JOURNAL DE LA SOCIÉTÉ STATISTIQUE DE PARIS

PIERRE JUNG

Évolution et prévision de la consommation d'énergie électrique en France

Journal de la société statistique de Paris, tome 97 (1956), p. 86-115
<http://www.numdam.org/item?id=JSFS_1956__97__86_0>

© Société de statistique de Paris, 1956, 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/

IV

ÉVOLUTION ET PRÉVISION DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE EN FRANCE

> Une théorie, une loi, une technique n'existent que par des faits, reposant sur des faits préalables.
>
> (Ed. Le Roy).

L'attrait du mystère de l'avenir fait partie des éternelles contradictions de l'esprit humain. Inquiets du futur et recherchant une inaccessible recette de jouvence, les hommes de tous les siècles n'en ont pas moins souhaité dévoiler le secret du lendemain ou être plus âgés pour le connaître.

Bien des industries ont au cours du temps tiré fortune de ce penchant naturel. Mais, progressivement, la curiosité a fait place au point de vue utilitaire. Au XVIIe siècle, Bacon énonçait déjà : « Savoir pour prévoir; prévoir pour pourvoir ». Le progrès scientifique aidant, cette proposition a subi le poids de l'accélération générale, et des hypothèses d'avenir deviennent de plus en plus nécessaires au comportement de l'homme moderne.

Les oracles ou la boule de cristal ne constitueraient qu'une médiocre garantie pour l'industriel du XXe siècle et, en dépit du crédit dont jouissent encore les horoscopes, des méthodes plus scientifiques sont préférables dans le domaine économique. Cependant, il serait vain d'imaginer qu'elles dispensent de tout esprit critique en dotant d'une double vue : elles s'efforcent seulement de tirer des lois des informations du passé pour tenter d'affecter une probabilité aux différentes perspectives possibles.

Tel est l'objet de la statistique : réunir et coordonner des observations, les interpréter et chercher à en faire l'application au futur.

Là où l'intuition du chef d'entreprise suffisait naguère, il est maintenant devenu prudent d'étayer les décisions par des études préalables. Politique financière, organisation du travail, études de marché, planification, autant de programmes qui nécessitent un choix lié à l'avenir et dont l'importance relative varie avec les secteurs d'activité.

Ainsi, certaines industries n'entraînent que peu d'investissements, alors que les machines constituent pour d'autres de lourdes immobilisations dont la rentabilité ne peut être envisagée à la légère devant le risque de compromettre la marche de l'entreprise.

C'est parmi ces dernières que se situent les sociétés de production et de distribution d'énergie électrique comme l'Électricité de France. Les capitaux qu'elles investissent annuellement atteignent facilement la moitié de leur chiffre d'affaires, tandis que cette proportion tombe souvent dans d'autres branches

industrielles à 5 ou 10 %. Pour donner une idée des ressources nécessaires à l'équipement des centrales et des réseaux électriques, il suffit de citer les chiffres du 2e Plan de Modernisation et d'Équipement en cours de réalisation en France : plus de 700 milliards auront été consacrés à couvrir le développement de l'électricité au cours de quatre années.

Il y aurait un gaspillage coupable à détourner des capitaux d'autres fins tout aussi utilitaires — la construction d'habitations par exemple — au profit d'un surinvestissement momentanément inutile en moyens de production, et les chiffres ci-dessus dénotent l'échelle des sommes mises en cause par une décision prise inconsidérément.

Mais à l'inverse, l'énergie électrique est un facteur d'amélioration du niveau de vie et son expansion ne saurait être limitée sans conséquences économiques fâcheuses. Or, techniquement, trois années au moins doivent s'écouler entre le moment où la construction d'une centrale thermique est décidée et celui où elle peut être mise en exploitation. Ce délai est encore plus élevé pour une centrale hydraulique. D'où la nécessité d'avoir prévu à temps un programme d'équipement.

La vocation d'un service public comme l'Électricité de France consiste essentiellement à assurer au pays, au moindre coût, la fourniture de l'énergie qu'il requiert. Ce double impératif exige un choix judicieux des équipements les plus économiquement appropriés, compte tenu d'une certaine probabilité de défaillance assignant un plafond aux suréquipements. Ceci n'est possible qu'après avoir préalablement défini le niveau de la consommation à garantir dans l'avenir, et, par suite de ce qui précède, avec un délai de prévision d'au moins quatre ouq cin années. Après un rapide aperçu des ressources statistiques traduisant l'expérience du passé, la suite de cet exposé analysera quelques méthodes qui peuvent être pratiquées pour apprécier le développement de la demande.

Ce serait toutefois une erreur d'imaginer que dans notre industrie le souci de l'avenir n'est jamais à plus court terme. Il s'impose au contraire dans l'immédiat : la courbe de consommation de chaque journée doit faire l'objet d'une évaluation détaillée la veille afin que les moyens de production nécessaires demeurent adaptés à tout instant sans risque d'insuffisance. Cet autre aspect de la prévision en matière de consommation d'énergie électrique sera seulement mentionné ici : il fait appel à des considérations d'un autre ordre que le précédent.

Enfin, une ligne d'avenir ayant été choisie, il est indispensable d'en suivre au jour le jour le bien-fondé. C'est pourquoi il y a lieu d'interpréter les informations les plus récentes concernant l'évolution de la demande d'énergie électrique. En d'autres termes, il faut suivre la conjoncture afin de se réserver la possibilité d'une correction de tir dans un sens ou dans l'autre. Ce sujet sera abordé dans la dernière partie de cette conférence, dont les différents paragraphes traiteront successivement de la documentation statistique sur la consommation d'énergie électrique, de l'évolution de la consommation d'électricité, des méthodes de prévision de cette consommation utilisées en France, et enfin, de l'appréciation de la conjoncture.

DOCUMENTATION STATISTIQUE

Bien que l'énergie soit une grandeur facilement mesurable, les séries chronologiques en la matière ne remontent guère en France au-delà d'une trentaine d'années.

En effet, la caractéristique essentielle d'une installation électrique est sa puissance, et, pendant un certain temps, surtout dans les régions hydrauliques, le courant électrique a été fourni d'après des tarifs forfaitaires basés sur le nombre de lampes ou la puissance des moteurs installés chez les abonnés.

Dans le même esprit, les premières statistiques établies par le Ministère des Travaux Publics étaient de simples relevés numériques de la puissance des centrales électriques.

Cependant, le comptage de l'énergie fournie s'étant généralisé progressivement, au lendemain de la première guerre mondiale, le Service Central des Forces Hydrauliques et des Distributions d'Énergie Électrique du Ministère des Travaux Publics se préoccupa d'établir une statistique systématique et régulière de la production et de la distribution de l'énergie électrique.

La première statistique publiée en 1926 par ce service donnait la liste des centrales électriques avec leur puissance au 1er janvier 1925, ainsi que les quantités d'énergie produites et distribuées au cours de l'année 1923. Par la suite, ces derniers chiffres furent connus chaque année.

Le document procurant pour la première fois des renseignements à l'échelle du mois est né en 1930 de l'initiative du Syndicat des Producteurs et Distributeurs d'Énergie Électrique. Il rassemblait les chiffres des soixante-huit sociétés les plus importantes et couvrait environ 95 % de l'énergie distribuée et 70 % de la production recensée par la statistique du Ministère, centrales minières et sidérurgiques comprises.

Pour améliorer ces statistiques fragmentaires et en tirer des éléments susceptibles d'être utiles à l'exploitation, le syndicat précité et la Chambre Syndicale des Forces Hydrauliques créèrent, fin 1937, un Bureau de Coordination des Transports Interrégionaux d'Énergie, qui, à la dernière guerre, devint le Service des Statistiques du Comité d'Organisation de l'Énergie Électrique.

Les statistiques antérieures à la guerre ne comprenaient pas les usines des établissements industriels non reliés aux réseaux de distribution. Il fut décidé en 1945 que désormais toutes les centrales, sans exception, seraient prises en compte.

En 1946 intervint la nationalisation de l'industrie de l'énergie électrique, qui, en plaçant dans les mêmes mains la majeure partie des moyens de production et des réseaux de distribution, facilita grandement le rassemblement des données, et depuis lors, l'outillage statistique n'a cessé de croître en s'améliorant. Quantité de renseignements de toute nature intéressant l'exploitation sont actuellement disponibles à l'échelle de l'année, du mois, de la semaine, de la journée, de l'heure même, et s'il reste toujours des lacunes de documentation chiffrée en dépit des efforts réalisés, cela provient, soit d'une insuffisance en moyens de comptage, soit de besoins nouveaux, soit de l'ampleur des dépouillements nécessaires, que la mécanisation finira par rendre possibles.

Dès les premiers jours de chaque année la Division Statistiques du Service des Mouvements d'Énergie de l'Électricité de France édite maintenant un premier livret provisoire contenant l'essentiel des caractéristiques de production et de consommation relatives à l'année écoulée, bientôt suivi, à quelques mois, de la brochure définitive, plus complète. Des statistiques intéressant la distribution sont publiées d'autre part.

De son côté, le Ministère — devenu celui de l'Industrie et du Commerce — n'a cessé de perfectionner ses statistiques, en les étendant en particulier aux auto-producteurs à partir de 1947. Bien que paraissant avec un certain retard inhérent à son mode d'élaboration très divisé régionalement, la brochure correspondante apporte un complément utile aux documents précédents. Elle a un objet plus administratif, mais elle permet notamment d'intéressantes analyses départementales par catégories de consommateurs.

Pour mémoire, puisqu'il s'agit ici surtout de statistiques de consommation, il convient de citer un second fascicule, à parution bisannuelle, dans lequel la Direction de l'Électricité énumère les caractéristiques des centrales hydrauliques et thermiques en service et celles des aménagements prévus. Cette gamme de renseignements est d'ailleurs tenue régulièrement à jour à l'intérieur de l'Électricité de France.

Regroupant les informations fournies par un certain nombre de pays, l'Union Internationale des Producteurs et Distributeurs d'Énergie Électrique établit depuis 1929 des statistiques détaillées sur la production, la consommation et les échanges d'énergie. Elle publie chaque trimestre une revue intitulée « l'Économie Électrique », où sont tenus à jour des graphiques annuels et mensuels traduisant l'évolution des quantités d'énergie consommées dans divers pays et leur tendance (1).

Enfin, plusieurs organismes, comme l'O. N. U., l'O. E. C. E. et la Conférence Mondiale de l'Énergie, diffusent des chiffres caractéristiques ou des indices concernant l'énergie électrique dans des volumes de statistiques générales.

La diversité des documents est donc grande, mais, en ce domaine comme en beaucoup d'autres, la période de mise au point est encore trop proche. Certaines séries assez longues ont été plus ou moins reconstituées dans les premières années et leur technique s'est perfectionnée au cours du temps pour serrer toujours de plus près la réalité, au détriment de leur homogénéité. Ceci limite malheureusement le recul dans le passé dont il peut être tiré parti.

ÉVOLUTION DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Malgré le constant développement des besoins totaux d'énergie dans le monde, les nombreuses études faites à ce propos montrent que, grâce aux progrès réalisés dans l'affectation à chaque usage de la forme d'énergie la plus avantageuse et à l'amélioration continue du rendement des appareils d'utilisation, l'énergie globale brute consommée ne fait que croître très lentement.

Mais concurremment, les différentes sources d'énergie primaire (charbon, pétrole, gaz naturel, énergie hydraulique) accusent des taux de développement

(1) Calculée comme il sera dit plus loin.

propres à chacune d'elles, tant par suite des substitutions d'une forme à l'autre que du fait des nouvelles applications spécifiques.

