

STAHEL

MOREL

La prévision des consommations d'électricité

Journal de la société statistique de Paris, tome 108 (1967), p. 223-237

http://www.numdam.org/item?id=JSFS_1967__108__223_0

© Société de statistique de Paris, 1967, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « Journal de la société statistique de Paris » (<http://publications-sfds.math.cnrs.fr/index.php/J-SFdS>) implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques
<http://www.numdam.org/>

V

SECTION DE LYON

LA PRÉVISION DES CONSOMMATIONS D'ÉLECTRICITÉ (1)

1. EXPOSÉ DE M. STAHEL

**D^r ès sciences économiques, Ingénieur économiste
à la Direction régionale d'Électricité de France.**

L'idée que la consommation d'électricité double tous les dix ans est largement répandue dans l'opinion. Cette loi qui passe pour être approximativement vérifiée dans tous les pays et à toutes les époques devrait faciliter l'établissement de prévisions et conférer peu d'intérêt à une étude dont les conclusions seraient déjà connues.

Mais l'histoire même de l'expansion de l'électricité montre que les cadences réelles de développement des consommations présentent des fluctuations parfois importantes autour de la tendance moyenne du doublement en dix ans.

1. Séance du 21 février 1967.

Ainsi, en 1966, la consommation française s'est élevée à 106,2 milliards de kWh contre 51 milliards de kWh en 1956 ce qui correspond à une cadence légèrement plus rapide que le doublement en dix ans, soit pour la période considérée 1956-1966, le doublement en neuf ans.

De 1923 à 1933, le doublement des consommations se vérifie exactement avec 16,8 milliards de kWh en 1933 contre 8,4 en 1923.

En revanche, cette consommation n'atteint que 21,1 milliards de kWh en 1943 contre 16,8 en 1933. Si l'on regarde de plus près, année par année, la courbe des consommations, on s'aperçoit que cette courbe connaît des fluctuations qui épousent assez bien les fluctuations de l'économie toute entière et ses vicissitudes (guerre — crise économique).

L'observation des consommations dans l'espace révèle qu'il n'y a pas uniformité des cadences de développement de la consommation entre pays.

Le niveau des consommations par habitant, en valeur absolue, connaît des décalages importants entre pays. Ainsi, en Allemagne, la consommation électrique moyenne par habitant est celle relevée aux États-Unis il y a quatorze ans, et la France a un retard de trois ans sur l'Allemagne. Le rattrapage implique dès lors des taux de croissance différents d'un pays à l'autre, et on conçoit qu'un pays en voie de développement rapide connaisse des taux de croissance supérieurs au 7 % annuel du doublement en dix ans.

Démentie par les faits, la loi du doublement en dix ans l'est aussi par la logique. Le doublement en dix ans postule que dans un réseau de production, transport, distribution, on installe dans une période de dix ans autant de puissance qu'il y en a eu d'installée depuis l'invention de l'électricité jusqu'à l'origine de la période considérée.

Or, M. AILLERET a montré que la succession de plusieurs périodes égales au temps de doublement conduit à des développements énormes : dix périodes de doublement correspondent à une multiplication par 1 000 environ. L'extrapolation de la consommation d'électricité absorberait toute l'énergie incluse dans le système solaire au bout d'un temps inférieur au millier d'années

La consommation d'électricité change ainsi rapidement d'ordre de grandeur. Suivant la loi du doublement décennal, la France consommerait plus de 1 000 milliards de kWh en l'an 2000 contre 106 en 1966. Au delà, la progression serait telle qu'il n'y a aucune raison de penser que la loi d'expansion sera conservée encore pendant plusieurs périodes de doublement. Ce raisonnement montre déjà qu'on ne peut compter sur une extrapolation indéfinie des besoins et qu'il est nécessaire d'effectuer des prévisions suivant une autre méthode que la prolongation des tendances passées.

D'autre part, les caractéristiques mêmes de cette énergie rendent nécessaires la prévision des consommations. L'énergie électrique ne peut être stockée de manière industrielle : elle n'apparaît qu'à l'instant où commence à fonctionner le générateur qui la crée, elle disparaît dès que cesse la marche de ce générateur. Toute demande supplémentaire d'énergie doit être satisfaite par la production d'un générateur en marche ou la mise en service instantanée d'un générateur supplémentaire.

Cette énergie possède, en outre, la propriété de se transmettre de façon quasi instantanée le long des conducteurs. La desserte de cette énergie est en effet soumise à la servitude d'un réseau de transport et de distribution, mais si les installations nécessaires existent, l'énergie électrique est un agent idéal et irremplaçable.

Le marché de l'électricité se caractérise par son universalité. Au stade des consommations intermédiaires, des industries productrices, cette énergie constitue une fourniture nécessaire à toutes les branches, au stade de l'utilisation par le consommateur final, elle est devenue une forme d'énergie presque sans concurrence pour l'éclairage, la force motrice d'installation fixe et la plupart des usages domestiques.

Les besoins d'énergie électrique revêtent un caractère impérieux qui apparaît dans les périodes de pénurie. On ne peut en effet réduire la consommation d'énergie électrique de plus de 10 % sans risquer des troubles graves.

