

# NATIONS UNIES CONSEIL ECONOMIQUE ET SOCIAL



Distr.  
LIMITEE

E/CN.14/EP/23  
2 September 1963

Original: FRANCAIS



COMMISSION ECONOMIQUE POUR L'AFRIQUE  
Réunion africaine sur l'énergie électrique  
Addis-Abéba, 21-31 octobre 1963

## LA COUVERTURE DES POINTES DE CHARGE (Note du secrétariat)

1. Origine des variations de la charge

La courbe de charge journalière d'un réseau électrique présente des variations caractéristiques comportant une, deux ou même trois pointes (du matin, de l'après-midi et du soir), ainsi qu'un creux de nuit.

Au cours de la semaine, une variation caractéristique de la charge pour :

- les jours ouvrables de la semaine (mardi, mercredi, jeudi, vendredi)
- les veilles et les jours fériés (lundi, samedi)
- les jours fériés (dimanche).

63-3259  
GE.63-12752

## LA COUVERTURE DES POINTES DE CHARGE

### Introduction

L'énergie électrique devant être produite au moment où elle est consommée, c'est la demande seule des consommateurs qui détermine la valeur momentanée de la charge à laquelle la production des usines doit faire face. Il est évident que cette charge varie entre des limites assez larges en fonction des habitudes des consommateurs, et montre des périodicités journalières, hebdomadaires et annuelles, superposées à une croissance continue.

C'est tout d'abord l'évolution de la charge maximum annuelle qui importe, à la fois pour l'élaboration des programmes d'équipement et pour celle des programmes annuels de son exploitation : l'entreprise électrique, par son programme d'investissement, doit, d'une part assurer que l'équipement dont elle dispose permet chaque année de franchir le cap de la pointe annuelle. Elle doit, d'autre part, organiser l'entretien et la révision de cet équipement de façon à ce qu'une puissance suffisante soit disponible (tenant compte d'une probabilité de défaillance de quelques années seulement par siècle) pour faire face à la charge de pointe de chaque année.

Mais la couverture des pointes journalières pose également certains problèmes techniques et économiques qui influent, d'une part sur l'exploitation de l'équipement de production et de transport du réseau, et d'autre part sur la sélection des investissements nécessaires à son extension graduelle. C'est l'ensemble de ces problèmes, et les solutions que l'on a adoptées pour les résoudre, qui font l'objet du présent document.

#### 1. Origine des variations de la charge

La courbe de charge journalière d'un réseau électrique présente des variations caractéristiques comportant une, deux ou même trois pointes (du matin, de l'après-midi et du soir), ainsi qu'un creux de nuit.

Au cours de la semaine, une variation caractéristique de la charge apparaît aussi. On peut en effet distinguer des courbes de charge différentes pour :

- les jours ouvrables de la semaine (mardi, mercredi, jeudi, vendredi)
- les veilles et les lendemains de jours fériés (lundi, samedi)
- les jours fériés (dimanche).



Une variation saisonnière de la charge électrique s'ajoute enfin à la variation hebdomadaire. Elle est constatée par la modification des valeurs et de la forme de la couche journalière de charge au cours des diverses saisons de l'année.

A l'origine des variations de la charge d'un réseau électrique, se trouvent des facteurs de tous genres. On pourrait cependant les grouper comme suit :

- a) le nombre, la nature et les caractéristiques des abonnés;
- b) les conditions naturelles et météorologiques de la région desservie par le réseau considéré;
- c) l'horaire de travail, les jours fériés et les congés;
- d) les habitudes de vie de la population et également sa situation économique;
- e) l'intervention des fournisseurs d'électricité.

Pour ce qui est de la nature et des caractéristiques des abonnés, on classe d'habitude les consommateurs d'électricité dans les grandes catégories, telles que : l'industrie, le transport, l'agriculture, l'artisanat, le commerce et le ménage. L'évolution dans le temps de l'ensemble de ces consommateurs entraîne des modifications sur les courbes de charge.

Les applications pour le chauffage, l'éclairage électrique ainsi que d'autres utilisations de l'électricité sont déterminées par les conditions naturelles et météorologiques régnant sur la région desservie par un réseau électrique.

De ce fait, les heures du lever et du coucher du soleil, la clarté du ciel, la température atmosphérique sont des conditions déterminantes pour la forme de la courbe de charge.

La position de l'horaire des activités de la population par rapport aux heures claires de la journée, ainsi que ses habitudes de vie, influencent également la courbe de charge.

L'introduction de l'heure d'été, qui place mieux l'horaire de travail dans la période claire de la journée, apporte, dans certains cas, une réduction des pointes. En outre, l'introduction de la semaine de cinq jours ouvrables modifie la courbe de charge des samedis, à la suite de l'arrêt des consommateurs industriels.