Ainsi, la fig. 1, qui représente l'évolution de la consommation annuelle d'énergie électrique dans différents pays, dénote une tendance marquée au doublement en dix ans. Les courbes sont tracées en coordonnées semi-logarithmiques, et les droites expriment la pente qu'elles auraient si elles suivaient exactement la cadence d'un doublement décennal. Il est remarquable que cette

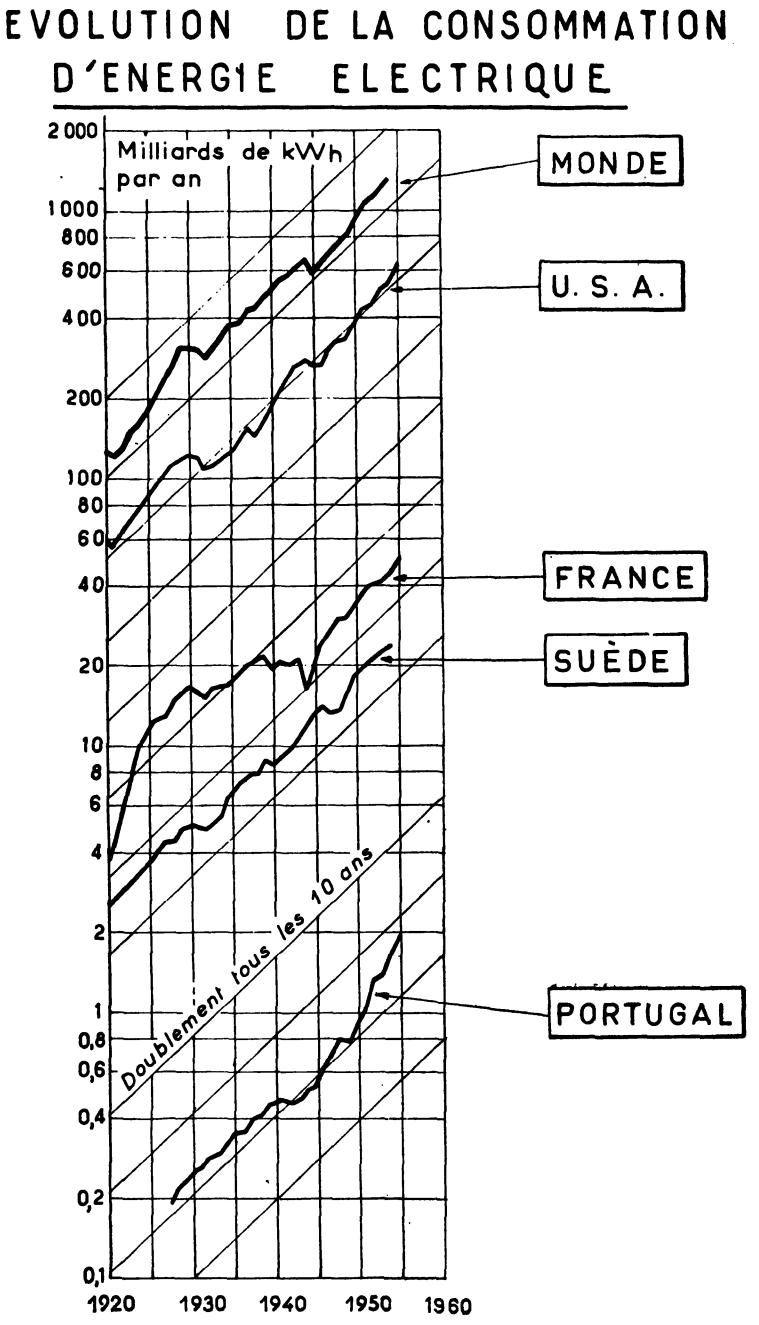

Fig. 1.

loi, bien qu'approximative, reste acceptable quel que soit le degré d'industrialisation ou l'importance géographique de chaque pays. Notamment, aucune trace de saturation ne transparaît jusqu'ici nulle part. La tendance générale est assez forte pour n'être altérée que par des guerres ou de grandes crises comme celle de 1930 aux États-Unis. Elle se reconstitue d'ailleurs ensuite : plusieurs thèses s'opposent au sujet de savoir si un phénomène de rattrapage joue systématiquement ou si la pente seule est retrouvée, le niveau de la consommation restant plus bas que si aucun accident n'était intervenu.

En France (fig. 2), trois cadences se dégagent assez nettement : d'abord une période de très rapide croissance, jusqu'à l'année 1925 environ, la consomma-

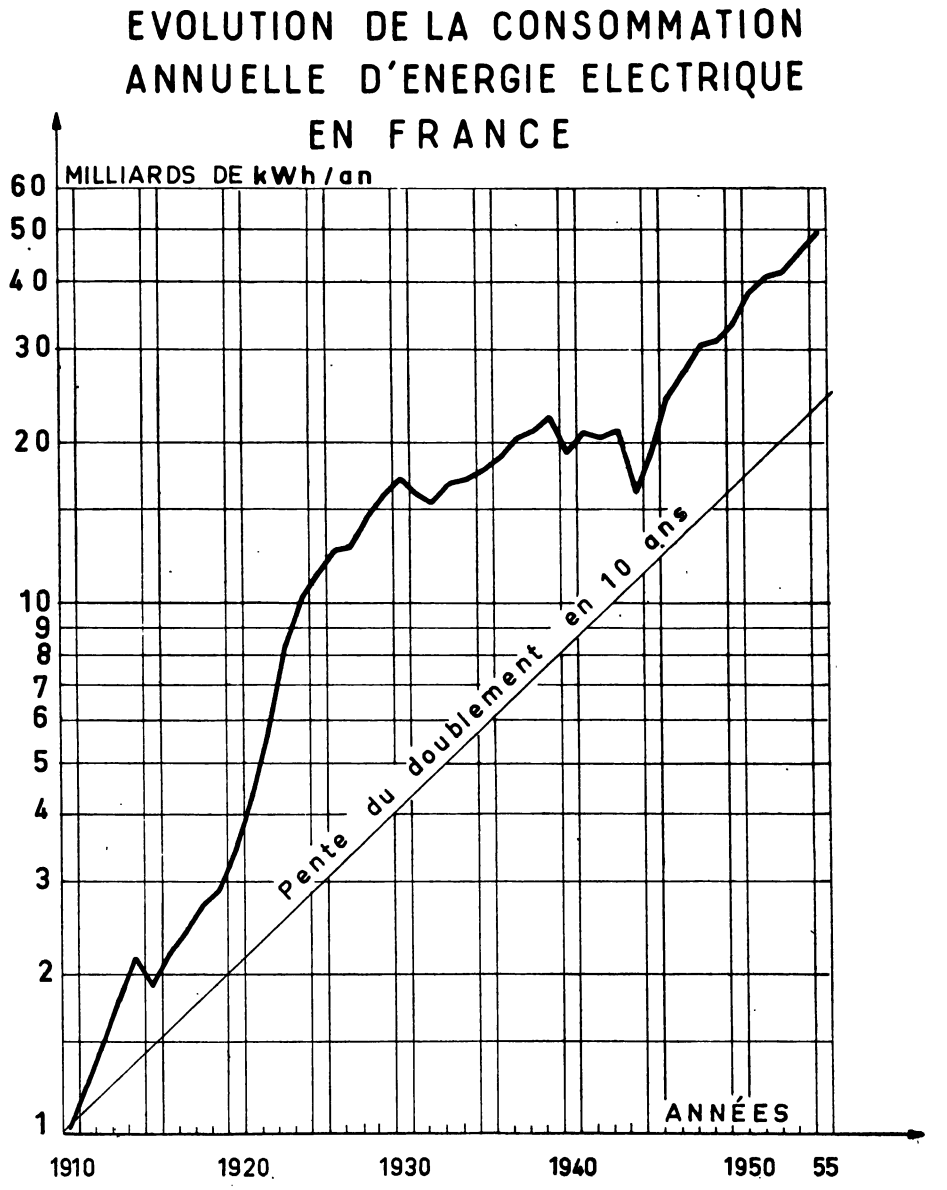

Fig. 2

tion doublant en moyenne à peu près toutes les cinq années, puis une stagnation relative due à la crise et à la dernière guerre, et enfin une nette reprise d'après guerre dépassant le taux d'accroissement annuel de 7,18 % correspondant au doublement en dix ans. Pour les raisons auxquelles il a été fait allusion au chapitre précédent, il est généralement admis que les chiffres antérieurs à

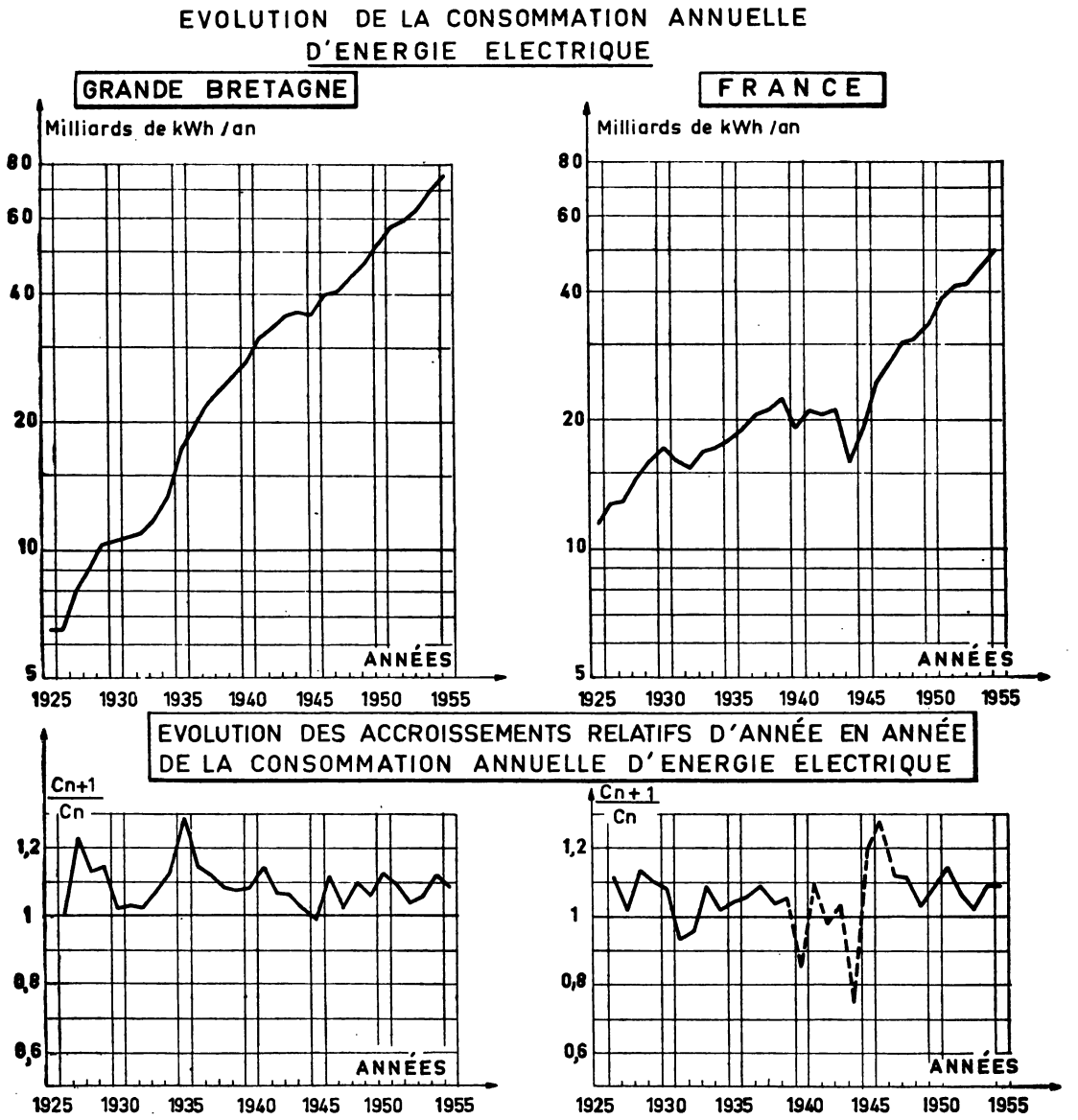

Fig. 3

1925 ne doivent être considérés qu'avec réserve. En faisant donc abstraction de la première période, l'allure générale de l'évolution de l'électricité en France marque un développement un peu plus lent que celui du doublement décennal mais ce rythme est dépassé depuis 1944.

Au cours de l'année 1955, il a été consommé près de 50 TWh (1) en France.

(1) 1 TWh = 1 Térawattheure = 1 milliard de kilowattheures.

En 1965, c'est un équipement permettant de faire face à environ 100 TWh qui sera nécessaire, et il faudrait satisfaire 200 TWh en 1975 dans l'hypothèse où la consommation doublerait tous les dix ans. Ceci met en évidence, d'une part les problèmes de financement qui vont se poser à notre pays et, compte tenu de l'épuisement des sites hydrauliques aménageables et de nos ressources limitées en combustibles fossiles, l'intérêt de prévoir sans tarder un relais énergétique.

Mais la séduisante simplicité de la loi du doublement en 10 ans ne doit pas laisser penser que le développement de la consommation se fait sans à-coup hormis les causes de gros accidents déjà mentionnées, en dépit d'une apparence parfois très continue. A titre d'exemple, la planche 3 représente les courbes des accroissements relatifs annuels de la consommation d'énergie électrique en Grande-Bretagne et en France comparées à celles de la consommation annuelle : des fluctuations se manifestent même dans les périodes de croissance régulière. En France, pour les années d'après guerre, l'écart des extrêmes atteint plus de 10 %, valeur prohibitive lorsqu'il s'agit d'établir des prévisions sur plusieurs années.

En ce qui concerne le processus de croissance de la consommation, diverses conceptions s'affrontent à nouveau. Certains esprits pensent que l'avenir immédiat est intimement lié au passé récent; selon eux, ce qui va arriver a tout lieu de ressembler étroitement à ce qui vient de se produire. D'autres, au contraire, estiment que le temps agit contre le maintien d'une tendance : les chances de divergence augmenteraient avec la durée d'une période de continuité.

Il semble bien que les deux thèses soient également contredites par une analyse des faits, limitée malheureusement à des périodes trop courtes. En effet, des corrélogrammes, courbes représentant la variation du coefficient de corrélation entre les accroissements annuels relatifs de rangs n et $n + k$ en fonction de k, permettent en réalité de conclure à une quasi-indépendance des variables. Pour les différents pays dont les séries ont été étudiées, le coefficient de corrélation n'atteint pas 0,4 et se situe en moyenne beaucoup plus bas. Pour la France, il est de 0,10 lorsque $k = 1$: c'est dire que la liaison entre l'accroissement de la consommation d'une certaine année et celui de l'année antérieure (ou de la suivante) est très lâche.