Les installations de production, transport et distribution doivent être adaptées en tout instant et en tout lieu au développement de la demande. Un sous-équipement se traduira par des pertes pour l'économie dont la capacité de production ne sera pas utilisée à plein, faute d'énergie. De même, un suréquipement assurera la satisfaction de la demande mais, en revanche, aura immobilisé des capitaux excédentaires qui eussent mieux été employés par ailleurs. Dans tous les cas il y a gaspillage qui peut être évité par une évaluation correcte des besoins futurs en énergie.

Cette prévision de la demande doit se faire à la fois dans le temps et dans l'espace.

Dans le temps, l'adaptation de la production à la consommation doit être quasi instantanée et le diagramme de charge prend déjà un intérêt à l'échelle de la minute.

Cette adaptation est réalisée par l'unité de commandement de la production et les mouvements d'énergie sur l'ensemble du territoire.

Tous les soirs, les centres régionaux des mouvements d'énergie (au nombre de huit en France) envoient au Service national, l'indication des disponibilités en potentiel de productions et en transport. Le Service national établit des prévisions de consommations jour par jour, d'après des données météorologiques statistiques et coordonne ces données d'après un plan établi, en fonction des coûts de fonctionnement des centrales thermiques et de l'énergie hydraulique disponible. Le lendemain matin, les centres régionaux des mouvements d'énergie reçoivent l'indication des productions qui leur sont assignées et des lignes de transport qu'ils devront emprunter. A tout instant, la demande est totalement satisfaite aux conditions les plus économiques.

En période infra-courte la demande est satisfaite par les équipements existants dont il suffit de combiner aux mieux les capacités et les coûts de revient pour atteindre l'optimum économique.

A très court terme, dans un système de production hydraulique ou mixte hydraulique-thermique, l'incertitude due aux variations de l'hydraulicité sur le volume de la production est beaucoup plus grande que l'incertitude qui serait due aux variations conjoncturelles de la demande. De ce fait, on considère que les marges de production (thermique) que l'on est contraint de se ménager pour se couvrir contre l'aléa hydraulique, sont suffisantes pour se prémunir en même temps contre l'aléa de la demande due à la conjoncture économique. Ceci explique que la prévision à court terme a peu retenu, jusqu'à présent, l'attention des économistes électriciens.

En période longue, la demande se développe et ne peut être satisfaite que par des équipements nouveaux. La mise en service de ceux-ci doit s'échelonner dans le temps de manière à satisfaire la demande sans délai. Il est donc indispensable d'effectuer des prévisions de développement de la demande correspondant aux périodes nécessaires pour réaliser les ouvrages de production, transport, distribution. Il faut en effet de 3 à 6 ans et plus pour

construire une usine de production, de 2 à 3 ans pour réaliser les lignes et postes de transport à très haute tension, de 6 à 18 mois pour réaliser les ouvrages de distribution proprement dits. Les usagers, de leur côté, acceptent rarement des délais supérieurs à un an pour le raccordement de leurs installations nouvelles au réseau de distribution.

L'intérêt des études prévisionnelles apparaît aussi au niveau de la politique financière et tarifaire des entreprises de production et distribution d'électricité. Les ouvrages de production et de transport d'énergie exigent d'assez longs délais de réalisation et représentent des immobilisations coûteuses. L'importance du phénomène investissement est particulièrement sensible dans le secteur de l'électricité qui réalise en valeur ajoutée 1,5 % de la production intérieure brute, mobilise un demi pour cent de la population active et est responsable chaque année de 5 % de l'investissement national.

Les études techniques des programmes d'investissement conduisent très fréquemment à plusieurs solutions comportant la construction d'une série d'ouvrages suivant un échancier dépendant de l'évolution de la demande d'énergie. Pour comparer ces diverses solutions, on calcule la valeur actualisée des dépenses pour chaque solution en tenant compte des époques où chaque ouvrage élémentaire doit être réalisé.

La rentabilité d'un très gros équipement hydro-électrique ou d'une grosse artère de transport dépend de la cadence avec laquelle ils pourront être progressivement utilisés jusqu'à leur pleine capacité.

Les prévisions doivent donc dépasser la simple durée de construction des ouvrages et dans le cas où une régression éventuelle peut être envisagée, elles doivent être poussées jusqu'à la durée d'amortissement des ouvrages c'est-à-dire à l'échelle de 20 — 30 — 40 ans. Si la demande d'électricité est destinée à s'infléchir on préférera des ouvrages plus rapidement amortis, si au contraire, les cadences actuelles de développement doivent se poursuivre pendant longtemps, on pourra envisager la réalisation d'ouvrages très importants. Il n'est donc pas sans intérêt d'imaginer le marché de l'électricité dans quarante ans, ce qui implique une méthode de prévision très différente de l'extrapolation du passé.

Pour les ouvrages de distribution dont les délais de réalisation sont relativement courts et dont les montants d'investissement par tranches ou par opération individuelle sont bien moins élevés que lorsqu'il s'agit de production ou de transport d'énergie on pourrait penser qu'il suffit de suivre pas à pas l'évolution des besoins pour assurer l'ajustement de l'offre et de la demande. En réalité, on a constaté, en comparant a posteriori un réseau existant avec le réseau qu'on aurait réalisé si on avait connu à l'avance la répartition des charges, que la longueur des lignes strictement nécessaires pour assurer le service était inférieure de 13 % à la longueur des lignes existantes. Il est donc utile d'effectuer aussi des prévisions à long terme pour les ouvrages de la distribution d'énergie.

