

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 46 (1955)
Heft: 13

Rubrik: Production et distribution d'énergie : les pages de l'UCS

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 20.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Production et distribution d'énergie

Les pages de l'UCS

Prévisions d'avenir

par P. Ailleret, Paris

621.311.003

Les considérations qui suivent sont d'une valeur si générale et ont une telle portée qu'il nous a semblé nécessaire de les faire connaître à nos lecteurs; elles ont paru dans le Bulletin de l'Union des Exploitations Electriques en Belgique, et leur auteur nous a permis de les reproduire ici.

Partant de l'idée qu'il est nécessaire non seulement de chiffrer l'avenir, mais aussi les aléas de l'avenir, l'auteur examine successivement tous les facteurs qui ont une in-

fluence sur le développement des besoins en énergie électrique. Il constate que la durée pour laquelle l'homme peut formuler des prévisions de quelque valeur diminue de plus en plus, mais que ce phénomène n'a pas de conséquences trop graves pour l'économie électrique, car celle-ci a toujours la possibilité d'adapter la cadence de ses travaux d'aménagements à celle de la croissance des besoins en énergie, quand bien même y aurait-il parfois de petits décalages de temps.

L'idée qu'il faut chiffrer l'avenir est bien entrée dans les esprits depuis que les plans et les programmes se sont multipliés dans tous les domaines, mais l'attention doit maintenant être portée sur la nécessité de chiffrer aussi les *aléas* de l'avenir.

La connaissance de l'incertitude est d'ailleurs le complément indispensable à un plan pour que l'on puisse juger ses limites de validité et que l'on ne méconnaisse pas les besoins de souplesse et d'ajustement dans l'application ultérieure, lorsque le plan viendra en contact avec les faits.

Dans le cas de l'industrie électrique, les prévisions de consommation ont donné lieu à beaucoup d'études, mais il peut cependant être intéressant de reprendre la question *sous l'angle des incertitudes*.

Rappelons tout d'abord le caractère en quelque sorte fatal de la consommation:

L'impératif des besoins de la clientèle est un fait sur lequel l'industrie électrique et les pouvoirs publics n'ont guère d'action.

On objectera que des efforts de *propagande* faits par presque tous les distributeurs d'électricité ne peuvent s'expliquer que si les électriciens croient agir sur le niveau de la consommation. Il est hors de doute en effet qu'une propagande adroite développe certains usages et repousse les frontières des secteurs concurrentiels limitrophes.

Mais, lorsque la propagande a effectivement déclenché un développement important d'une application, ce n'est en général qu'une anticipation sur ce qui se serait produit sans la propagande, et quelques années plus tard les niveaux de développement sont à peu près les mêmes dans une distribution qui a fait le gros effort de propagande et dans la distribution voisine qui n'a fait qu'attendre le développement.

Ce n'est pas du tout sous-estimer un effort de propagande, d'ailleurs toujours limité à un petit nombre d'applications à la fois, que de dire qu'il peut rendre compte d'écarts allant de 10 à 20 % dans la consommation totale d'une région, mais que de tels écarts restent faibles, comparés aux écarts de consommation globale par habitant d'un pays à l'autre, ou au développement de la consommation totale sur un intervalle d'une dizaine d'années.

On dira aussi que la consommation dépend du niveau des *prix* de l'électricité. Inversement, ceux-ci

baissent tout naturellement quand la consommation se développe; il y a là une interréaction qui joue un rôle important dans le développement de la consommation.

Mais l'élasticité de la consommation aux tarifs n'est pas très grande, et des écarts de quelques pourcent dans les prix n'ont qu'un effet négligeable sur les consommateurs domestiques et sur la majorité des industries où l'électricité n'entre que pour un très faible pourcentage dans le prix des objets fabriqués.