Ces corrélogrammes ne démasquent non plus aucune constante de temps de liaison : lorsque k varie de 1 à 8, le coefficient de corrélation entre les accroissements relatifs annuels de rangs n et $n + k$ varie autour de 0 sans qu'une loi puisse être dégagée des renseignements limités actuellement disponibles.

MÉTHODES DE PRÉVISION DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Le mode général de son évolution étant ainsi grossièrement défini dans le passé, comment prévoir la consommation d'énergie électrique future?

L'analyse cartésienne :

La méthode la plus puissante parce qu'elle autorise en même temps à manier finement les développements régionaux, informations précieuses pour l'avenir du transport de l'énergie, ne fait qu'en partie appel aux considérations d'en-

semble précédentes. La consommation est décomposée en ses principaux constituants, et les perspectives de développement des différents secteurs industriels et des diverses catégories de clientèle sont regroupées en fin de calcul. Or, selon la logique, la loi qui caractérise à priori l'évolution de la consommation d'ensemble perd sa généralité pour des échantillons plus homogènes. Pour atteindre la tendance de chaque branche d'activité, des études particulières deviennent donc indispensables. L'expérience montre que, pour divers motifs, les prévisions faites par les consommateurs eux-mêmes sont toujours pessimistes et doivent être interprétées, mais, dans les limites d'un Plan, l'accroissement de consommation d'énergie électrique homogène avec le niveau d'activité prévu peut être apprécié, au moins pour les industries les plus importantes.

La règle du doublement en 10 ans ou toute autre estimation d'ensemble permet d'autre part de déterminer approximativement une zone probable où se situera la consommation globale future. De la différence entre ce total et la demande des secteurs accessibles directement résulte un certain taux de développement des autres termes de la consommation. L'harmonisation de ces divers éléments circonscrit le choix de l'objectif que l'équipement devra garantir à l'avenir. D'ailleurs l'ordre des opérations peut être inversé : il est possible, quoique souvent embarrassant, de conjuguer au futur les consommations de toutes sortes et de s'assurer que l'accroissement du total obtenu est dans le domaine probable.

C'est ainsi qu'a procédé en 1946 le Commissariat Général au 1er Plan (Plan Monnet) afin de définir les objectifs de consommation annuelle jusqu'en 1951. Pour les secteurs industriels, des enquêtes ont été menées auprès des gros consommateurs et des Ministères qui s'étaient déjà préoccupés d'établir une synthèse, les prévisions étant faites en considérant l'évolution probable de la technique dans chaque domaine. En ce qui concerne les autres fournitures, l'avenir a été estimé en fonction de leur changement au cours des années passées, des extensions possibles de certaines applications, notamment dans les zones rurales, et de comparaisons — dûment corrigées — avec les données d'autres pays.

Moyennant les réajustements effectués par le Commissariat au Plan, la consommation visée en 1951 était de 39,5 TWh. La réalisation a été de 38,3 TWh mais elle a atteint 40,7 TWh dès l'année suivante.

L'expérience de la croissance de la consommation globale.

La tendance au doublement tous les dix ans qui se dégage de l'évolution passée de la consommation globale d'énergie électrique ne peut être considérée que comme un moyen d'ébauche pour l'avenir. Cependant, il est possible d'analyser plus finement les informations disponibles et d'en tirer des éléments d'évaluation intéressants.

Rien de la manière dont s'est jusqu'ici développée la consommation ne paraît trahir une hétérogénéité dans sa croissance en France et à l'étranger. Cette remarque autorise donc à priori à raisonner sur l'ensemble des séries statistiques existantes, ce qui est de nature à accroître la validité d'informations qui seraient établies seulement sur la trentaine de chiffres français de consommation

annuelle. Il devient dès lors admissible d'attacher une probabilité aux objectifs futurs.

Un premier essai a été tenté dans ce sens sur l'impulsion de M. Ailleret au moment de l'élaboration du projet de 2e Plan de Modernisation et d'Équipement, à partir des statistiques de consommation annuelle publiées par l'Union Internationale des Producteurs et Distributeurs d'Énergie Électrique.

C'est un procédé graphique dit « en queue de cheval », comme l'explique

CONSTRUCTION DE LA QUEUE DE CHEVAL

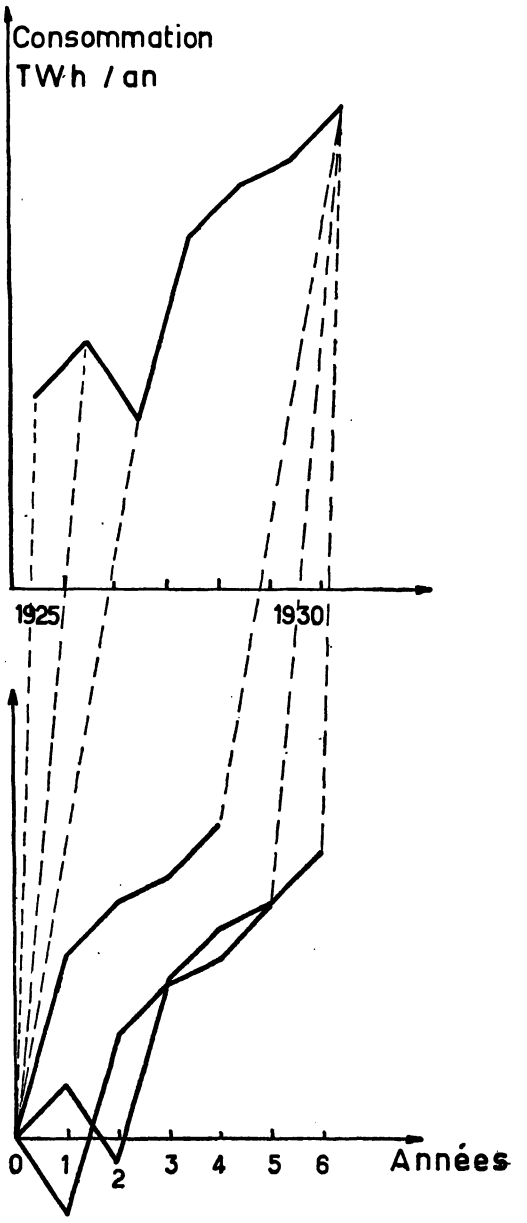

Fig. 4.

son allure générale, qui est établi très simplement : les courbes de la consommation annuelle de chaque pays sont superposées successivement — en coordonnées semi-logarithmiques afin de conserver les valeurs relatives — en plaçant à l'origine chacun de leurs points annuels. Autrement dit, une courbe dont le premier point connu est celui de l'année 1925 est d'abord reproduite intégralement en plaçant ce premier point à l'origine, puis une seconde fois en mettant à l'origine le point de 1926, et ainsi de suite (fig. 4). C'est en mélangeant de la sorte les courbes des différents pays jusqu'à l'année 1954, à l'exclusion des années de guerre, qu'a été obtenu le faisceau du graphique 5, gradué en valeurs relatives de consommation et en intervalles annuels, sans dates de références.

A partir de cette « queue de cheval » — ou du mécanisme qu'elle implique — il est aisé de tracer la courbe médiane, qui, pour chaque abscisse annuelle partage en deux groupes égaux les points du graphique, et celles des quartiles supérieur et inférieur, respectivement dépassés 25 et 75 fois sur 100. D'où le petit diagramme de la fig. 6, où ces trois courbes sont tracées pour l'ensemble des pays retenus, pour les pays européens seulement et pour les États-Unis et le Canada. La divergence très faible qui se dessine entre les trois versions semble vérifier l'homogénéité statistique des séries et traduit en tous cas le caractère universel du mode de développement de l'électricité.

Pour connaître, n années à l'avance, le niveau de consommation ayant l'une des trois probabilités d'être dépassé, il suffit de lire sur ce graphique le facteur correspondant à appliquer à la consommation à l'origine, au moment de la prévision.

Mais cette dernière figure démasque déjà l'infirmité du procédé : la médiane, qu'il était permis de prévoir coïncidant à peu près avec la pente du doublement en dix ans, s'en écarte très nettement dès la cinquième année, et, surtout, l'espace interquartile ne croît pas avec le temps, ce qui reflète cette proposition évidemment inacceptable : la marge d'incertitude n'augmente pas avec l'éloignement dans le temps de l'objectif prévu. Cela tient à des vices de construction qui ne sont apparus que progressivement et qu'il serait d'ailleurs possible de corriger en partie puisqu'ils viennent notamment de l'inégale longueur des séries statistiques utilisées.

L'interprétation mathématique de la valeur des informations que procure la « queue de cheval » ainsi que celle du degré de pondération dont elle affecte chacune des années passées ne sont pas commodes. Une expression, simple de préférence, permettant un contrôle et une appréciation complémentaire était donc souhaitable.

S'appuyant sur la remarque faite plus haut à l'égard de l'indépendance des accroissements relatifs $\varsigma_n = \frac{C_{n+1}}{C_n}$ de la consommation annuelle d'énergie électrique, l'idée poursuivie a été de rechercher une formule d'évolution de cette consommation, à partir du passé, en considérant ses accroissements comme des variables aléatoires indépendantes suivant une même loi.

Le choix de cette loi s'est imposé d'ailleurs immédiatement : la symétrie du polygone de fréquence (fig. 7) de tous les rapports ς_n des chiffres de consom-

mation annuelle disponibles (1) pour chaque pays figurant dans les statistiques établies par l'UNIPEDE conduit à adopter la loi de probabilité normale.

La moyenne m et l'écart-type σ des variables ρ_n étant calculés sur les loga-

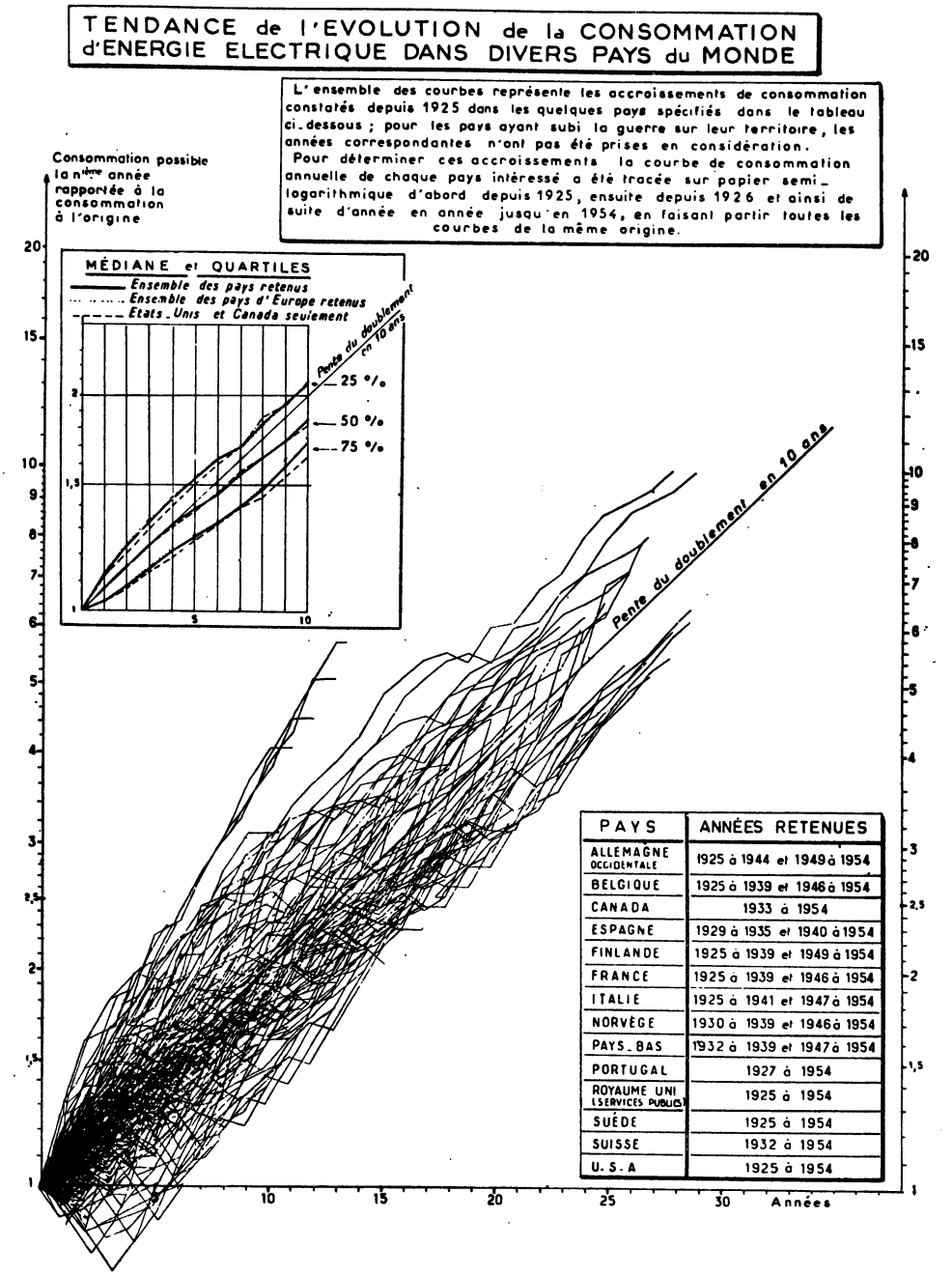

Fig. 5 et 6.

rithmes de celles-ci pour la commodité de la formule cherchée, le schéma conforme aux hypothèses retenues est classique : il consiste à supposer la disper

(1) Années de guerre exclues.

sion proportionnelle à la racine carrée du nombre d'années, assimilable ici à un nombre d'épreuves.