En outre, la politique tarifaire des entreprises de production et de distribution d'électricité ne peut être fixée qu'en tenant compte de l'évolution à long terme des consommations et des investissements, évolution qui permet d'établir une série de budgets prévisionnels de dépenses et de recettes. Ces budgets permettent :

- d'établir la structure et le niveau des tarifs à appliquer pour assurer l'équilibre financier de l'entreprise et, éventuellement, un autofinancement suffisant évitant une augmentation trop rapide de la dette obligatoire;

- de calculer les variations à appliquer aux tarifs en cas de variations du niveau général des prix.

Les programmes d'investissement sont échelonnés dans le temps mais ils doivent aussi être localisés dans l'espace.

Au niveau des ouvrages de production cette localisation est surtout déterminée par des considérations techniques et géographiques plus que par la localisation des consommations.

Au niveau du transport d'énergie il convient de déterminer l'importance des transits à assurer entre les régions productrices et les zones de consommation. Il est donc nécessaire de disposer de prévisions de consommations par régions.

Cette nécessité de la localisation des prévisions est encore plus évidente pour la distribution d'énergie électrique.

Les usagers sont très nombreux (Électricité de France compte 15 millions d'abonnés) et souscrivent des puissances variant entre un et plusieurs milliers de kWh pour effectuer des consommations annuelles d'énergie variant de quelques dizaines de kWh dans une résidence secondaire à près de deux milliards de kWh pour une seule usine produisant de l'aluminium. De plus, ces usagers sont très inégalement répartis sur le territoire et le développement des consommations est très inégal suivant les genres d'activités et le dynamisme de ces activités. La structure du marché de l'électricité semble devoir être influencée sensiblement par la structure économique de la nation ou de la région considérée. La répartition géographique du peuplement et des activités économiques (Agriculture — Industrie — Transport — Services) commandera la localisation des consommations d'énergie.

La localisation des prévisions dans l'espace est utile aussi aux études tarifaires. Les prévisions de recettes et de dépenses dans l'espace permettent de différencier les prix de revient régionaux de la fourniture du kWh. Même si l'énergie n'est pas un facteur décisif dans l'aménagement du territoire, une politique tarifaire doit en tenir compte.

Que le système économique soit dirigé du centre (économie planifiée du type soviétique) ou de la périphérie (système libéral) l'établissement des prévisions de la demande d'énergie électrique et de plans d'investissement à long terme est indispensable pour satisfaire les besoins des usagers.

Rien ne garantit que l'avenir ressemblera au passé. On ne peut donc se fier à la loi du doublement en dix ans. Cette loi est surtout infirmée dans l'espace où les cadences de développements des consommations sont hétérogènes.

L'absence de prévision et de plan conduirait, en cas de sous-équipement, à la paralysie de l'économie par la rupture des fournitures d'énergie électrique. En cas de suréquipement, des ressources disponibles seraient gaspillées. Un échelonnement défectueux des investissements dans un secteur de base comme celui de l'énergie électrique contribuerait ainsi à l'amplification des fluctuations du système économique.

La question qui se pose est : comment effectuer ces prévisions et quels vont être les principes directeurs de la méthode.

Ces prévisions devront être complètes (c'est-à-dire concerner la totalité du marché de l'électricité), cohérentes (c'est-à-dire être homogènes avec les perspectives économiques de l'ensemble du système) et opératoires (se présenter sous une forme utilisable par les techniciens des réseaux).

I — LES PERSPECTIVES A LONG TERME DE CONSOMMATION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE.

Le déterminisme du moyen terme est dû à la permanence des structures. La période longue se définit au contraire par les changements de structure, les adaptations nécessaires à la poursuite de la croissance. On assiste à l'élimination des structures périmées, à des innovations, au changement de proportions dans l'ensemble économique. Les relations technologiques entre la production des divers secteurs et leurs besoins en électricité ont toute chance d'être sérieusement modifiées dans la longue période. Au delà de 1975, on ignore quelle sera l'évolution économique probable et la nature de l'intensité des liens à cette époque qui relieront celle-ci à la consommation d'électricité.

Il convient donc d'adopter un corps d'hypothèses dont il serait vain d'affirmer le degré de probabilité qui les affectera ni même peut-être leur simple vraisemblance mais auxquelles on peut tout au moins assurer une certaine cohérence interne.

M. BOITEUX ⁽¹⁾ observe que 80 % de la consommation d'énergie électrique est imputable à l'industrie et qu'il est raisonnable de penser que le développement de celle-ci restera le moteur essentiel de la demande.

Quel est donc le développement à attendre de l'industrie? Les études de COLIN CLARK et de FOURASTIÉ ont habitué à la distinction des trois grands secteurs de l'économie :

- Secteur primaire : Agriculture — forêts pêche — industries extractives.
- Secteur secondaire : Industrie productrice de biens matériels à partir des matières premières fournies par le secteur primaire.
- Secteur tertiaire : Transport — commerces — banques — services — administrations.

