

# DOCUMENTATION

## Tarification de l'Énergie électrique.

Par E. BÉRARD, *Ingénieur I. E. G., Licencié ès-Sciences Physiques.*

(SUITE ET FIN)

### TROISIÈME PARTIE

#### Étude des différents modes de tarification.

Au cours de ce chapitre, nous envisagerons les différents systèmes employés, en indiquant les avantages et inconvénients de chacun.

D'une façon générale, le prix de vente de l'énergie doit être suffisamment rémunérateur pour l'exploitant, en même temps qu'il doit favoriser la consommation. De plus, le système de tarification employé, pour être bon, doit tendre à favoriser la consommation pendant les heures creuses de la journée afin de relever le facteur de charge de l'usine génératrice, en limitant la puissance, distribuée aux heures des pointes. Ce système serait évidemment le plus rationnel, mais il n'a pas encore été étudié au point de vue pratique, et surtout l'on n'a pas envisagé son application, qui cependant est relativement simple, comme nous le verrons à la fin de ce chapitre. Voici maintenant les principaux modes de tarification :

#### 1<sup>o</sup> TARIFICATION A FORFAIT

Ce fut le premier genre de tarification employé et il consiste à faire payer aux abonnés une taxe fixe par lampe installée, ou par cheval installé, par mois. Ce système simple au point de vue comptabilité permet de connaître approximativement les recettes et semble garantir un minimum de bénéfices. Nous disons semble garantir, car une pareille tarification encourage les gaspillages d'énergie. D'autre part, ce système limite la puissance installée chez chaque abonné, il est donc défavorable au point de vue de l'extension du réseau. Au point de vue des régions pauvres, ce système donne de bons résultats en ce sens qu'en raison du prix relativement bas de l'énergie, il favorise les petits consommateurs de lumière particulièrement. Pour se garantir contre les fraudes possibles, on peut concevoir l'adjonction à toute installation d'un enregistreur de débit, qui n'est autre qu'un ampèremètre enregistreur fonctionnant dès que le courant consommé dépasse la valeur prévue par le contrat d'abonnement. On arrive ainsi à concevoir la tarification à forfait avec dépassement. Le contrat indique la puissance normale vendue à l'abonné, et l'on facture en fin de mois l'énergie supplémentaire enregistrée par l'appareil. Ce genre de tarification a fait naître l'emploi des compteurs dits à dépassement, trop connus pour que nous les décrivions ici. Rappelons seulement qu'en courant alternatif les indications données par ces compteurs ne sont valables que pour la fréquence normale du réseau. Si celle-ci vient à diminuer, le compteur enregistre une quantité d'énergie trop forte. Ceci peut donner matière à discussion entre les exploitants et leurs abonnés.

La tarification à forfait peut aussi s'appliquer avec différents tarifs suivant l'horaire d'utilisation et le genre d'utilisation de l'énergie ainsi que la régularité de consommation. Par exemple, le K. W. H. force sera vendu moins cher que le K. W. H. lumière, et entre deux clients de force motrice de même importance on pourra consentir un rabais à celui dont la consommation est la plus régulière. A ce point de vue, on peut s'appuyer sur le coefficient d'utilisation individuel qui est le rapport entre l'énergie réellement consommée et l'énergie qui aurait été consommée si l'installation considérée avait fonctionné continuellement à pleine charge. Les rabais ne doivent être consentis que pour une valeur de ce coefficient au moins égale à 0,7.

La tarification à forfait, simple comme conception et application, ne peut donc donner de bons résultats qu'avec l'adjonction de compteurs à dépassement.

M. Claude estime dans ce dernier cas que la taxe fixe ne doit pas augmenter proportionnellement à la puissance demandée, et le prix de vente de l'énergie au compteur doit être suffisamment bas pour favoriser la consommation.