L'évolution de la valeur médiane de la consommation annuelle d'énergie électrique étant écrite sous la forme

$$\overline{C} = C_o\, e^{mt}$$

où t représente le rang des différentes années par rapport à celle de référence, de consommation C_o, ses quartiles sont donc définis par

$$\overline{\overline{C}} = C_o\, e^{mt \pm 0{,}67\, \sigma\sqrt{t}}$$

POLYGONE DE FRÉQUENCE DES ACCROISSEMENTS RELATIFS D'ANNÉE EN ANNÉE DE LA CONSOMMATION ANNUELLE DE TOUS LES PAYS DE LA STATISTIQUE UNIPEDE

(Période 1925 - 1954 années de guerre exclues)

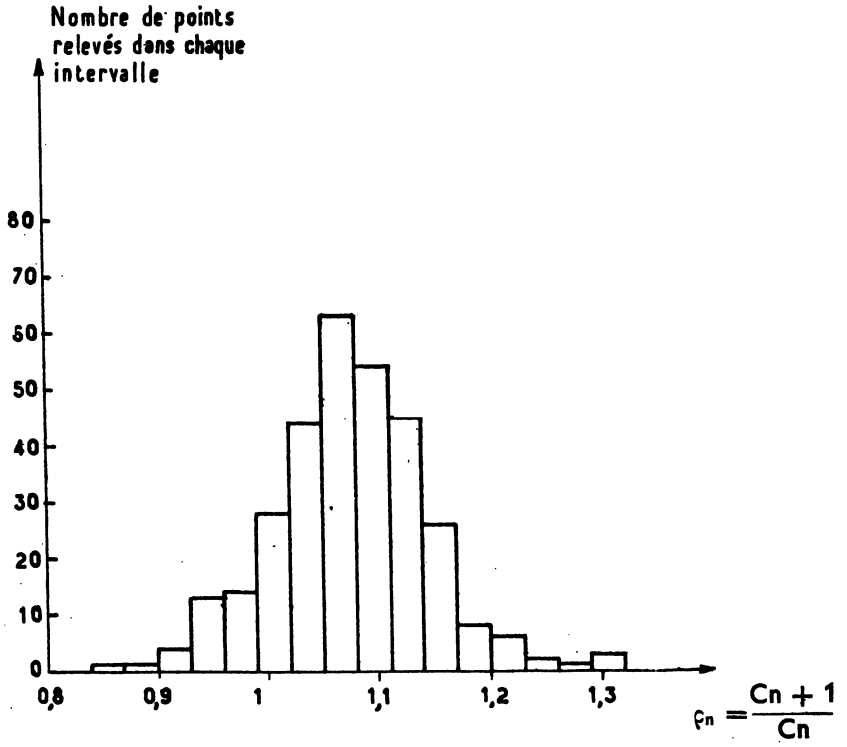

Fig. 7.

soit, numériquement, en exprimant toujours t en années :

$$\overline{C} = C_o\, e^{7\,t.10^{-2}} \qquad \text{et} \qquad \overline{\overline{C}} = C_o\, e^{(7\,t \pm 4{,}3\,\sqrt{t})10^{-2}}$$

La pente du doublement en 10 ans qui correspond à un taux moyen d'accroissement annuel de 7,18 pour cent est ainsi retrouvée.

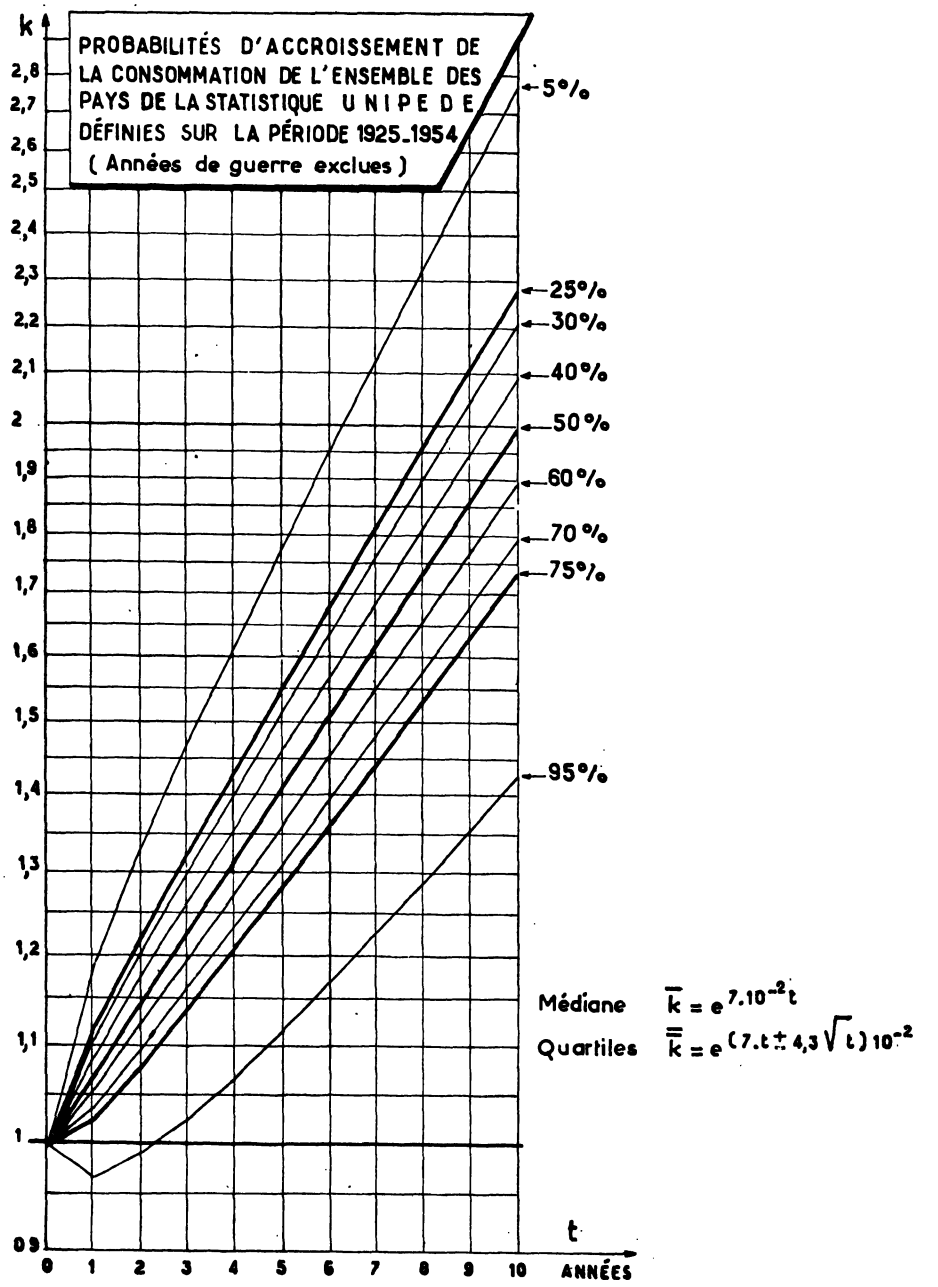

Fig. 8.

Ces fonctions sont reproduites graphiquement sur la figure 8, accompagnées de quelques courbes de probabilités différentes supposant toujours une distribution normale des écarts.

Le diagramme suivant permet de préciser certaines imperfections de la « queue de cheval ». En effet, superposées jusqu'à l'année de rang 4 les médianes des deux méthodes s'écartent progressivement ensuite (fig. 9). Il en va de même des quartiles, moins nettement toutefois pour le quartile inférieur. Les prévi-

MÉDIANE ET QUARTILES DE L'ÉVOLUTION DE LA CONSOMMATION DANS DIVERS PAYS DU MONDE

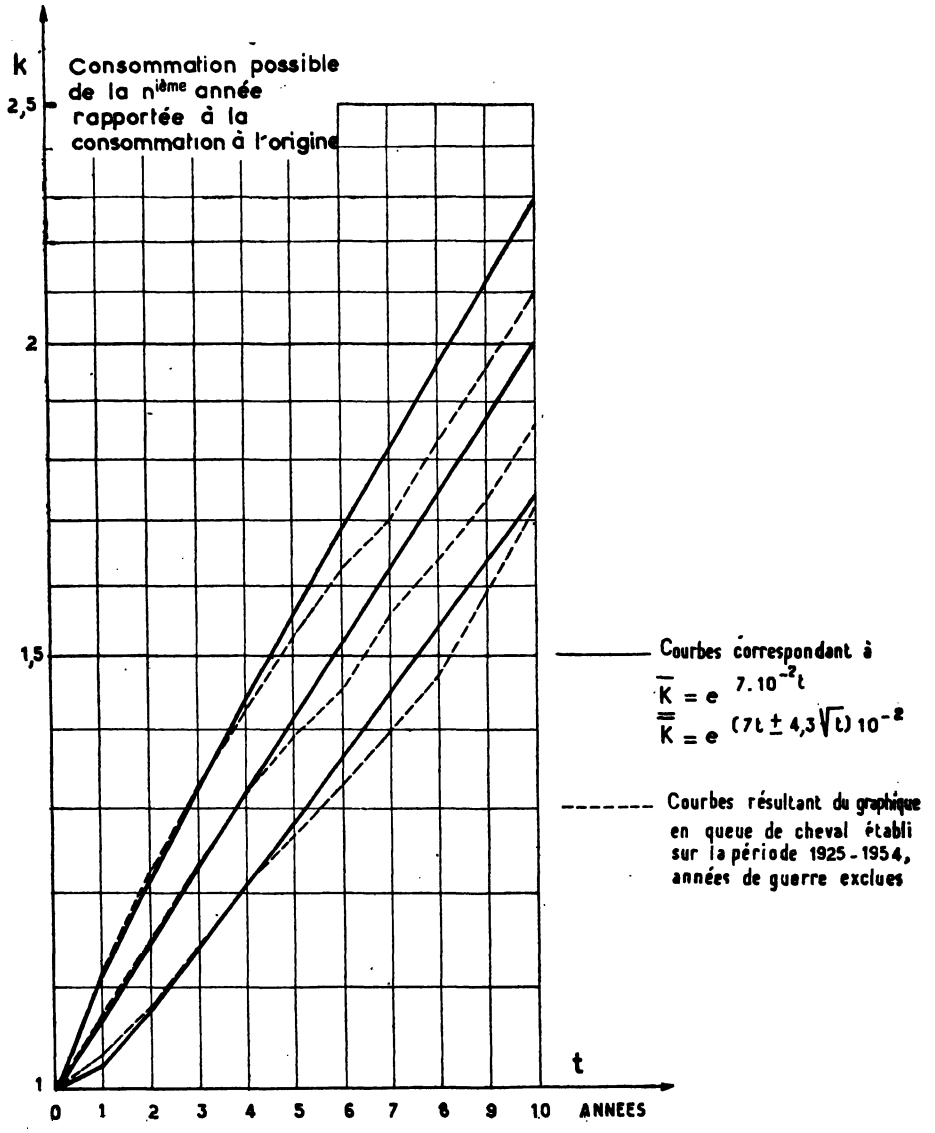

Fig. 9.

sions à partir de la « queue de cheval » sont systématiquement sous-estimées après la quatrième année par rapport à celles découlant des formules précédentes.

Deux explications à ces divergences ont été mises en évidence.