C'est dans le secteur secondaire que la croissance de la production est maximum. La substitution du travail mécanique au travail humain y atteint le plus haut degré, grâce aux innovations techniques. Ce relais de la force humaine par l'énergie électrique exige de plus en plus d'électricité.

L'évolution des économies en croissance conduit à une demande de plus en plus forte en services. Or, la productivité des services croissant moins vite que celle des producteurs industriels il en résulte un glissement d'effectifs des secteurs primaire et secondaire vers le tertiaire. Cette tendance est renforcée par la surenchère des rémunérations proposées au secteur tertiaire.

Par contre-coup, la tendance à l'automatisation de l'industrie se trouve renforcée, ce qui autorise un plus large emploi de l'énergie électrique.

L'observation des économies en avance de plus de vingt ans sur nous (États-Unis) montre que la saturation de la demande de production en biens et services est encore très éloignée. On peut admettre que les taux de croissance de la productivité dans l'industrie et les services resteront ceux que nous constatons actuellement (4,6 % dans l'industrie et 3,75 % dans les services).

En élaborant des perspectives sommaires de population active par grands secteurs pour la fin du siècle et en combinant ces perspectives avec les taux de productivité qui ont

1. Perspectives de développement à long terme de la consommation d'énergie électrique en France M. BOITEUX, Revue française de l'énergie, novembre-décembre 1961.

toute chance de se perpétuer, l'auteur arrive à la conclusion que la production industrielle pourrait tripler de 1975 à la fin du siècle.

Cette évolution apparaît vraisemblable si l'on considère que la production par tête serait alors à un niveau compris entre une fois et demie et deux fois la production actuelle par tête aux États-Unis; or, les prévisionnistes américains escomptent une progression plus forte. Les hypothèses retenues ne permettraient donc pas au niveau de vie français, de rattraper le niveau de vie américain avant l'an 2000, ce qui apparaît relativement modéré.

Ceci semble garantir un bel avenir à la consommation d'énergie électrique. En raison des progrès de productivité, l'élasticité des consommations d'électricité en haute tension a plutôt tendance à croître. Dans ces conditions, il n'est pas excessif de prévoir pour un triplement de la production industrielle, un quintuplement de la consommation d'électricité entre 1975 et l'an 2000, date où M. BOITEUX l'évalue entre 750 et 1 000 TWh ⁽¹⁾.

En outre, le prix relatif de l'électricité sur le marché énergétique devrait se réduire, grâce à l'énergie nucléaire, ce qui élargira le champ des substitutions de l'énergie électrique et renforcera le taux de croissance des consommations. Les estimations avancées constitueraient des minima.

Des remarques analogues sont effectuées pour la basse tension et notamment les usages domestiques. Le retard des consommations françaises par habitant (192 kWh/habitant) est très grand vis-à-vis des consommations américaines (1 000 kWh/habitant actuellement). En admettant que les usages domestiques, en France atteignent d'abord le niveau américain actuel puis rejoignent aux environs de 1 500 kWh par habitant le niveau vers lequel tendraient les consommations Outre-Atlantique, on arriverait, pour la population française de la fin du siècle, à un minimum de 1 000 TWh.

Une évaluation identique conduit à 50 TWh la consommation due aux usages non domestiques.

Ces évaluations ne tiennent pas compte des possibilités de substitution dues à la baisse relative des prix de l'électricité et paraissent ainsi être en deçà du probable.

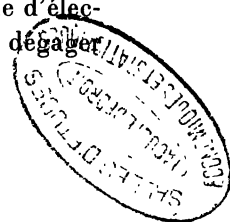
En définitive, M. BOITEUX fournit les évaluations suivantes de la consommation d'électricité en France vers l'an 2000 :

Haute tension :	750 à 1 000	TWh
Basse tension :	150 à 200	TWh
Pertes :	50	
	950 à 1 250 TWh	

Ces évaluations brutalement comparées au niveau actuel des consommations (400 TWh, en France auraient pu apparaître excessives sinon fantaisistes. Il fallait recourir à des réflexions de nature prospective pour relayer l'analyse statistique et justifier par un corps d'hypothèses que le bon sens ne répudie pas, une prévision à échéance aussi lointaine pour laquelle une extrapolation sommaire paraissait insuffisante.

Ces conclusions apparaissent d'autant plus plausibles qu'il n'a pas été tenu compte de la baisse relative des prix de l'électricité et même de la simple relation entre l'expansion de la baisse du prix de revient avec la quantité produite et l'élasticité de la demande d'électricité par rapport au prix. Certes, cette réflexion prospective n'est pas arrivée à se dégager

1. 1 TWh = 1 Terawattheure = 1 milliard de kWh.



complètement de l'observation du passé. Certains postulats ont été admis dont rien ne garantit systématiquement la permanence :

- maintien pendant quarante ans des taux d'amélioration de la productivité que nous connaissons;
- usage de l'électricité sous sa forme actuelle, et relais obligé entre l'atome et l'usager;
- croissance des économies non perturbée par des événements graves (guerre — cataclysme).