### 2<sup>o</sup> TARIFICATION UNIFORME AU COMPTEUR

Ce genre de tarification consiste à déterminer le prix moyen de revient de l'énergie, qui, majoré convenablement, de façon à assurer des bénéfices, donne le prix moyen de vente. L'énergie enregistrée au compteur est alors facturée à ce prix quel que soit le genre d'utilisation et l'heure de la consommation.

Cette façon de procéder favorise les clients de faible période d'utilisation au détriment des autres. Aussi ne l'emploie-t-on généralement que pour les abonnés d'éclairage et de petite force motrice, la grosse force motrice étant tarifée suivant un mode différent.

### 3<sup>o</sup> TARIFICATION A PRIX UNIFORME AVEC TAXE FIXE PROPORTIONNELLE A LA PUISSANCE

Ceci correspond à fixer un minimum de consommation annuelle par kilowatt souscrit, minimum servant de base pour l'évaluation de la taxe de puissance, taxe variant en raison inverse, toutes choses égales d'ailleurs, de la puissance. L'énergie consommée enregistrée au compteur est alors facturée suivant un tarif uniforme. La comptabilité est donc compliquée du fait de ces deux taxes. De plus, ce moyen tend à gêner le développement du secteur au point de vue de la puissance consommée ; par suite, il n'est pas favorable au relèvement du facteur d'utilisation de la centrale.

### 4<sup>o</sup> TARIFICATION DÉGRESSIVE

Elle consiste à diminuer le prix de vente lorsque la consommation augmente. Par suite, ce genre de tarification n'encourage que les gros consommateurs. Cependant en faisant porter les rabais sur les consommations propres des différents appareils ou machines des clients, il devient plus avantageux pour les faibles et moyennes puissances, car le rabais est alors réparti proportionnellement à la puissance de chaque unité d'utilisation. Dans ce dernier cas, il est indispensable pour obtenir une tarification rationnelle, d'examiner le facteur d'utilisation des abonnés, de façon à pouvoir déterminer une relation entre ce facteur et le rabais. Pour un secteur de faible importance, ayant de nombreux clients consommant des puissances moyennes, on peut adopter une variation linéaire du rabais. Dans le cas des grands secteurs à gros consommateurs, il est préférable d'employer une variation parabolique.

D'autre part, la tarification dégressive peut s'appliquer de différentes manières, on peut en effet choisir :

a) Une tarification dégressive suivant l'horaire de consommation (excellent moyen pour augmenter le facteur d'utilisation de la centrale).

b) Une tarification dégressive suivant la régularité de la consommation.

c) Une tarification dégressive suivant la durée d'utilisation.

d) Une tarification à prix uniforme, avec ristourne proportionnelle à la consommation jusqu'à concurrence d'un prix de vente minimum déterminé par le prix de vente moyen.

Quel que soit le genre de tarification dégressive employé et malgré tous les palliatifs employés, ce sont les gros consommateurs qui restent avantagés. Il faut donc s'efforcer, par un système de primes, de les amener à avoir la plus grande régularité d'utilisation compatible avec leur genre d'industrie.

### 5<sup>o</sup> TARIFICATION AVEC TAXE FIXE PROPORTIONNELLE A LA DEMANDE MAXIMUM ET TARIF UNIFORME POUR LA CONSOMMATION.

Ce système employé par Wilmerding en Amérique, et Asting en Angleterre, repose sur ce fait qu'un client souscrivant une puissance maximum P. KW., la centrale doit toujours être en

mesure de lui fournir cette puissance et doit par là même maintenir des groupes en marche en nombre plus que suffisant pour assurer la consommation normale. Il en résulte des frais d'exploitation supplémentaires, surtout dans le cas des centrales thermo-électriques, frais que l'on couvre à l'aide des taxes fixes.

L'énergie consommée par le client et enregistrée au compteur étant facturée à un prix uniforme.

Ce système a l'inconvénient de nécessiter le prépaiement de la taxe fixe, dont la nécessité n'est pas comprise par la plupart des abonnés.