Enfin, les entreprises fournissant l'électricité agissent aussi sur la courbe de charge plus ou moins directement par la voie des tarifs, des conventions avec les abonnés, ou des réglementations légales.

A ce sujet, on tend d'habitude à encourager la consommation durant les heures creuses et à la diminuer durant les pointes.

Outre les variations périodiques de la charge, on constate même, dans les pays les plus développés, une augmentation continue de la consommation. Cela est d'une part la suite de la croissance de la population, mais pour une partie plus importante, la conséquence du développement de l'application de l'énergie électrique dans l'industrie, dans les transports ferroviaires, dans l'agriculture et dans les ménages, en partie par sa substitution à d'autres formes d'énergie. Cette augmentation annuelle de la consommation de l'énergie électrique peut atteindre des chiffres entre 15 et 20 % dans des pays où l'électrification est encore à ses débuts, mais il a tendance à diminuer en fonction du développement de l'électrification pour se stabiliser autour de 7 %, ce qui correspond au doublement, en dix ans, pour les pays industrialisés.

La charge maximum annuelle a également tendance à augmenter graduellement. Cependant, dans les pays où l'électrification n'est qu'à ses débuts, la croissance de la charge maximum annuelle est généralement moins prononcée que celle de la consommation totale, parce que, au fur et à mesure que l'électrification se développe, l'application de cette énergie se multiplie et sa consommation se répand dans le temps. Autrement dit, dans les pays où l'électrification est en voie de développement, le facteur d'utilisation de la charge maximum a tendance à augmenter, mais cette tendance s'affaiblit bientôt et dans les pays développés, l'augmentation annuelle de la charge maximum correspond pratiquement à celle de la consommation totale de l'énergie électrique.

On remarquera que l'interconnexion régionale de petits réseaux locaux tend à augmenter sensiblement le facteur d'utilisation de la charge maximum de l'ensemble en raison de la diversité tant systématique qu'accidentelle des consommations individuelles.

Le gain dû à ce phénomène par l'interconnexion des réseaux régionaux en grands complexes interconnectés est cependant bien moindre parce que "la diversité ne paye qu'une fois". Une autre diversité porte sur l'heure exacte de la pointe. Celle-ci est influencée par les habitudes des consommateurs en fonction de l'heure du crépuscule qui varie tant avec la différence de longitude qu'avec la différence de latitude. Cette diversité est néanmoins peu importante et ne saurait à elle seule justifier la construction de lignes d'interconnexion.



## 2. Aspects techniques de la couverture des pointes de charge

Le réglage de l'équipement de production en fonction de la charge pose un certain nombre de problèmes d'ordre technique. Alors que les turbines hydrauliques sont susceptibles de supporter des variations importantes, il n'en est pas de même pour les turbines à vapeur ni pour les chaudières de grande capacité. La mise en marche de groupes thermiques importants, dont la puissance est de 100 à 150 MW, nécessite en effet souvent plus de 10 heures, et la charge de ces machines ne peut être maintenue longtemps au-dessous de 10 % de la charge nominale sans risques de dommages. Par ailleurs, les générateurs de grande capacité risquent également d'être détériorés par des variations de charge trop rapides et trop fréquentes. Il faut s'attendre à ce que les centrales nucléaires soient également limitées dans la variation de leur charge.

Tous ces problèmes cependant ont trouvé et trouveront progressivement leur solution grâce à des améliorations soit dans la construction du matériel, soit dans les méthodes d'opération. On tient tout d'abord compte des variations saisonnières par un programme adéquat de révision des centrales thermiques, pour assurer la disponibilité de la presque totalité de la puissance thermique pendant les mois les plus chargés de l'hiver. Pour l'exploitation journalière, on arrive en particulier à estimer les courbes de charge avec une grande précision.

L'exploitation des centrales électriques s'effectue alors suivant des programmes pré-établis qui permettent de répartir les variations de la charge entre le plus grand nombre d'unités en service et de réduire l'importance des variations de chacun des groupes. Les groupes thermiques de grande puissance doivent maintenant aussi participer au réglage des variations de la charge, soit qu'on les arrête et qu'on les fasse démarrer rapidement, soit qu'on les laisse en service avec une charge très faible.

L'interconnexion de centrales thermiques et hydro-électriques a permis en outre une utilisation plus rationnelle des énergies produites en attribuant aux secondes le rôle de centrales régulatrices. Lorsque la puissance des centrales hydro-électriques était trop faible pour remplir cette fonction, des centrales de pompage ont été construites. Il existe d'autres moyens encore pour couvrir la charge de pointe :

- usines thermiques à vapeur spécialement adaptées à suivre les variations de la charge avec un bon rendement moyen;

- usines thermiques à vapeur spécialement conçues pour être surchargées pendant les heures de pointe;
- usines thermiques à vapeur vétustes spécialement adaptées à être mise en service pendant les heures de pointe;
- usines à turbines à gaz, soit équipées de générateurs de gaz à pistons libres, soit de moteurs à réaction d'avion, soit à réservoir d'air comprimé chargés par des électro-compresseurs pendant les heures creuses;
- usines hydro-électriques suréquipées, etc.