Mais rien n'interdit de réviser ces essais prospectifs au fur et à mesure des innovations et d'une amélioration de la connaissance des phénomènes dont on a postulé la permanence. Pour l'instant l'expansion des consommations au rythme actuel apparaît nullement invraisemblable, ce qui confère une garantie aux prévisions à moyen terme des plans.

II — LES MÉTHODES DE PRÉVISION A MOYEN TERME DES CONSOMMATIONS D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

1) *Corrélation entre la consommation d'électricité et la production industrielle.*

Le développement des consommations n'est pas rigoureusement proportionnel à l'évolution de l'activité industrielle. En période de basse conjoncture, l'électricité connaît un recul moindre que l'industrie et rattrape promptement ses pertes lors du retournement de la tendance. Cette régularité plus grande de l'électricité s'explique par les progrès de l'électrification qui gagne de nouveaux usages et par les besoins fixes qui doivent être couverts indépendamment du niveau de l'activité générale. Les usages domestiques sont relativement indépendants de l'activité générale et dans l'industrie, certains besoins doivent être satisfaits qui sont sans lien avec le niveau de production (éclairage, climatisation).

On a donc recherché une formule qui n'exprimerait pas une simple proportionnalité entre la consommation et l'indice de production industrielle, mais déterminerait le taux d'augmentation de la consommation d'électricité comme résultant de l'action combinée de deux facteurs :

- a) l'un traduisant la tendance de l'électricité à étendre le champ de ses applications et à couvrir les besoins largement fixes;
- b) l'autre un élément variable fonction de l'activité industrielle.

La formule qui est le plus couramment utilisée pour les services d'électricité de France, s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{\Delta C}{C} \equiv k \frac{\Delta I}{I} + r$$

Où : $\frac{\Delta C}{C}$ = accroissement de la consommation d'électricité d'une année sur l'autre;

$\frac{\Delta I}{I}$ = accroissement correspondant de la production industrielle;

k et r des coefficients à déterminer;

k est le coefficient qui exprime le degré de proportionnalité de l'évolution des consommations d'électricité et de l'évolution de la production industrielle;

r exprime la part de l'accroissement de la consommation due aux progrès de l'électrification.

En France, on utilise les valeurs suivantes de k et r ;

$$\begin{aligned} k &= 0,4 \\ r &= 0,05 \end{aligned}$$

Ce qui signifie que la consommation annuelle d'énergie électrique en France varie de 0,4 % pour un changement d'activité industrielle de 1 % et qu'indépendamment de cette relation, elle a une tendance naturelle à croître d'environ 5 % par an du fait de son expansion propre.

Dans l'hypothèse où l'accroissement de la production industrielle est de 5 % par an, on obtient un taux de 7 % correspondant au doublement en dix ans. En réalité, l'accroissement de la production industrielle, en raison des vicissitudes économiques, ne se stabilise pas à 7 % à toutes les époques et dans tous les pays. Cela montre une fois de plus que la loi du doublement décennal ne peut être considérée comme vérifiée.

La valeur des coefficients k et r de la formule varie suivant la structure industrielle du pays considéré. Le coefficient k sera d'autant plus élevé que le pays sera plus industrialisé et r moindre. En sens inverse, le coefficient r sera élevé dans les pays où l'électrification en surface et en profondeur ne sera pas achevée.

On peut objecter cependant que l'électricité étant utilisée par l'ensemble de l'économie (industrie — service — foyers domestiques) il n'est pas suffisant de relier son évolution à la seule production industrielle.

Les études de comptabilité nationale qui se proposent de décrire de façon précise et complète l'économie d'un pays ont forgé des concepts globaux visant à synthétiser tous les résultats de l'activité économique.

Le concept de production étant au centre des systèmes de comptabilité nationale on a cherché les relations existant entre la production intérieure brute et la consommation d'électricité.

2) *Corrélation entre la consommation d'électricité et la production intérieure brute.*

La comptabilité nationale synthétise les résultats de l'activité économique de la nation par le concept de production.

La production consiste à faire apparaître de nouveaux biens, c'est-à-dire des moyens supplémentaires de satisfaire les besoins humains.

On mesure donc la quantité des produits nouveaux apparus dans la nation au cours d'un exercice.

Dans la terminologie de la comptabilité nationale française la production intérieure brute désigne :

— l'ensemble des biens fabriqués et des seuls services commercialisés par les personnes françaises et étrangères résidant sur le territoire national.

Sont donc exclus dans cette décision :

— les biens se prêtant difficilement à la mesure (travaux ménagers);

— les services non commercialisés;

— les biens produits par des nationaux à l'étranger (d'où le terme de produit « intérieur »).

Par ailleurs, on parle de production brute lorsqu'on n'a pas retranché de la production globale les biens créés pour la reconstitution des outillages (amortissement), la p.i.b. ⁽¹⁾ reflète donc bien l'intégralité de la production de biens et de services (à l'exception des services non commercialisés) apparus sur le territoire au cours d'une période donnée.

On a cherché une liaison entre la consommation d'électricité et la production intérieure brute, telle qu'elle est définie plus haut.