#### 6° TARIFICATION DIFFÉRENTE SUIVANT L'UTILISATION

Ce système très employé en Dauphiné, Savoie et Suisse, est très discutable en ce sens que le prix de revient de l'énergie étant constant, certains consommateurs contribuent plus que d'autres (toutes choses égales), à l'amortissement financier de l'installation. De plus, il nécessite autant de compteurs, qu'il y a d'applications différentes. Par conséquent, il complique la comptabilité relative à chaque abonné. D'autre part, la multiplicité des appareils de mesure nécessitée par ce système augmente la puissance immobilisée (puissance consommée à vide par ces différents appareils et qui est loin d'être négligeable). Pour être acceptable, ce système ne doit pas comporter plus de 2 ou 3 tarifs. On peut, dans le cas de 2 tarifs différents, employer des compteurs spéciaux enregistrant sur une seule minuterie les énergies vendues à des taux différents. Ces compteurs comprennent 2 enroulements en série. Un seul est traversé par l'énergie vendue au tarif minimum, les deux par l'énergie vendue au tarif maximum.

#### 7° TARIFICATION DIFFÉRENTIELLE DE WRIGHT

Ce procédé consiste à faire payer l'énergie à un tarif décroissant suivant la durée d'utilisation journalière de la puissance maximum demandée, les plus forts rabais étant faits aux abonnés qui à consommation égale possèdent la plus faible puissance installée.

Si P est l'énergie consommée en un an, exprimée en hectowatts-heures, le temps T de fonctionnement est

$$T = \frac{100 P}{U I}$$

T est appelé le coefficient d'utilisation de l'abonné. Un barème fait connaître le prix de l'hectowatt-heure en fonction de T. La variation est généralement hyperbolique, le tarif allant en diminuant lorsque T augmente.

D'autre part, pour déterminer la valeur de T on est conduit à adjoindre à l'installation un indicateur de Wright, sorte d'ampèremètre à maximum coûteux et d'un fonctionnement assez délicat.

Ce système appliqué pour la première fois par Wright à son usine de Brighton a donné d'excellents résultats. Au bout de la première année, plus de 40 % des clients bénéficiaient du tarif réduit.

Les inconvénients résident en ce qu'il complique la comptabilité, qu'il est d'une application délicate, nécessitant un appareil spécial, qu'il est difficilement compris par les abonnés, et qu'il ne tient pas compte de l'heure de demande maximum.

#### 8° TARIFICATION VARIABLE AVEC L'HORAIRE DE CONSOMMATION

Ce système est appliqué à l'aide des compteurs Brown et Routin, qui permettent d'enregistrer l'énergie consommée en la comptant à des tarifs que la centrale peut elle-même modifier en se basant sur la consommation du réseau. Nous rappellerons brièvement ici le principe de ces compteurs. Ce sont des compteurs à intégration discontinue, et la méthode repose sur ce fait que pour une même énergie consommée et dans un même temps les intégrations sont d'autant plus nombreuses que le tarif à appliquer est plus élevé. A cet effet, les compteurs comprennent des relais pulsateurs reliés au réseau et traversés seulement par les courants résultant des émissions périodiques d'une horloge mère placée à la centrale.

Le fonctionnement de ces compteurs étant assez délicat, leur emploi ne s'est pas généralisé, quoiqu'ils satisfassent particulièrement bien à la condition énoncée plus haut, savoir : encourager la consommation aux heures creuses et la limiter pendant les pointes.