L'on dispose donc de toute une gamme de solutions aux problèmes techniques qui se posent dans ce domaine. Le choix entre les solutions à adopter dans un cas déterminé pour satisfaire les variations de la charge est donc essentiellement un problème d'ordre économique.

### 3. Aspects économiques de la couverture des pointes de charge

Les installations destinées à la production, au transport et à la distribution de l'énergie électrique nécessitent des investissements importants dont le montant est déterminé par la puissance maximum appelée. Ceux-ci entraînent chaque année des charges financières qui, jointes aux salaires et aux autres frais d'administration et de service, forment la partie fixe des frais d'exploitation d'une entreprise d'électricité.

Par ailleurs, il faut tenir compte des frais proportionnels à la quantité d'énergie électrique produite et qui dépendent surtout du coût du combustible dans le cas des centrales thermiques alors qu'ils sont nuls dans le cas des centrales hydro-électriques.

Chaque augmentation du facteur d'utilisation de la puissance installée se traduit par une diminution du prix de revient moyen de l'énergie produite.

Le premier problème économique qui se pose dans ce domaine est donc d'améliorer la forme de la courbe de charge, de réduire l'importance des variations, bref, d'obtenir un facteur d'utilisation de la charge maximum, aussi élevé que possible. On y parvient par une structure appropriée des tarifs :

- le tarif binôme, se composant d'une prime fixe en fonction de la charge maximum appelée et d'un prix fixe par kWh, incitant ainsi le consommateur à augmenter la consommation sans augmenter la charge maximum;



- le tarif double, selon lequel le prix du kWh prélevé durant la période de pointe est plus élevé que celui du kWh prélevé pendant les heures hors pointe;
- le tarif de nuit permettant de prélever l'énergie électrique à prix réduit pendant la nuit;
- les tarifs basés sur le coût marginal de l'énergie électrique, et qui se composent de primes fixes dépendant de la puissance, souscrites dans chacune de plusieurs périodes bien déterminées et d'un prix fixe par kWh prélevé et différencié également suivant ces mêmes périodes.

Ces derniers tarifs sont basés sur le principe que la valeur de l'électricité est fonction de l'heure du prélèvement. La valeur instantanée serait égale au coût partiel du kWh produit dans la centrale la moins économique qui doit être en service pour couvrir la charge.

Il faut ajouter à la liste ci-dessus les contrats spéciaux avec certaines industries, qui stipulent par exemple que le consommateur est obligé de réduire la charge pendant les heures de pointe, ou qui attribuent à l'entreprise d'électricité le droit de couper le courant en cas de besoins pour réduire la pointe de charge.

L'interconnexion des réseaux locaux présente un double avantage : par la diversité des charges locales, elle provoque tout d'abord une amélioration de la courbe de charge de l'ensemble, et permet en outre de faire jouer un nombre plus élevé de groupes électrogènes dans la répartition économique de la charge. Néanmoins, les lignes d'interconnexion demandent des investissements et de l'entretien, et les frais ainsi encourus sont fonction de leur longueur, tension et capacité de transport. La construction des réseaux d'interconnexion et leur extension graduelle pose donc des problèmes économiques complexes où les avantages qu'ils permettent de réaliser pour la couverture des pointes jouent un rôle important.

\* \* \*

L'interconnexion une fois réalisée, une autre série de problèmes économiques se présentent en relation avec la répartition optimum économique de la charge pour une courbe de charge donnée.

Tenant compte de tous les groupes électrogènes disponibles, il s'agit d'établir le programme de leur exploitation sur la base des prévisions de la charge. On a donc développé des méthodes précises pour prévoir la courbe de charge dans tous ces détails et qui tiennent compte surtout de l'influence de la situation météorologique.

Généralement, les programmes d'exploitation des usines sont ensuite établis en mettant à la base la production des usines hydro-électriques au fil de l'eau, celle des usines géothermiques et celle des centrales pour la production combinée de chaleur et d'électricité, dont la production de chaleur pour faire face à la consommation du réseau de chauffage détermine généralement la production de l'énergie électrique.