Cette liaison pourrait s'écrire sous la forme suivante :

$$\frac{\Delta C}{C} = k \frac{\Delta Pib}{Pib} + r$$

Où : $\frac{\Delta C}{C}$ exprime l'accroissement de la consommation d'électricité.

et : $\frac{\Delta Pib}{Pib}$ l'accroissement de la production intérieure brute;

k et r des coefficients à déterminer.

Comme dans la formule précédente (avec la production industrielle) on aurait un coefficient de proportionnalité à la variation de la p.i.b. et un coefficient exprimant la part « autonome » du développement de l'électricité.

La détermination de ces coefficients s'est révélée malaisée et les services d'études ont retenu successivement les valeurs suivantes :

En 1950	$k = 1$	$r = 3,5$
1961	$k = 1,1$	$r = 3$
1962	$k = 0,75$	$r = 4,5$

Cette hésitation dans le choix des coefficients provient de ce que la corrélation est moins évidente entre l'électricité et le p.i.b. qu'entre l'électricité et la production industrielle. On trouve un coefficient de corrélation de 0,60 à 0,70 suivant les calculs alors que le coefficient de corrélation avec la production industrielle atteint des valeurs excellentes de l'ordre de 0,97.

Ceci n'a rien d'étonnant si l'on considère que l'indice de production industrielle recouvre 85 % environ des consommations d'énergie, alors que la production intérieure brute qui englobe, outre la production industrielle, celle des services commercialisés, ne recouvre que 50 % de la consommation d'énergie.

Malgré la moins bonne qualité de la liaison, les prévisionnistes utiliseront la corrélation avec la p.i.b. puisque les services du Plan définissent les objectifs de la nation par un taux de croissance de la production intérieure brute.

En ce qui concerne cette corrélation entre la consommation d'électricité et l'indice de la production industrielle ou le niveau de la production intérieure brute, M. MORLAT ⁽²⁾ note la faiblesse des modèles employés :

Si au lieu de choisir un indice raisonnable (production industrielle ou production intérieure brute) on introduisait dans le modèle, comme variable explicative de la consommation d'électricité, une grandeur telle que la production de maïs ou l'indice des prix de détail, ou encore le nombre de victimes d'accidents de la route, etc., on trouverait également un ajustement excellent avec un coefficient de corrélation dépassant 0,90. En effet, il suffit

1. p.i.b. : expression abrégée pour : production intérieure brute.

2. « Méthodes de prévision de consommation d'énergie électrique », G. MORLAT, Revue française de l'énergie, n° 164, novembre 1964.

de confronter deux chroniques fortement croissantes pour que la méthode conduise à un tel résultat. Cela ne suffit pas, note M. MORLAT, à nous faire conclure que l'un des deux phénomènes pourra être prévu avec sécurité à partir de l'autre.

Pour se prémunir de ces corrélations fallacieuses, M. MORLAT fait remarquer que si deux chroniques sont réellement liées, non seulement elles doivent être également croissantes en moyenne, mais encore les croissances annuelles successives doivent être liées : cela conduit à s'intéresser aux variations successives des chroniques et non plus à leurs niveaux absolus, et M. MORLAT propose le modèle suivant :

$$\text{Log} \frac{c_t}{c_t - 1} = a + b \text{Log} \frac{I_t}{I_t - 1} + z_t$$

Dans ce modèle :

c_t représente la consommation de l'année t ;
 a et b des coefficients de proportionnalité (correspondant aux coefficients k et r cités plus haut);
 z_t représente une suite d'aléas indépendants et de même loi;

I l'indice du paramètre choisi (production industrielle ou production intérieure brute).

Cette formule permet de déduire la loi de probabilité de la consommation d'une année future quelconque dès lors qu'on se donne les valeurs des paramètres du modèle et la valeur future de l'indice I .

En conclusion : La nécessité de la prévision de la demande d'électricité est impérieuse pour élaborer à temps les programmes d'équipement de production, de transport et de distribution.

Le volume des investissements (2/3 du chiffre d'affaires pour E. D.F. chaque année) la nécessité d'adapter à tout instant l'offre à la demande imposent à la fois d'explorer le marché de l'énergie à long terme et de rechercher des lois de développement à peu près régulières dans le moyen terme.

Les différents types de prévisions de la demande d'électricité répondront donc à des finalités différentes et des démarches intellectuelles différentes.

La prévision à long terme qui vise à imaginer ce que sera le marché de l'électricité dans 30 ou 40 ans est le domaine de la réflexion prospective. Il s'agit de substituer la prévision par anticipation, à la prévision par extrapolation. On s'intéressera au niveau que peut atteindre l'énergie électrique consommée par habitant et aux vitesses de développement de la demande globale. Rien ne laisse prévoir dans les faits une saturation de la demande et l'asymptote des courbes est particulièrement difficile à déterminer.

A moyen terme des régularités aléatoires ont été dégagées de l'analyse du passé dans les conditions de consommations et l'on conservera ces régularités pour l'avenir prochain. La prévision à moyen terme est ainsi celle des modèles qui font la liaison entre la consommation d'électricité et la production intérieure brute, entre la consommation d'électricité H. T. et la production industrielle. Les plans d'équipements nationaux par leur terme (cinq ans) et leur horizon (à 15-20 ans) prévoient ainsi l'environnement économique probable. Si les liaisons entre la demande d'énergie électrique et l'environnement économique se maintiennent la prévision sera d'autant mieux assurée. L'usage est donc de retenir une estimation probable (celle qui a 3 chances sur 4 de n'être pas atteinte et, 1 chance sur 4 d'être dépassée).