#### 9° TARIFICATION A DOUBLE TARIF

Ce système comprend deux tarifs correspondants aux heures

creuses et aux heures de pointes, tarifs habituellement désignés sous le nom de tarif de nuit et tarif de jour, ce dernier étant supérieur au premier. Ce système est donc très favorable au relèvement du facteur de charge de la centrale. On l'applique à l'aide de compteurs d'énergie à double tarif comportant soit 2 minuterie et un seul organe mobile et commandés par une horloge, soit à l'aide de 2 compteurs différents mis en service par un relais commandé de l'usine, soit avec un seul compteur à minuterie unique dont on fait varier la constante (insertion de résistances sur le fil fin ou shuntage du gros fil) par un relais commandé de la centrale. Avec ces deux derniers procédés on peut changer le tarif de la centrale, même suivant la charge. En général, la division en 3 parties de la journée est suffisante. On peut admettre par exemple si T est le tarif normal,

$$\begin{aligned} & 2/3 T \text{ de } 7 \text{ heures à } 15 \text{ heures.} \\ & T \text{ de } 15 \text{ heures à } 21 \text{ heures.} \\ & \frac{T}{2} \text{ de } 21 \text{ heures à } 7 \text{ heures.} \end{aligned}$$

Ce genre de tarification est donc le plus rationnel de tous ceux étudiés jusqu'à présent.

#### 10° TARIFICATION PASSAVANT

Dans ce procédé, l'abonné achète l'énergie au kilowatt-an (rappelons que le kilowatt-an vaut 8640 kilowatts-heures), de sorte que plus l'abonné utilise l'énergie qui lui est concédée par son contrat, plus le prix du kilowatt-heure diminue. D'après M. Passavant, le prix de vente moyen du kilowatt-an varierait de 650 fr. à 850 fr. ; donc, pour avoir un prix moyen du kilowatt-heure, il faut marcher de 1200 à 2000 heures par an, soit de 2 h. 30 à 5 h. 30 par jour.

Par exemple, en vendant le kilowatt an 800 fr., un client marchant 2000 heures aurait le kilowatt-heure à 0,40, le même client marchant 4000 heures l'aurait à 0 fr. 20. Ce procédé est très favorable aux usines à marche régulière. Par exemple, avec un prix moyen de 700 fr. le kilowatt-an, une usine marchant 3000 heures par an aurait le kilowatt heure à 0 fr. 233. L'inconvénient de ce système est qu'il ne renseigne pas sur la période de consommation. En revanche, il est très favorable au développement des applications thermiques de l'électricité, qui exigent une marche continue.

#### 11° SYSTÈME PROPOSÉ PAR L'AUTEUR

Dans ce système, on établit une distinction entre l'énergie lumière et l'énergie force, en comptant dans l'énergie lumière celle consommée pour la petite force motrice, l'énergie force étant comptée comme telle au-dessus d'une consommation de 30 K. W.

L'énergie lumière est enregistrée par un compteur à triple tarif première période de 7 à 16 heures, deuxième de 16 à 21 heures, troisième de 21 heures à 7 heures, compteur comprenant une horloge dont le cadran porte 3 secteurs correspondants aux 3 périodes indiquées, et qui fait varier la constante du compteur par insertion de résistances sur le fil fin pour la première et la troisième période, de façon à ce que l'on ait une constante égale

$$\begin{aligned} & \text{à } \frac{2}{3} K \text{ pour la première période,} \\ & \text{à } K \text{ pour la deuxième période,} \\ & \text{à } \frac{K}{4} \text{ pour la troisième période,} \end{aligned}$$

K désignant la constante normale du compteur.

De la sorte, en faisant le relevé du compteur et tarifant l'énergie consommée au prix de base normal, on applique, sans complication, 3 tarifs différents.

Quant à l'énergie force motrice, elle est vendue au kilowatt-an avec taxe fixe et prime inversement proportionnelle à la puissance maximum demandée.

Si a est la prime fixe par kilowatt-an et P le nombre de kilowatts-an souscrits, le prix de vente du kilowatt-an est :

$$p = a + \frac{b}{P}$$

b étant une constante fonction du bénéfice à réaliser. De plus, p ne peut être inférieur à  $p = 1,01 a$ .