Pour développer substantiellement les consommations, il faudrait des réductions de prix dans le rapport de 2 à 1, d'un tout autre ordre de grandeur que les variations des prix de revient et du bénéfice d'une entreprise à l'autre de production thermique. C'est ainsi que l'électrochimie et l'électrometallurgie mettent en jeu de très grosses masses d'énergie, mais seulement dans les endroits où les coûts de production sont localement très bas du fait de situations naturelles très favorables aux aménagements hydroélectriques.

On objectera aussi que la consommation n'a pas un caractère si fatal, puisqu'elle est bien obligée de se *restreindre* quand une défaillance des équipements rend matériellement impossible de fournir la puissance demandée. Mais, précisément, l'expérience de la guerre et des quelques années suivantes a montré qu'une très faible insuffisance des moyens de production par rapport aux besoins de la consommation provoque des troubles très considérables: faute de quelques pourcent dans la puissance nécessaire, il faut des restrictions très difficiles à généraliser, dont l'efficacité est toujours plus faible que prévue, par suite des nombreuses dérogations que l'on ne tarde pas à être obligé d'y apporter. Il faut alors recourir aux coupures, et comme les consommations qui auraient eu lieu aux heures de coupure se reportent pour la plus grande part sur les heures de fourniture, il faut arriver à couper chaque usager pendant un jour sur 4 pour faire au total baisser la consommation de 5 à 10 % seulement.

L'expérience même des restrictions et des coupures a montré que le trouble apporté à l'économie est énorme, même pour une très faible insuffisance de la production.

C'est dire que la consommation est presque incompressible sans conséquences économiques graves.

Le sous-équipement n'est donc pratiquement pas admissible dans un pays dont l'économie est convenablement organisée.

Si le sous-équipement est exclu, le *suréquipement* ne l'est pas. Mais un suréquipement n'agit en rien sur le niveau de consommation. Lorsque les marges de réserve dépassent ce qui est nécessaire pour garantir la consommation, les prix de vente ne peuvent pas être pour cela baissés d'une façon substantielle; le contraire serait même à attendre, puisque le capital à rémunérer est plus élevé. La consommation électrique reste donc inchangée par un suréquipement en centrales. Cela ne veut pas dire que ce suréquipement ne soit pas justifié dans certains cas, en particulier si l'objectif est de réduire la consommation de combustible. En effet, tout rajeunissement du parc de centrales entraîne une économie de calories, et un suréquipement des centrales thermiques peut avoir une justification au moins partielle par le désir de restreindre les consommations de calories.

On peut donc conclure que, en mettant à part le cas de guerre et en excluant la possibilité d'apporter des troubles sérieux à l'économie générale, le développement de la consommation poursuit une marche irrésistible, à laquelle nous ne pouvons pas grand-chose. Faute d'agir sur elle, nous devons donc seulement la prévoir.

On sait que cet accroissement peut se diviser en deux parts:

Une partie est liée à la conjoncture et accompagne les expansions ou les régressions de l'économie générale. La consommation électrique globale d'un pays varie de $1/2\%$ à $1/3\%$ quand les indices d'activité économique générale du pays manifestent une variation de 1% .

Une autre partie est liée, au contraire, au développement propre de l'électricité. Il en résulte, depuis le début du siècle, un accroissement à la cadence d'environ 4 à 5 % par an.

C'est la superposition de ces deux éléments qui a conduit à un développement à une cadence de l'ordre de grandeur du doublement tout les 10 ans.

Les guerres et les grandes crises économiques ont évidemment eu des effets importants sur les consommations électriques et troublé la régularité de leur développement; dans une mesure partielle, mais probablement assez importante, leurs effets se rattrapent avec le temps, et les rapports entre les consommations des pays troublés par une guerre et ceux qui en ont été préservés tendent, après un certain nombre d'années, à revenir à leur valeur antérieure.

Les variations de la conjoncture introduisent perpétuellement des variations dans la courbe du développement de la consommation.

Les pays les plus sensibles à la conjoncture sont ceux dont l'industrie est le plus exposée à la concurrence internationale. Il est certain que toute exportation de produits d'un pays représente une exportation d'énergie dans la mesure où de l'éner-

gie électrique a été intégrée dans la fabrication du produit exporté.