La prévision à court terme a paru fort peu nous intéresser jusqu'à présent, puisqu'on relève que dans un pays approvisionné en électricité hydraulique les aléas de l'hydraulicité sont plus forts que les aléas de la conjoncture économique. Mais au moment où l'équipement français évolue nettement vers la prépondérance du thermique, l'E. D. F. devra se préoccuper de plus en plus de la conjugaison des différents types d'aléas. Le traitement de l'incertain fait l'objet actuellement d'études de longue haleine.

A court terme, il s'agit avant tout, d'ajuster l'offre à la demande dans l'instant, mais les mises en services successives des équipements nouveaux doivent le permettre. Les plans doivent donc être mis en œuvre et se traduire par des programmes de travaux d'équipement.

Il nous faut passer de la prévision à la décision, de la décision au calcul. C'est l'objet de l'exposé de M. MOREL.

2. Exposé de M. MOREL

Ingénieur E. D. F. au Centre régional
de mouvements d'énergie

Il vient d'être dégagé quelques-unes des méthodes qui permettront à l'électricien de diminuer ou au moins d'évaluer le caractère aléatoire de ses valeurs prévisionnelles.

Ces valeurs, l'exploitant va devoir les utiliser immédiatement, pour résoudre les multiples problèmes techniques et prendre les décisions engageant l'avenir.

C'est-à-dire, qu'il lui faut passer du domaine purement statistique et économique, aux plans technico-économique et technique.

C'est dire aussi que les faisceaux de prévisions devront se concentrer dans l'espace et dans le temps :

- concentration dans l'espace, pour l'étude de surfaces adaptées aux matériels en usage;

- concentration dans le temps, car l'évaluation du volume annuel de l'énergie n'est pas suffisante. Il faudra, en outre, distinguer des valeurs semestrielles, mensuelles, journalières et surtout instantanées; la notion de débit revêt là, comme en bien d'autres domaines, une extrême importance.

En schématisant beaucoup, nous serons amenés à distinguer :

- des prévisions d'exploitation : échéance journalière, hebdomadaire et annuelle;
- des prévisions à moyen terme : échéance portée à 5-6 années.

1 — *Une brève description préliminaire* de la structure des moyens nationaux de production et de transport d'énergie électrique, permettra peut-être d'éclairer un peu la présentation de ces deux parties. La production est assurée par un réseau de centrales thermiques et hydrauliques; ces dernières se trouvent traditionnellement classées en trois catégories : « fil de l'eau », « éclusées », « réservoirs saisonniers ». Le rôle capital joué par ceux-ci est de détruire le caractère par trop aléatoire des productibilités hydrauliques naturelles et de les remplacer par des productions soumises à la volonté de l'exploitant.

Or, la répartition de ces unités de production est étroitement liée à celle des « sites » disponibles, donc à celle d'éléments géographiques (montagnes, fleuves, ports...).

Les principales zones de consommation ne coïncident pas obligatoirement avec cette répartition. L'éloignement, parfois important, nécessite donc la mise en place et le renforcement permanent d'un solide réseau de transport d'énergie électrique à très hautes tensions (T. H. T.). Ce réseau est aussi exigé par la complémentarité des énergies d'origine hydraulique et thermique.

Relié aux sources de production, le réseau T. H. T. alimente de grandes stations d'aiguillage d'où l'énergie est répartie régionalement jusqu'aux points de livraison haute tension.

Avant d'être consommée, l'énergie franchit souvent plusieurs échelons :

- les très importants établissements industriels et les grands centres urbains bénéficient d'une alimentation directe par le réseau T. H. T. ;
- les industries de base et les villes moyennes sont raccordées à l'étage H. T. ;
- enfin, les industries plus modestes et les villages reçoivent l'énergie en moyenne tension, alors qu'artisans, commerçants et usagers domestiques se trouvent au bas de la cascade sur les réseaux basse tension.

En respectant les contraintes posées par cet ensemble de matériels, l'exploitation consiste donc à assurer au mieux les impératifs principaux suivants :

- permanence de l'alimentation de la clientèle ;
- recherche du moindre coût de production ;
- respect de deux critères de qualité de l'énergie, à savoir une fréquence et une tension variant dans de faibles limites.

2 — *Les prévisions d'exploitation résultent de cette définition des objectifs :*

Il faudra en effet, à chaque instant :

- prévoir la demande afin d'ajuster l'offre ;
- prévoir les moyens matériels capables d'assurer cette offre et son transit sur les réseaux décrits ci-dessus, avec une sécurité suffisante.