Enfin, dans le cas des réseaux à courant alternatif, ce système comprend aussi la tarification de l'énergie déwattée comme on le verra dans le chapitre suivant.

En résumé, les systèmes de tarifications que l'on peut employer sont nombreux ; on peut, en concevoir plusieurs, rien qu'en combinant ceux exposés précédemment. Mais pour être réellement favorables à l'exploitation, ils doivent satisfaire aux conditions énoncées précédemment : contribuer au relèvement du facteur de charge de la centrale, et être simples comme application.

#### QUATRIEME PARTIE

### Tarification de l'énergie déwattée.

La question de la tarification de l'énergie déwattée devient de plus en plus intéressante à cause de l'extension continue des réseaux et surtout des transports d'énergie à grande distance. On sait, en effet, que la perte de puissance en ligne et la chute de tension sont fonction du facteur de puissance. On a donc tout intérêt à avoir un facteur de puissance aussi voisin de l'unité que possible.

Cette question a déjà été sérieusement étudiée et en particulier au Congrès d'électricité de Turin en 1908, diverses solutions ont été proposées.

A ce sujet, M. Boucherot dit : « Electromagnétiquement parlant, la puissance réactive est plus difficile à produire, transporter et transformer que la puissance réelle. Non seulement, il n'est pas équitable de ne faire payer que l'énergie réelle sans égard au facteur de puissance, mais cette manière de faire n'engage pas le client à améliorer son facteur de puissance. Or, une exploitation rationnelle à ce point de vue ne peut être obtenue que par une collaboration étroite de la centrale avec ses clients. Il faut donc inciter ceux-ci, par une tarification systématique de leur puissance réactive, à diminuer celle-ci autant qu'il est possible de le faire. »

D'une façon générale, soit  $P$  la puissance en kilowatts correspondant à la puissance mécanique nécessaire à l'installation, en tenant compte du rendement, on a en désignant par  $P'$  la puissance apparente nécessaire à l'installation et par  $\cos \varphi$  son facteur de puissance :

$$P' \cos \varphi = P.$$

$$\text{ou } P' = E I = \frac{P}{\cos \varphi}$$

Par conséquent, le client immobilise une puissance apparente

$$p = \frac{P}{\cos \varphi} - P = P \left( \frac{1 - \cos \varphi}{\cos \varphi} \right)$$

Prenons un exemple. Soit  $P = 1000$  K. W. A. et  $\cos \varphi = 0,8$

$$p = \frac{1000 \times 0,2}{0,8} = 250 \text{ K. W. A.}$$

la puissance réactive de l'installation étant

$$p' = 760 \text{ K. W. A.}$$

Un premier mode de tarification de l'énergie déwattée consisterait donc à facturer la quantité  $p = P \left( \frac{1 - \cos \varphi}{\cos \varphi} \right)$ . Cette façon de faire nécessiterait la connaissance du facteur de puissance moyen de l'installation que l'on pourrait déterminer, soit à l'aide d'un phasemètre enregistreur, soit par un diagramme de courants en se basant pour cela sur les données de chaque machine.

Au congrès de Turin, en 1908, M. Ricardo Arno avait proposé de faire payer aux abonnés l'énergie donnée par :

$$\int dt [A' V I \cos \varphi + B' V I (1 - \cos \varphi)]$$

Le terme  $A' V I \cos \varphi$  tenant compte de l'énergie réellement consommée et le terme  $B' V I (1 - \cos \varphi)$  de l'énergie immobilisée.  $A'$  et  $B'$  étaient des constantes correspondant au prix du K. V. A. et à une prime unitaire fonction du facteur de puissance.

M. Boucherot propose une autre formule tenant compte des puissances réelles réactives et apparentes :

$$\int dt (A V I \cos \varphi + B V I \sin \varphi + C V I)$$

où  $A, B, C$  sont des constantes.