En premier lieu l'inégalité des séries statistiques des différents pays : elles ne débutent pas toutes la même année, et, au surplus, la coupure des années de guerre oblige, dans la construction de la « queue de cheval », à en traiter certaines comme deux séries distinctes. Il en résulte que quelques pays ne figurent jamais parmi les derniers points de ce graphique : les Pays-Bas, la Finlande et la Norvège. L'incidence de cette lacune est parfaitement visible en superposant à la médiane de la formule proposée, à partir de la cinquième année, la moyenne des coefficients moyens d'accroissement relatif $\frac{C_{n+k}}{C_n}$ calculée d'une part pour tous les pays pris en compte, et d'autre part à l'exclusion des trois pays ci-dessus (fig. 10). La première moyenne s'infléchit préci-

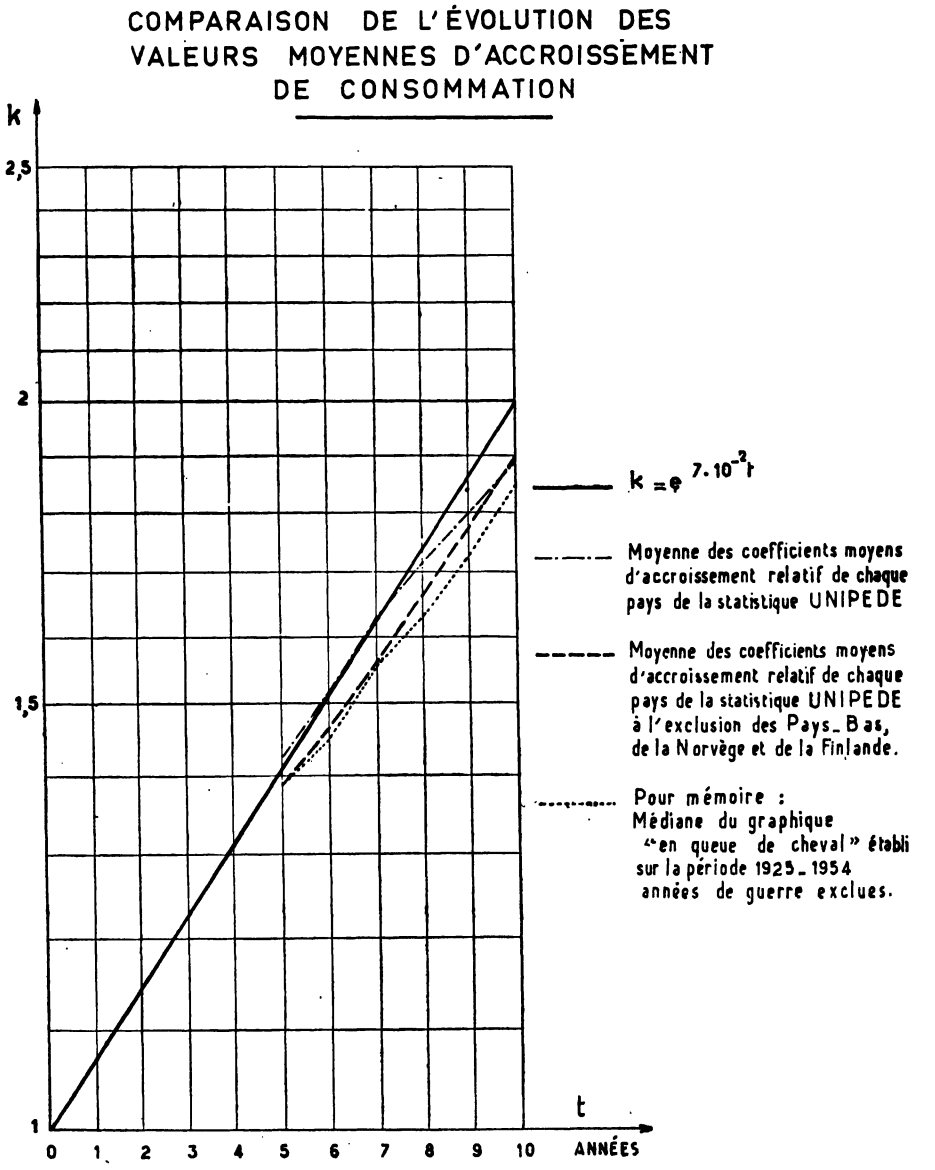

Fig. 10.

sément au rang k correspondant à la longueur des séries les plus courtes, alors qu'auparavant elle coïncide pratiquement avec la médiane calculée par la formule; la seconde moyenne, décalée, conserve à peu près toujours sa pente. Il est donc permis d'admettre qu'en disposant de davantagede points l'évolution de la valeur moyenne des accroissements se poursuivrait sans ralentissement.

Ces conclusions sont confirmées par d'autres calculs, soit à partir des coeffi-

POLYGONES DE FRÉQUENCE DES ACCROISSEMENTS RELATIFS DE LA CONSOMMATION ANNUELLE DE TOUS LES PAYS DE LA STATISTIQUE UNIPEDE

(Période 1925_1954 annees de guerre exclues)

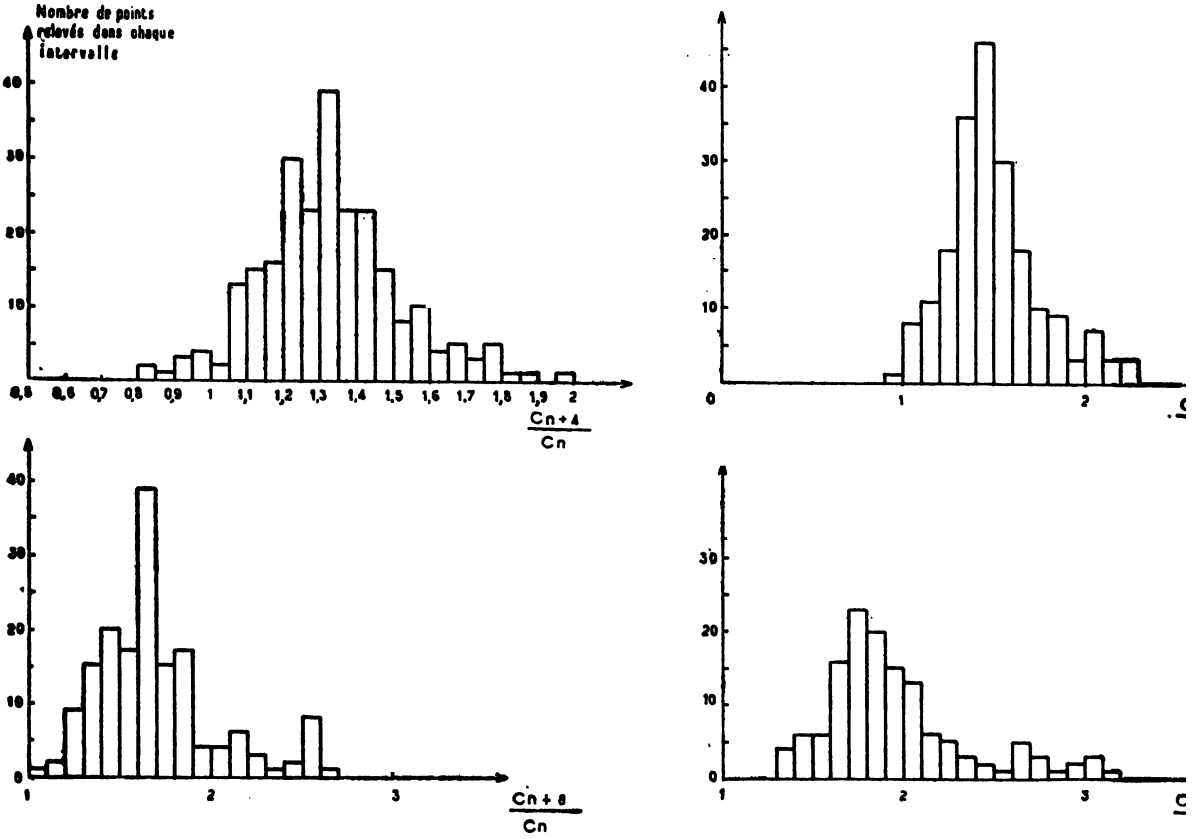

Fig. 11

cients d'accroissement relatif moyens de chaque pays pour une année de rang donné comme ci-dessus, mais en pondérant par la longueur des séries statistiques correspondantes, soit en moyennant purement et simplement tous les coefficients d'accroissement concernant une année de rang déterminé sans distinction du pays qu'ils concernent.

En second lieu, comme la fig. 11 en témoigne, une tendance à l'accentuation d'une dissymétrie de la distribution des variables se manifeste à partir de la sixième année environ. Or, par définition, la formule établie suppose une distribution normale. Il est donc évident que vers la dixième année elle ne peut

conduire aux mêmes conclusions que le graphique en « queue de cheval » dont la médiane s'écarte progressivement de la moyenne.

Les coefficients de développement de la consommation tirés de la formule sont donc certainement significatifs pour des prévisions à terme de l'ordre de 5 ans, et la « queue de cheval » procure alors des valeurs pratiquement identiques. Mais la constatation faite au sujet de la dissymétrie croissante de la distribution des accroissements relatifs tend à prouver qu'à l'encontre de ce qui paraît se dégager d'un examen superficiel, la consommation ne se développe pas de façon tout à fait similaire dans les différents pays et qu'en toute rigueur il ne convient pas de traiter parallèlement toutes les informations disponibles.

Une répartition de celles-ci en deux groupes, à taux de croissance respectivement forts et faibles permet du reste de vérifier que les polygones de fréquence correspondants conservent alors davantage de symétrie.

De tout ceci se dégage une certaine incertitude; est-il finalement plus logique de considérer que le développement de la consommation se fait inéluctablement selon un processus propre à chaque pays ou d'admettre que les disparités constatées, d'ailleurs faibles, ne sont pas significatives et par conséquent de raisonner sur l'énergie électrique considérée dans son ensemble?

Numériquement, les deux attitudes ne conduisent qu'à des différences apparemment insignifiantes, mais sensibles à échéance assez lointaine. Ainsi, les mêmes calculs appliqués aux seuls chiffres de consommation annuelle d'énergie électrique de la France conduisent par rapport aux formules précédentes à des écarts sur la médiane, qui atteignent, par défaut, 5 % pour une prévision faite à 5 ans et 10 % à 10 années d'intervalle.

La corrélation avec l'activité économique.

Une troisième méthode permettant de définir un objectif de consommation future d'énergie électrique a été également développée par Monsieur Ailleret dans le cadre des études de l'UNIPEDE. Elle consiste à exploiter la corrélation entre la demande d'énergie et l'activité économique, caractérisée par son indice de production industrielle.

La croissance de la demande d'énergie électrique peut en effet être considérée comme résultant en premier lieu de la conjoncture économique, qui réagit sur les consommations industrielles et domestiques, et en second lieu de l'extension de l'électrification, même à activité industrielle donnée. Ce dernier facteur de développement influe d'ailleurs partiellement sur les autres formes d'énergie.

L'activité industrielle ne constituant pas le seul moteur de l'évolution de la consommation C, l'indice I qui la caractérise ne saurait lui être comparé tel quel. Diverses études ont donc été menées afin d'établir la loi la plus représentative de la liaison entre C et I. C'est une expression de la forme :

$$C = I^a \times e^{bt} \text{ qui a finalement été retenue.}$$

Les calculs ont d'abord été faits il y a quelques années pour les pays dont les séries C et I étaient les plus fournies, la méthode des moindres carrés appliquée aux valeurs homologues de ces deux séries servant à déterminer l'exposant a qui assurait la meilleure corrélation.

Les valeurs numériques obtenues pour a allaient approximativement de 0,33 pour les États-Unis à 0,50 pour la France, mais les expériences ayant été jugées

EVOLUTION COMPARÉE DE LA CONSOMMATION ANNUELLE D'ENERGIE ELECTRIQUE ET DE L'INDICE DE PRODUCTION INDUSTRIELLE EN FRANCE

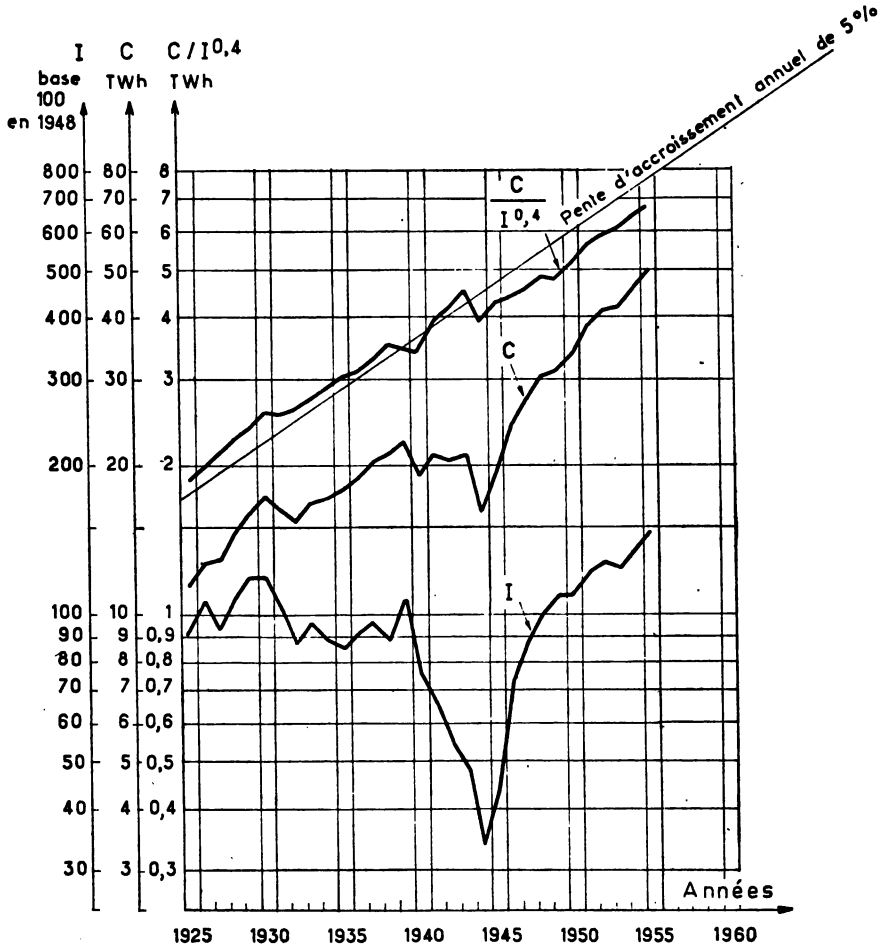

Fig. 12.

trop courtes pour chaque pays séparément, c'est un chiffre moyen de 0,4 qui fut retenu.

Relative au cas français, la figure 12 montre combien les irrégularités de la consommation d'énergie électrique C et de l'indice de production industrielle I sont atténuées sur la courbe représentant l'évolution du rapport $\frac{C}{I^{0,4}}$. La construction de nouvelles « queues de cheval » sur les fonctions $\frac{C}{I^{0,4}}$ avait donc paru tout indiquée à l'époque. La planche 13 dénote à quel point la dispersion est en effet réduite.