On voit donc qu'il s'agit d'un ensemble de problèmes complexes, assortis d'un grand nombre de paramètres. La résolution théorique générale fait actuellement l'objet d'études approfondies — notamment par les Services Études et Recherches et Mouvements d'énergie d'E. D. F. Il n'entre pas dans le modeste cadre de cet exposé de développer cet aspect de la question. Nous nous bornerons à rappeler brièvement les prévisions utilisées et leur orientation.

a) *Les prévisions hydrométriques* s'appuient sur des séries chronologiques aussi longues que possible et cherchent à fournir des prévisions probabilisées d'apports hydrauliques, de débits des fleuves, ou des stocks neigeux. Leur échéance varie de la journée à l'année.

b) *Les prévisions d'indisponibilité du matériel*, liées aux précédentes, doivent tenir compte de facteurs économiques comme le coût marginal de production.

c) *Les prévisions de consommation*, à l'échelle annuelle, hebdomadaire et journalière, revêtent une importance capitale. Plus particulièrement, l'estimation de la consommation du lendemain et sa répartition au long des différentes heures permet de diffuser les instruc-

tions de production aux diverses centrales, en respectant toujours, bien entendu, les nombreuses contraintes existantes.

Profitant déjà des recherches évoquées plus haut, les méthodes s'affinent par la mise en évidence de dépendances et de corrélations, par la référence à des courbes type, par l'exploitation statistique plus systématique des phénomènes passés. Des ajustements demeurent nécessaires pour tenir compte des facteurs aléatoires comme la température, la nébulosité, les conditions économiques locales...

Cette évolution exige l'appui de moyens modernes de calcul. Mis en place progressivement, ils permettent déjà de minimiser les pertes sur les réseaux T. H. T. par exemple; par contre l'optimisation complète des moyens de production n'est pas encore réalisée.

Mais, assurer les besoins de la consommation dans les instants, les heures ou les mois qui suivent, ne suffit pas; cet objectif permanent doit s'étendre aux années à venir.

3 — *Les prévisions de consommation à moyen terme* constituent alors un moyen d'y parvenir. En effet, la demande s'accroît continuellement, entraînant sans cesse des investissements nouveaux et variés. Les délais de construction assez étendus « 3 à 6 ans pour les ouvrages importants » imposent donc des mises en chantier préalables. L'ordonnancement de ces travaux dépend dans une large mesure de l'évaluation aussi détaillée que possible des consommations futures.

Mises à jour chaque année, ces prévisions à moyen terme figurent parmi les documents utilisés par la commission des investissements.

Elles s'appuient sur des méthodes légèrement différentes de celles qui furent évoquées dans le premier exposé. Il est en effet possible de partir d'informations à caractère individuel pour les développements des établissements industriels importants et pour ceux des zones urbaines. La connaissance des consommations en énergie électrique par tonne ou par mètre cube de produit fabriqué et les hypothèses concernant les évolutions sectorielles de la productivité permettent d'étayer et de contrôler ce type d'information.

Ces prévisions basées sur une enquête s'attachent à définir les notions liées d'énergie et de puissance. Pour éviter la défaillance, il importe en effet que les moyens de production et de transport puissent faire face aux deux « goulots d'étranglement », à savoir :

- l'énergie consommée en hiver pendant les 1 600 heures les plus chargées;
- la puissance de pointe maximum.

En vue d'une utilisation directe, l'étude satisfait à une double ventilation :

— ventilation dans le temps : la période annuelle envisagée s'entend de juin à juillet; elle correspond mieux ainsi à une année hydrologique. L'énergie annuelle prévue est répartie par semestres et l'on évalue le volume du trimestre hiver contenant les 1 600 heures de plus forte consommation.

Les modulations de l'énergie au long de journées caractéristiques (courbes de charge), les puissances maximales atteintes sont également étudiées avec soin :

— ventilation dans l'espace : afin de préparer les décisions d'investissements à opérer dans les réseaux électriques de transport, l'analyse des charges futures doit descendre au niveau des points de livraison haute tension, eux-mêmes alimentés à partir de postes T. H. T., comme nous l'avons vu plus haut. Sur le plan théorique, cette ventilation n'entraîne pas de difficultés puisque le comportement du point de livraison H. T. constitue la base de cette

méthode analytique. Sur le plan pratique, la localisation précise des unités industrielles nouvelles est, par contre, très délicate.

Notons enfin qu'il existe divers paramètres caractéristiques — comme la durée d'utilisation de la puissance maximum — fort nécessaires pour assurer une certaine cohérence à l'ensemble des valeurs prévisionnelles partielles.

A partir de ces prévisions de consommations et d'hypothèses de production hydraulique, un calculateur fournit des résultats concernant les puissances transitées sur les lignes et dans les transformateurs, orientant ainsi les renforcements ou les constructions de ce type d'ouvrage.

En conclusion, l'ensemble des moyens mis en œuvre pour la préparation de l'avenir, proche ou plus lointain, laissera une place de plus en plus vaste aux techniques statistiques évoluées, souvent bien adaptées au traitement de l'incertain et que les calculateurs électroniques rendent d'un maniement plus commode.

M. VIGNON met ensuite l'accent sur les études concernant les variations de puissances au cours de la journée. Il montre notamment l'influence qu'une politique tarifaire peut avoir sur l'allure d'une courbe de charge. Les pays étrangers ont ainsi provoqué l'apparition des puissances maxima durant les heures creuses de la nuit, par l'usage prolongé de dénivellations tarifaires élevées. En général, la prévision ne peut tenir compte d'un éventuel changement de politique tarifaire.