Viennent ensuite les usines thermiques dans l'ordre croissant du coût spécifique du combustible consommé par kWh et les centrales hydro-électriques à réservoirs. Pour les productions de ces dernières, on tient compte, d'une part, de l'énergie emmagasinée dans les retenues et, d'autre part, des prévisions à court et à long terme du remplissage de ces réservoirs. Le problème de la répartition de la charge se complique encore si l'on doit tenir compte des limites de capacité de transport des lignes composant le réseau d'interconnexion, des pertes de transport provoquées par le transfert des charges, des consommations complémentaires de combustible par l'arrêt et redémarrage de certaines usines thermiques, le recours aux turbines à gaz et aux centrales de pompage pour la couverture de pointe et le remplissage efficace des creux de charge par la consommation de pompage.

Enfin, une dernière série de problèmes économiques concerne la sélection des investissements pour étendre l'équipement de production et de transport d'énergie électrique afin de faire face à la demande toujours croissante. Il s'agit de déterminer le nombre d'usines à construire de chaque type, en tenant compte du rôle que chacune d'elles devra jouer dans l'exploitation de l'ensemble.

Du point de vue économique, les différents types d'usines électrogènes, donc les usines à vapeur, les usines à moteur Diesel, les usines à turbines à gaz, les usines hydro-électriques au fil de l'eau, les usines hydro-électriques à réservoir, les centrales de pompage, etc. se distinguent par leur coût de construction spécifique par kWh et le coût partiel de chaque kWh produit. Généralement, les usines dont le coût de construction est relativement élevé, comme les aménagements hydro-électriques à réservoir saisonnier et les usines thermiques à vapeur de pression et de température élevées, produisent de l'énergie électrique d'un coût partiel par kWh relativement bas.



Elles sont donc appelées à fonctionner avec un facteur élevé d'utilisation. Par contre, les usines dont le coût de construction est relativement bas, comme les usines à moteur Diesel et les usines à turbines à gaz, accusent un coût partiel par kWh relativement élevé et leur exploitation n'est donc économique que si elles sont appelées à fonctionner avec un facteur d'utilisation relativement bas, donc pour les couvertures de pointe de charge et pour des fournitures d'appoint en cas d'urgence.

Il faut également déterminer la taille économique de ces différentes usines qui influe, d'une part, sur leur rendement, les frais de conduite, etc., et d'autre part sur la puissance de réserve à prévoir pour conserver une probabilité de défaillance acceptable.

Il faut en outre déterminer le développement du réseau d'interconnexion pour tirer pleinement avantage des caractéristiques différentes de chaque catégorie électrogène. Il s'agit donc d'une série de problèmes extrêmement complexes dont la solution est encore entravée par l'incertitude relative à certaines données de base, le développement du prix du combustible par exemple.

Pour leur solution on applique donc souvent des méthodes approximatives. On détermine par exemple tout d'abord le nombre d'usines d'un seul type et la taille économique de leurs groupes électrogènes permettant de faire face à la demande prévue. Ensuite on examine comment ce système d'usines peut être optimisé en remplaçant un certain nombre d'entre elles par des usines de pointe.

On a également appliqué les méthodes de recherche opérationnelle sur ce problème en déterminant par programmation linéaire un programme grossier de construction qui est ensuite détaillé par des études marginales. L'application des calculatrices digitales permet de comparer un grand nombre de solutions par études de simulation et d'en sélectionner la plus avantageuse. Cependant, pour les réseaux des pays en voie de développement, le problème se pose souvent de manière plus simple et les méthodes approximatives de sélection donnent généralement des résultats satisfaisants.

#### 4. Résultats de l'étude des problèmes du domaine de la couverture des pointes de charge

De ce qui précède, il est évident que la couverture des pointes de charge des réseaux électriques pose des problèmes techniques et économiques extrêmement complexes.

L'étude de l'ensemble de ces problèmes étant jugée utile, le Comité de l'énergie électrique de la Commission économique pour l'Europe a créé en 1960, un groupe

d'experts ad hoc chargé de l'étude de ce problème. Ce groupe d'experts a élaboré un document qui a été publié sous la cote ST/ECE/EP/19 et qui traite tous les problèmes de ce domaine dans leur ensemble ainsi que les méthodes que l'on a adoptées pour leur solution.

En outre, un Symposium sur la couverture des pointes de charge fut organisé à Venise en mai 1963 et 76 rapports y ont été soumis.

Le thème général de ce Symposium était subdivisé en quatre groupes :

- aspects généraux des problèmes posés par la variation de la charge;
- solutions aux problèmes techniques posés par les variations de la charge et relatifs à la construction et l'exploitation des centrales thermiques;
- solutions aux problèmes techniques posés par les variations de la charge et relatifs à la conception et l'exploitation des centrales hydro-électriques;
- solutions aux problèmes économiques posés par les variations de la charge.

Le document ST/ECE/EP/22 contient des informations détaillées sur l'organisation de ce Symposium, la liste des 76 rapports qui y ont été soumis et les résumés des discussions qui ont suivi l'examen de ces rapports.