Quelques défauts de ce procédé s'étant révélés à la lumière des tentatives de formulation de la consommation en fonction du temps qui viennent d'être exposées ci-dessus, un certain nombre de calculs ont récemment été repris à partir des accroissements annuels relatifs du rapport $\frac{C}{I^{0,4}}$ en vue d'expliciter la loi liant ce rapport au temps.

Ils confirment nettement l'hétérogénéité des informations relatives aux différents pays. En effet, conduite comme pour l'analyse du développement de la consommation, une première série de calculs exécutés en mêlant toutes les

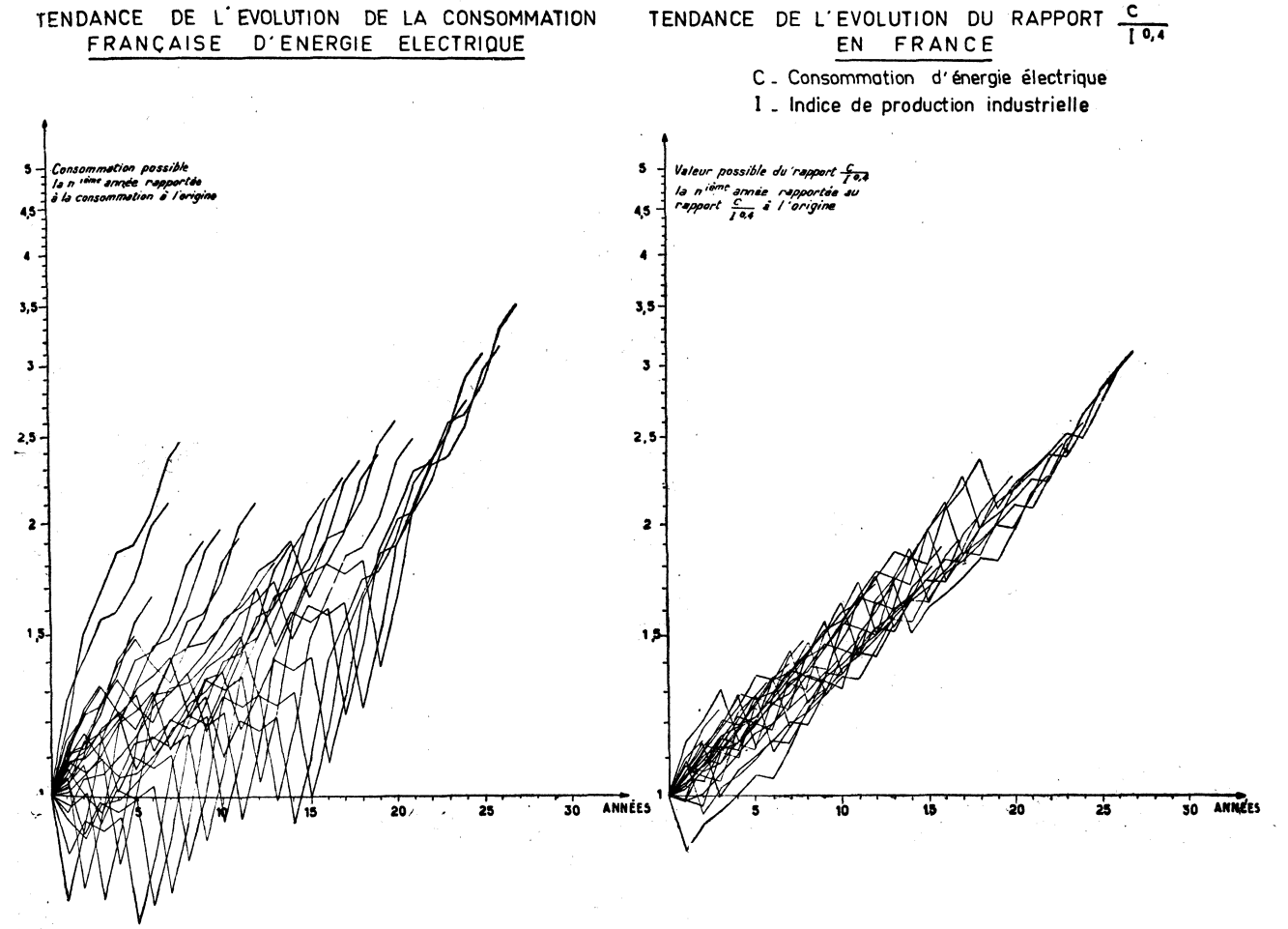

Fig. 13.

informations disponibles sans distinction de leur pays d'appartenance a fait apparaître une dispersion du même ordre que celle de la consommation. L'étude du rapport entre la consommation d'énergie électrique et l'indice d'activité industrielle n'est donc opportune que pour chaque pays individuellement.

Cependant, compte tenu des nouvelles observations relevées depuis l'époque où avait été déterminé l'exposant de I, il était également possible qu'une variation de ce facteur soit à l'origine de la dispersion étonnante obtenue.

La vérification a été faite par une méthode légèrement différente de celle utilisée la première fois, en estimant la droite de régression de la variable $\delta = L\left[\frac{C_{n+1}}{C_n}\right]$ en fonction de $\tau = L\left[\frac{I_{n+1}}{I_n}\right]$ dont les coefficients a et b permettent d'écrire

$$\delta = a\ \tau + b + \gamma$$

γ représente l'aléa résiduel qui affecte l'accroissement de C lorsque I est donné. Ce résidu est assimilable à une variable normale, de moyenne nulle, et de dispersion σ.

En termes concrets, cette expression conduit à écrire l'évolution de la médiane de la consommation sous la forme

$$\overline{C} = C_o \left(\frac{I}{I_o}\right)^a \cdot e^{bt}$$

et ses quartiles :

$$\overline{\overline{C}} = C_o \left(\frac{I}{I_o}\right)^a e^{bt \pm 0,67\,\sigma\sqrt{t}}$$

en admettant comme précédemment que la dispersion croît avec la racine carrée du temps, et ce dernier étant exprimé en années.

Les résultats confirment à peu près les premiers calculs, mais ils ont le mérite de rappeler qu'il ne faut pas surestimer la précision de telles lois. En effet, si pour les États-Unis l'exposant retrouvé reste voisin du précédent (0,37 au lieu de 0,33), il est apparu dans le cas français que le fait de négliger telle ou telle donnée pour des raisons très licites peut faire hésiter entre 0, 4 et 0,5. Considéré isolément, il semble que pour la France l'exposant 0,5 soit meilleur que 0,4, mais, pour l'ensemble des pays, les valeurs inférieures sont plus nombreuses, descendant même au-dessous de 0,3 pour la Grande-Bretagne. Par conséquent, aucun élément nouveau déterminant ne nécessite actuellement de revenir sur les motifs, qui, à l'origine, ont conduit à retenir $a = 0,4$.

A condition de traiter chaque pays séparément, pour la prévision de la consommation future, la méthode consistant à extrapoler le rapport $\frac{C}{I^{0,4}}$ présente l'avantage de réduire les écarts, malgré les incertitudes qui viennent d'être soulignées. Ainsi, dans le cas de la France, la dispersion des accroissements annuels relatifs de la consommation d'une année à l'autre est de l'ordre de 5 %, alors que celle des mêmes accroissements du rapport $\frac{C}{I^{0,4}}$ tombe à presque 2 %.

Mais il est évident que cette méthode n'est applicable que dans la mesure où l'indice de production industrielle est conjecturable. Cette anticipation étant elle-même entachée d'incertitude, la réduction de l'écart-type peut sembler artificielle. Malgré tout, il est ainsi possible d'envisager divers niveaux de consommation future, en fonction de différentes hypothèses concernant l'activité industrielle probable, et, d'autre part, les efforts du Commissariat au Plan doivent tendre à diminuer la dispersion de I dans l'avenir.

Compte tenu des plus récentes informations disponibles, c'est-à-dire de la consommation d'énergie électrique et de l'indice de production industrielle

atteints en France en 1955, les formules proposées pour orienter les décisions du 3e Plan de Modernisation et d'Équipement sont les suivantes :

$$\overline{C} = C_o \left(\frac{I}{I_o}\right)^{0,4} e^{5t\,10^{-2}} \qquad \text{pour la médiane}$$

et

$$\overline{\overline{C}} = C_o \left(\frac{I}{I_o}\right)^{0,4} e^{(5t \pm 1,4\sqrt{t})10^{-2}}$$

pour les quartiles.

Elles expriment que la consommation annuelle d'énergie électrique française varie de 0,4 % seulement 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. Comme l'indice de production industrielle croît de son côté, il en résulte globalement la pente approchée du doublement en 10 ans de la consommation d'énergie électrique généralement constatée.

*
* *

Trois moyens de prévoir un objectif de consommation future à satisfaire viennent d'être examinés. Chacun a ses avantages, ses inconvénients et son domaine d'incertitude, mais il ne semble pas que l'un présente des garanties très supérieures aux autres. Une prévision sérieuse demande en fait un examen critique des conclusions apportées par chacun d'eux, permettant ainsi de contrôler les éléments d'estimation disponibles et de limiter les erreurs de tir en rectifiant éventuellement l'expérience du passé pour tenir compte de tel ou tel facteur nouveau qui n'y est pas inclus.

Il peut être reproché à certains de ces procédés de s'appuyer trop sur l'histoire, sans donner de poids aux modifications de structure qui jouent certainement un rôle dans le développement de la consommation d'énergie électrique. Ce serait une critique définitive si la correction pouvait être faite en parfaite connaissance de cause. Dans la négative, n'y-a-t--til pas une moindre erreur à extrapoler simplement le passé — dont l'expérience est d'ailleurs la résultante de diverses évolutions — quitte, bien entendu, à nuancer les résultats en fonction des perspectives du moment?

APPRÉCIATION DE LA CONJONCTURE

Une hypothèse d'avenir permettant de prévoir en temps voulu les équipements nécessaires étant fixée, il est important de suivre l'évolution de la consommation d'énergie électrique de manière à pouvoir éventuellement apporter des retouches aux décisions prises antérieurement.

L'intérêt de cette information est du reste encore plus grand par suite de sa liaison avec l'économie. En effet, la plupart des critères d'appréciation de cette dernière demandent des enquêtes et des travaux qui entraînent des délais gênants pour agir opportunément. Par contre, l'énergie électrique consommée est maintenant connue au jour le jour avec la précision des compteurs. Elle

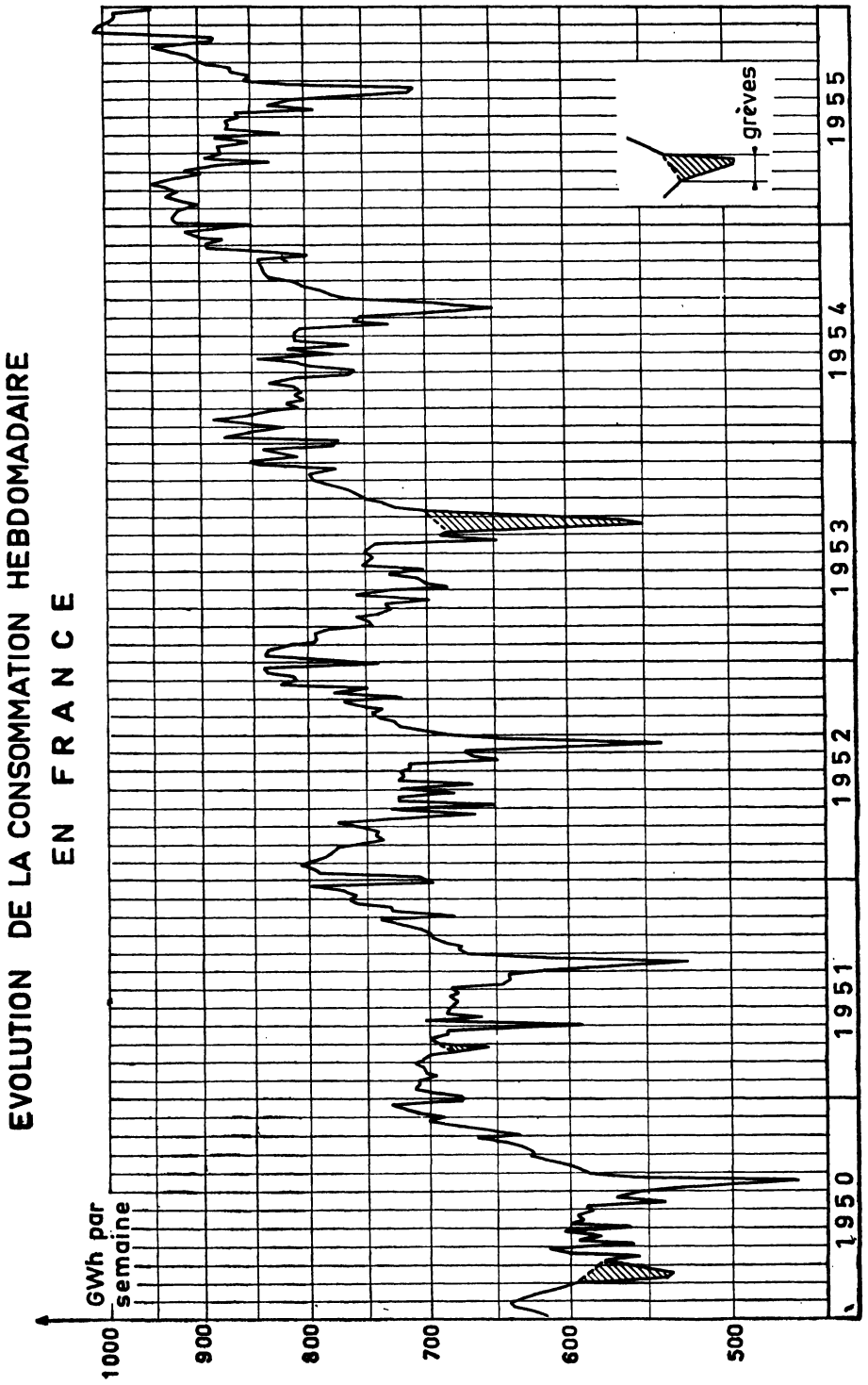
EVOLUTION DE LA CONSOMMATION HEBDOMADAIRE
EN FRANCE
GWh par semaine
1000
900
800
700
600
500
1950
1951
1952
1953
1954
1955
grèves

Fig. 14.

peut donc constituer un précieux baromètre de conjoncture, à condition de l'adapter à cet usage, car des phénomènes divers ne facilitent pas l'interprétation des chiffres bruts.