Il existe ainsi un courant invisible d'électricité exportée dont les fluctuations sont relativement importantes en fonction de la conjoncture internationale, et ces fluctuations sont nécessairement subies par les centrales électriques.

Telles sont les observations faites dans le passé sur l'évolution des consommations.

En ce qui concerne l'avenir, la méthode la plus sûre semblerait être de supputer les besoins correspondant à chaque type d'applications de l'électricité d'après les prévisions sur le développement de cette application. Mais l'expérience a démontré surabondamment que ces prévisions analytiques ne sont bonnes qu'à court terme.

Elles sont utiles à chaque exploitation lorsqu'il s'agit de prévoir le développement des réseaux d'après la localisation des besoins prochains. Mais elles se sont toujours révélées décevantes pour des prévisions dépassant deux ou trois ans.

Pour voir plus loin, il faut faire des prévisions *synthétiques* groupant un grand nombre d'usagers différents de l'électricité et escomptant en quelque sorte le relais des applications saturées par des applications nouvelles. L'expérience a justifié cette méthode dans le passé, la justifiera-t-elle dans l'avenir?

Avant d'examiner plus avant cette question, il convient d'abord de préciser l'influence des dimensions de la zone géographique dont on considère la consommation. A l'échelle très petite d'un village ou d'une petite ville par exemple, aucune prévision synthétique n'est possible; l'avenir n'est prévisible que par l'analyse des usagers locaux, et il est, à long terme, plein d'incertitude.

Plus la zone géographique considérée est étendue, plus les compensations entre ses différentes parties permettent une prévision synthétique. On sent qu'il y a une échelle de grandeur qui commande l'incertitude de cette méthode. Cette grandeur est d'ailleurs complexe, et fait intervenir à la fois l'importance de la consommation totale et la dimension géographique, qui est déjà elle-même un facteur de diversité.

En France, par exemple, l'échelle d'un département est un peu faible pour des prévisions synthétiques à long terme; mais il suffit de considérer des régions à l'échelle de la demi-douzaine de départements pour constituer des ensembles à progression plus régulière, bien plus semblables les uns aux autres dans leur évolution et se prêtant mieux à des prévisions synthétiques.

Au-delà de cette échelle, le groupement en régions plus importantes encore devrait amener un gain supplémentaire en régularité, mais, avec la précision des statistiques existantes, ce gain paraît peu significatif. Il semble donc qu'il y ait une échelle de taille et de diversité à partir de laquelle les prévisions synthétiques sont possibles: la Belgique par exemple atteint largement la taille nécessaire, le Luxembourg par contre ne peut vraisemblablement faire que des prévisions synthétiques assez aléatoires du fait de sa moindre taille et de la moindre diversité de ses industries.

Mais ces prévisions synthétiques ne se bornent-elles pas à une simple extrapolation du passé, et n'y a-t-il pas un danger réel à prévoir l'avenir d'une manière aussi simpliste?

D'ailleurs, l'extrapolation peut se faire suivant bien des lois: admettre que la progression exponentielle du passé se poursuivra dans l'avenir n'est que la plus simple des formules d'extrapolation.

Il serait facile d'en bâtir d'autres, mais ferions-nous autre chose que de dissimuler notre ignorance sous un appareil mathématique médiocre en imaginant une loi «logistique», qui coïnciderait pour le passé avec une exponentielle mais s'infléchirait ensuite pour traduire une saturation progressive? Les coefficients de cet infléchissement étant entièrement inconnus, nous n'ajouterions aucune réalité par cette complication de la formule d'extrapolation.

Aucune formule mathématique ne peut nous assister dans nos raisonnements sur la validité de l'extrapolation, et c'est en concevant celle-ci sous la forme la plus simple que nous risquons le moins d'être abusé par les symboles.

