterminer directement le nombre efficace (donc le facteur de maximum), pour cela il est conseillé de les diviser en sous groupes selon le facteur d'utilisation :

- 1^{er} sous-groupe $f_u < 0.2$;
- 2^{ème} sous-groupe $f_u = 0.2 \div 0.4$;
- 3^{ème} sous-groupe $f_u = 0.4 \div 0.6$;
- 4^{ème} sous-groupe $f_u = 0.6 \div 0.8$.

L'organigramme suivant présente comment peut on calculer le nombre efficace selon le nombre de consommateurs.



Avec :

$$m = \frac{P_{n \max}}{P_{n \min}} ;$$

n : nombre total d'équipements électriques dans l'installation ;

n_1 : nombre des équipements (consommateurs) dont la puissance est supérieure ou égale à la moitié de la puissance nominale de l'équipement le plus puissant ;

P_1 : puissance totale de n_1 équipements électriques ;

$f(n_1^*, P_1^*)$: fonction donnant le nombre n_1^* ($n_1^* = \frac{n_1}{n}$) en fonction de la puissance P_1^* ($P_1^* = \frac{P_1}{\sum P_{ni}}$).

Remarque : Si $n_{eff} > n$ dans ce cas, on prend la valeur de n ($n_{eff} = n$).

5.4. Méthode de la densité spécifique :

En utilisant cette méthode, la puissance nominale de l'installation est donnée par la formule ci-dessous.

$$P_n = F p_o \quad (24)$$

Avec :

p_o : puissance spécifique installée par unité de surface (Densité spécifique) ;

F : surface de l'installation électrique.

Les puissances active et réactive calculées sont données par :

$$P_{cal} = f_s f_d P_n \quad (25)$$

$$Q_{cal} = P_{cal} \operatorname{tg}(\varphi) \quad (26)$$

Remarque : Cette méthode est valable uniquement pour les charges électriques à répartition uniforme.