La consommation d'énergie électrique est soumise non seulement aux variations économiques, mais également au rythme saisonnier et aux rythmes sociaux. La durée du jour, la température, les vacances et les jours fériés, les horaires de travail et les grèves, autant de facteurs qui réagissent sur la demande, et cette liste n'est pas limitative. D'où résulte que la seule constatation d'une évolution n'est pas représentative de la tendance.

Une habitude courante, par exemple, consiste à mesurer le niveau atteint par la consommation en se référant à la période homologue, jour, semaine ou mois, de l'année précédente. Ce procédé filtre déjà un certain nombre d'incidences étrangères à la conjoncture, mais il est bien évident qu'il ne peut fournir que des indications relatives dont la signification est douteuse. Ainsi, la comparaison de l'énergie appelée au cours d'un mois donné avec celle du même mois antérieur peut être faussée par le nombre différent de jours fériés qu'il contient. De même, il est évident qu'aucune information ne saurait être retirée du rapport des fournitures d'énergie électrique au cours de deux périodes semblables affectées différemment par la rigueur de la température.

L'importance des fluctuations est visible sur la figure 14 qui représente l'évolution des consommations hebdomadaires d'énergie électrique en France (1). L'irrégularité de la courbe marque bien le non-sens de la confrontation des valeurs homologues.

Une moyenne mobile ne traduit pas fidèlement les variations de la tendance et entraîne forcément une perte de temps puisque chaque point correspondant à un cycle saisonnier n'est calculable qu'à la fin de la période considérée, c'est-à-dire avec six mois de retard.

Une méthode permettant d'éviter ces écueils a été élaborée. Elle reste d'ailleurs en cours de perfectionnement.

Elle consiste en premier lieu à éliminer l'effet des jours fériés. A cet effet, l'année est divisée en 52 intervalles fixes, pour chacun desquels est calculée la consommation moyenne des jours ouvrables normaux, c'est-à-dire du mardi au vendredi, à l'exclusion du lundi et du samedi ainsi que des jours fériés ou lendemains de jours fériés. Ce filtrage réduit déjà quelque peu les accidents de la courbe précédente (fig. 15).

Ensuite vient l'extraction de la variation saisonnière, faite en rapportant cette consommation à sa moyenne mobile calculée sur l'année encadrant chacun des intervalles considérés. En raison de la croissance exponentielle de la consommation, il serait plus rigoureux d'utiliser une moyenne mobile géométrique, mais l'approximation est très suffisante et le travail matériel substantiellement réduit en calculant une moyenne arithmétique.

La moyenne mobile qui est comparée à la consommation moyenne C_i par jour ouvrable normal d'un intervalle i est donc :

$$m_i = \frac{1}{52}\left[\frac{1}{2}C_{i-26} + C_{i-25} \ldots + C_i \ldots + C_{i+25} + \frac{1}{2}C_{i+26}\right]$$

(1) 1 Gwk = 1 Gigawattheure = 1 million de kilowattheures.

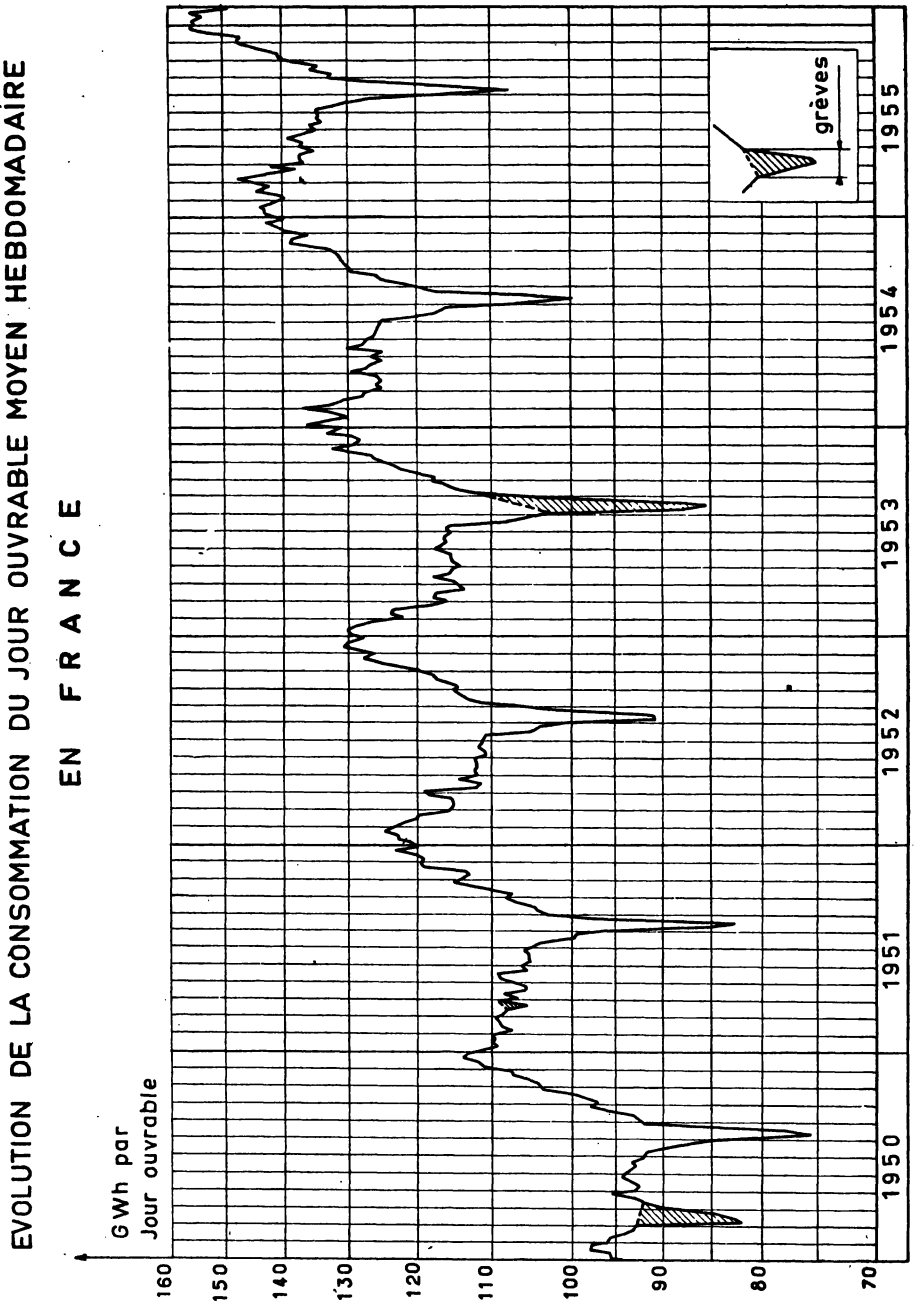
EVOLUTION DE LA CONSOMMATION DU JOUR OUVRABLE MOYEN HEBDOMADAIRE
EN FRANCE
GWh par
Jour ouvrable
160
150
140
130
120
110
100
90
80
70
1950
1951
1952
1953
1954
1955
grèves

Fig. 15.

Considérant en première approximation cette moyenne mobile comme représentant assez bien la tendance, la variation saisonnière est retirée en faisant pour chaque intervalle le quotient

$$k_i = \frac{C_i}{m_i}.$$

Chaque année, 52 coefficients saisonniers sont ainsi déterminés. Sur une période suffisamment longue, une évolution de ces coefficients pourrait être constatée, résultant par exemple du développement d'une application nouvelle ou d'un changement d'habitude des consommateurs. Il n'en est rien en France jusqu'ici, et les coefficients des intervalles de même rang de chaque année peuvent être moyennés, d'où la courbe de variation saisonnière de la consommation. A l'échelle de la semaine, des accidents difficilement explicables affectent cette courbe qui doit être stylisée. La somme des coefficients annuels obtenus doit être égale à 52, et s'il n'en est pas ainsi la correction correspondante est indispensable.

La variation saisonnière stylisée de la consommation d'énergie électrique française a l'allure de la figure 16. Une mise à jour en est faite chaque année. Il convient de remarquer le creux important du mois d'août.

La tendance est enfin calculée en divisant la consommation moyenne du jour ouvrable normal de chaque intervalle par le coefficient correspondant lu sur la courbe de variation saisonnière.

La fig. 17 représente la tendance de la consommation française établie par ce procédé. Les ordonnées portent une échelle graduée en TWh/an, qui répère le niveau auquel la consommation annuelle demeurerait si, brusquement, sa croissance cessait et que seules subsistaient des variations saisonnières et les irrégularités dues aux jours fériés. C'est le nombre moyen de jours ouvrables équivalents annuels trouvé sur les dernières années qui permet le passage des consommations par jour ouvrable normal à celle de l'année. Calculé sur huit années, ce nombre est de 332 jours : en France, la consommation annuelle est égale à 332 fois celle du jour ouvrable normal moyen.

Par rapport au graphique antérieur représentant l'évolution de la consommation hebdomadaire (fig. 14), il est facile de juger l'amélioration apportée par cette méthode pour apprécier la tendance instantanée.

Il convient de préciser ses avantages vis-à-vis d'autres méthodes pratiquées, simplement effleurés précédemment.

Hormis les erreurs d'appréciation qu'elle risque d'entraîner, la simple comparaison des périodes homologues ne permet pas d'appréhender la tendance véritable, mais simplement un point.

La moyenne mobile élimine certaines irrégularités, mais elle ne traduit qu'imparfaitement un changement de tendance, non seulement parce qu'elle ne peut être déterminée qu'avec six mois de retard, mais aussi à cause de la pondération de ses constituants. D'un point au suivant, la liaison est très forte et introduit une temporisation dans l'évolution. Une étude très détaillée de courbes théoriques (1) a montré que la moyenne mobile ne représente correcte-

(1) Tendance de la consommation d'énergie électrique — UNIPEDE — Congrès de Londres, 1955.

ment la tendance que si celle-ci varie très lentement. Par ailleurs, retenir la moyenne mobile de la période annuelle précédente au lieu de celle établie sur l'année encadrante pour tenter d'éliminer le délai des calculs conduit à des

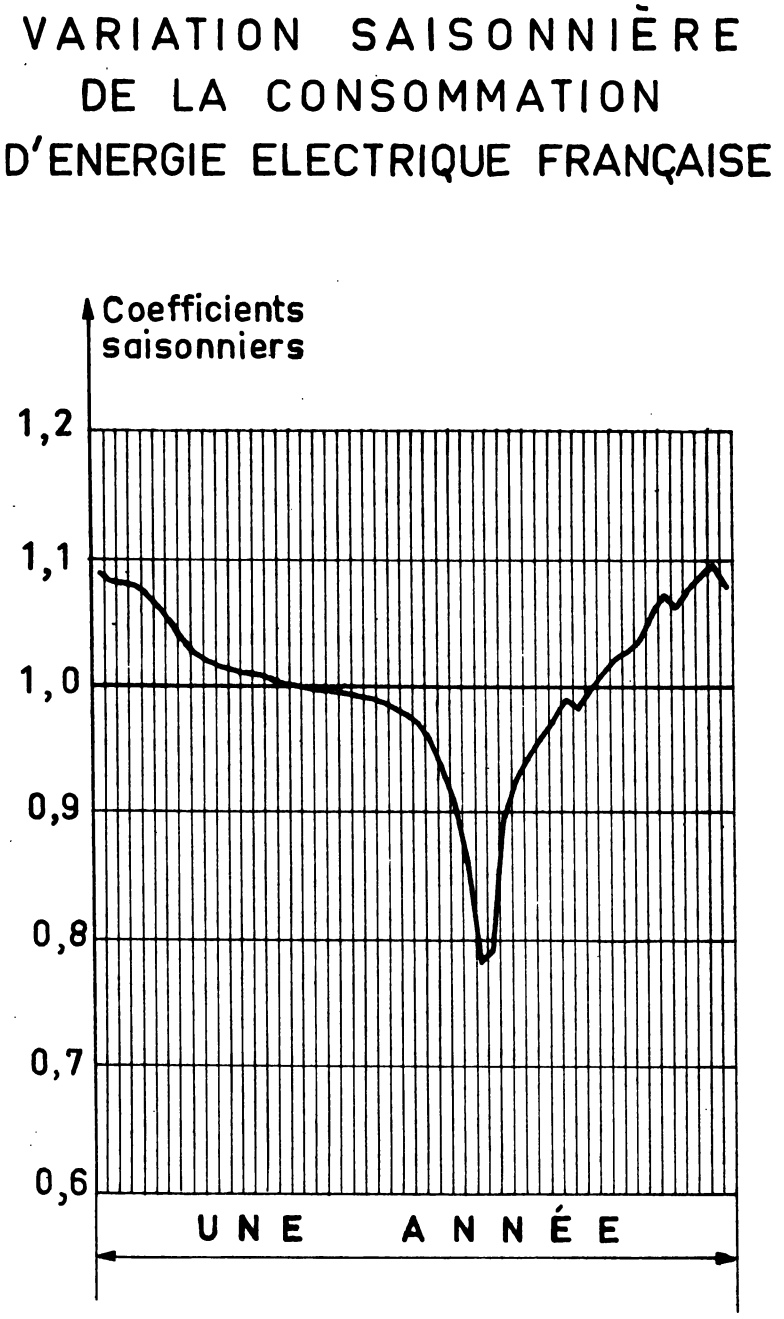

Fig. 16.