Ce principe beaucoup plus rationnel que le précédent doit trouver sa réalisation dans les compteurs. M. Boucherot propose alors de faire  $C = 0$  dans la formule précédente qui devient :

$$\int dt (A' U I \cos \varphi + B' U I \sin \varphi)$$

où  $A'$  et  $B'$  sont les constantes,  $A$  et  $B$  majorées convenablement pour tenir compte de la suppression du terme  $C U I$ .

On est conduit ainsi à envisager l'emploi, soit de 2 compteurs, l'un enregistrant l'énergie réelle, l'autre l'énergie réactive, soit d'un compteur mixte enregistrant la somme des deux énergies. Dans ce dernier cas, M. Iliovici obtient le résultat voulu en prenant un compteur d'induction dont il shunte l'enroulement fil fin par une résistance purement ohmique de valeur élevée montée en série avec un enroulement en fil fin placé sur le même noyau que l'enroulement normal.

Quant aux compteurs d'énergie déwattée, ils peuvent être basés sur le principe de la méthode Boucherot qui fait connaître directement la puissance magnétisante dans les circuits triphasés équilibrés.

On peut aussi, en combinant dans un même appareil le montage normal et le montage Boucherot, réaliser un appareil enregistrant la somme de l'énergie réelle et de l'énergie réactive.

Au point de vue de l'obtention d'un bon facteur de puissance, les moyens suivants sont à préconiser :

1° Emploi de moteurs synchrones surexcités en bout de ligne, moteurs installés par la Société elle-même ;

2° Obligation pour les abonnés d'avoir un facteur de puissance au moins égal à 0,80 pour toute puissance supérieure à 100 K. W.

3° Prime aux abonnés inversement proportionnelle au facteur de puissance jusqu'à la valeur 1 de celui-ci.

4° Diminution du prix de vente de l'énergie réelle pour les déphasages en avance jusqu'à concurrence d'un facteur de puissance = 0,9.

Avec ces procédés, on peut parvenir à améliorer considérablement le facteur de puissance général d'une installation et par suite le fonctionnement de la centrale. Nous signalerons aussi que l'on doit veiller à ce que l'on n'emploie pas des moteurs asynchrones de faible puissance en nombre trop considérable ou des moteurs travaillant à faible charge. Dans le cas où l'on aurait des installations fonctionnant dans ces conditions, cas des filatures, il est nécessaire d'imposer l'emploi soit de moteurs synchrones surexcités à vide ou en charge, ou de condensateurs statiques.

#### CONCLUSION

Pour terminer cette étude rapide, nous dirons qu'il est très intéressant pour ces divers modes de tarification d'établir des abaques faisant connaître le prix de vente de l'énergie. L'étude détaillée de ces abaques nous conduirait trop loin. Mais il nous est possible d'indiquer ici la façon de procéder à leur établissement.

D'abord, dans le cas des centrales thermiques on sera conduit à un abaque donnant le prix de revient du kilowatt en fonction du prix du charbon et des frais de main d'œuvre. Pour les usines hydro-électriques, cet abaque donnera le prix du kilowatt en fonction des différents frais d'exploitation.

Si l'on désigne par  $f_1(x)$  le prix de revient du kilowatt en fonction des frais dus à l'exploitation, par  $f_2(y)$  les frais financiers en fonction de la production et par  $f_3(z)$  le prix de vente en fonction des bénéfices, on sera conduit à une expression de la forme

$$f_3(z) = f_2(y) + f_1(x)$$

qui donne un abaque hexagonal.

Si la relation entre ces différents frais et le prix de vente se présentait sous la forme de

$$f_1(x) \varphi_1(z) + f_2(y) \varphi_2(z) = \varphi_3(z)$$

on serait amené à construire un abaque par points alignés suivant la méthode de M. Maurice d'Ocagne.

La construction de ces abaques ne présente pas de grosses difficultés, mais doit être faite très soigneusement dans chaque cas particulier.