écarts encore plus grands. Dans différents cas imaginaires traités, la tendance déterminée comme il vient d'être dit est toujours plus proche que la moyenne mobile de celle introduite dans les calculs, à en juger d'après la somme des carrés

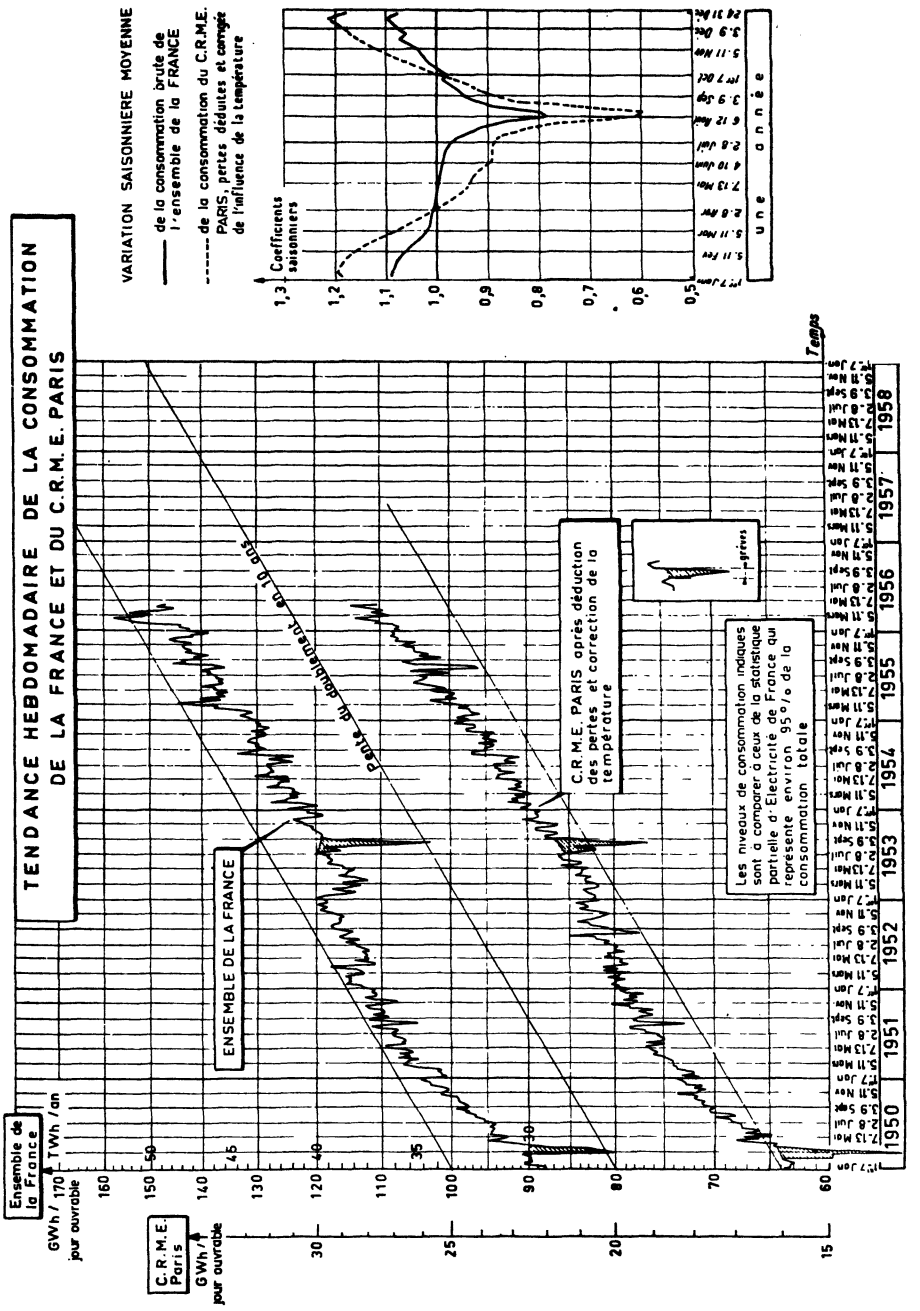
TENDANCE HEBDOMADAIRE DE LA CONSOMMATION
DE LA FRANCE ET DU C.R.M.E. PARIS
VARIATION SAISONNIERE MOYENNE
de la consommation brute de l'ensemble de la FRANCE
de la consommation du C.R.M.E. PARIS, pertes déduites et corrigée de l'influence de la température
Coefficients saisonniers
une année
Ensemble de la France
TWh / an
GWh / 1 jour ouvrable
C.R.M.E. Paris
ENSEMBLE DE LA FRANCE
Pente du doublement en 10 ans
C.R.M.E. PARIS après déduction des pertes et correction de la température
Les niveaux de consommation indiques sont à comparer à ceux de la statistique partielle d'Electricité de France qui représente environ 95 % de la consommation totale
Temps
1950
1951
1952
1953
1954
1955
1956
1957
1958

Fig. 17.

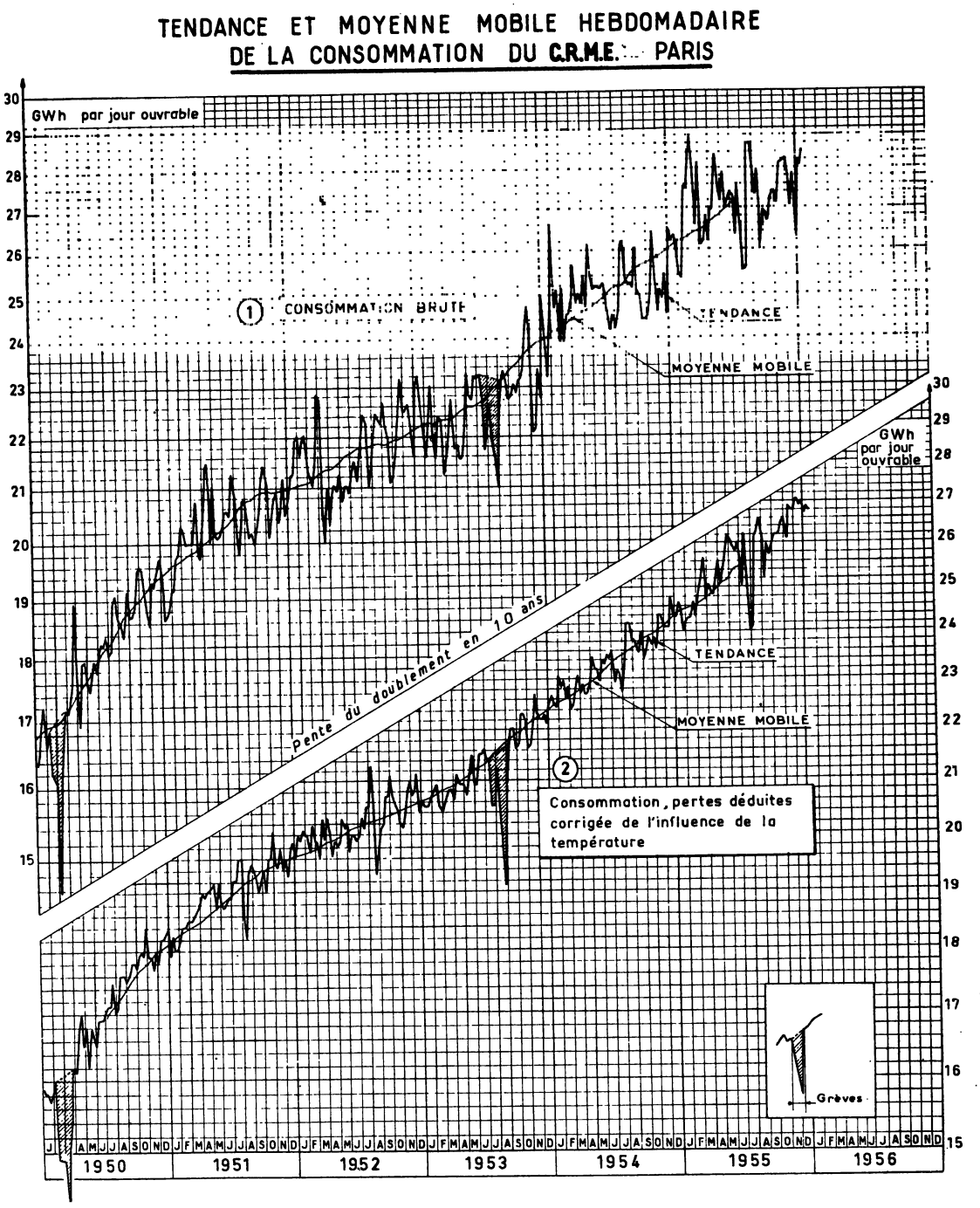
TENDANCE ET MOYENNE MOBILE HEBDOMADAIRE
DE LA CONSOMMATION DU C.R.M.E. PARIS
GWh par jour ouvrable
1 CONSOMMATION BRUTE
TENDANCE
MOYENNE MOBILE
GWh par jour ouvrable
pente du doublement en 10 ans
TENDANCE
MOYENNE MOBILE
2
Consommation, pertes déduites corrigée de l'influence de la température
Grèves
1950
1951
1952
1953
1954
1955
1956

Fig. 18.

des écarts, la différence étant d'autant plus sensible que le cas examiné présente plus d'accidents.

Malgré tout, la tendance ainsi calculée ne reproduit pas exactement la tendance réelle : les coefficients saisonniers déterminés au moyen de la moyenne mobile ne sont pas abolument rigoureux.

La méthode peut du reste être améliorée. Il est certainement possible de réduire les oscillations qui subsistent encore après filtrage de la variation saisonnière. Des études sont actuellement en cours, pour tenter plusieurs corrections supplémentaires : correction des pertes de transport, liées aux conditions d'hydraulicité et qui faussent la consommation apparente (1), correction des conditions de température et correction de nébulosité. Ces calculs sont longs et ne peuvent être faits qu'à l'échelon régional. Les premiers résultats sont cependant encourageants comme en témoigne la figure 18 où ont été tracées pour le Centre Régional de Paris, la courbe de tendance de la consommation brute et celle de la consommation après déduction des pertes de transport et élimination de l'effet de la température.

*
* *

D'autres aspects de l'évolution et de la prévision de la consommation d'énergie électrique pourraient encore être abordés : régionalement, par exemple, ou bien sous l'angle de la puissance à garantir. Les premiers sortiraient du cadre général de cet exposé. Par contre, il peut être jugé surprenant de ne découvrir ici sous le titre « prévision » que le seul aspect énergétique annuel de l'objectif destiné à prévoir les moyens de production nécessaires. Certes, la consommation d'énergie électrique annuelle à desservir ne constitue pas le seul critère auquel doit satisfaire l'équipement, mais l'analyse montre que les valeurs relatives des grandeurs telles que consommation annuelle, répartition de cette consommation dans l'année et puissance maximale appelée restent jusqu'ici stables. Les divers paramètres en cause sont naturellement suivis avec attention.

D'ailleurs cet exposé n'a pas la prétention d'épuiser le sujet. D'autres méthodes verront certainement le jour. D'ores et déjà des recherches ont lieu en vue de prévoir la dimension optimale des équipements destinés à faire face à la consommation à venir en conciliant surinvestissements et défaillances.

Pour terminer, il importe d'insister sur le travail d'équipe que représentent les études qui viennent d'être résumées. M. Ailleret en a le plus souvent été l'instigateur, mais ce panorama repose largement sur les travaux de MM. L. Perrin et G. Morlat, accomplis grâce au concours de Mlle Laporte et Mlle Cabeau, qui ont mené à bien avec le sourire un volume considérable de calculs numériques.

P. Jung.

---

(1) La consommation apparente est égale au total de la consommation réelle et des pertes. C'est bien elle qui détermine la taille des équipements nécessaires.