Un premier point est de savoir *s'il y a* un début de saturation. Quelques statistiques sommaires ont pu y faire croire: par exemple, les reprises de consommation immédiatement après la guerre, entre 1946 et 1951, se trouvent avoir été en Europe un peu plus fortes dans les pays qui avaient à l'origine de cette période les plus faibles consommations par habitant.

Mais cette impression ne résiste pas à une analyse plus complète. Toutes les études montrent qu'il n'y a pas de corrélation significative entre l'accroissement annuel moyen actuel et la consommation par habitant.

En fait, il n'y a à l'heure actuelle encore aucun indice significatif de saturation, même dans les pays les plus développés au point de vue des usages de l'électricité.

La saturation s'est manifestée dans bien des usages de l'électricité, mais ceux-ci ont alors jusqu'ici toujours été *relayés* par d'autres applications. Or, la consommation électrique se divise en un grand nombre d'usages.

Si une classe d'usages de l'électricité comme la consommation domestique est importante et atteint suivant les pays 10 à 25 % de la consommation totale, elle résulte en fait de l'addition de besoins très différents (lumière, froid, chauffage, télévision, toute petite force motrice, etc...), dont chacun a ses lois de développement propres et ne représente qu'une bien faible part de la consommation totale d'électricité.

Le développement s'est donc fait par un grand nombre de relais d'applications saturées par des applications nouvelles.

Pourquoi ces relais resteraient-ils aussi nombreux dans l'avenir? Mais pourquoi aussi leur cadence se ralentirait-elle?

Qu'il doive y avoir une limite un jour, que l'électricité doive être remplacée par autre chose, que son développement soit arrêté un jour par de nouveaux moyens, tout comme les chemins de fer ont été barrés par la route ou les paquebots par

l'avion, c'est une notion bien naturelle du point de vue philosophique. Mais que ce phénomène doive se produire pendant la période de 5 à 20 ans pour laquelle les électriciens osent faire des prévisions à long terme, rien ne permet actuellement de le prédire.

Un raisonnement déjà ancien est qu'une longue continuation de la croissance actuelle est impensable, parce que l'électricité utilise déjà une main-d'œuvre et des matières en quantité importante et qu'il n'est *pas possible pour l'économie générale* que cette part double encore un grand nombre de fois.

La valeur de ce raisonnement est très diminuée par deux faits importants. D'une part, la distribution de deux fois plus de kWh par habitant, même avec la même technique, est très loin de doubler la main-d'œuvre et les investissements nécessaires. D'autre part, le progrès technique réduit rapidement les combustibles et la main-d'œuvre nécessaires pour produire et distribuer une même quantité d'énergie.

En tenant compte de ces deux faits, le développement exponentiel pourrait continuer fort longtemps avant que l'électricité ne pèse par trop lourd sur les ressources de l'économie, plus longtemps certainement que nous ne cherchons à prédire les niveaux de consommation.

Si la prévision d'avenir est aussi empirique, faut-il seulement conclure qu'un large doute scientifique doit remplacer toute prévision ou sommes-nous tenus au contraire de faire des prévisions, bien entendu sans nous illusionner sur leur valeur?

Autrement dit avons-nous *besoin* de prévoir?

Une première prévision que nous avons coutume de faire, souvent sans en avoir conscience, est que notre industrie restera en *expansion*.

La différence, pour un service public, entre une progression de 1 % et une régression de 1 % par an est beaucoup plus fondamentale que la différence entre une progression de 1 % et une de 8 % par an.

En effet, un plus ou moins grand taux de progression ne fait que changer la cadence à laquelle le développement du réseau devra s'effectuer. Elle ne change pas le fait que les investissements sont fonction des développements de consommation. Les raisonnements marginaux sur l'incidence des développements de consommation donnent donc une base valable à l'évaluation des charges résultant de tel ou tel type de consommation, et par suite à la tarification.

Au contraire, dès que la consommation est en régression, si peu que ce soit, le raisonnement marginal s'effondre; la préoccupation de l'équilibre budgétaire subsiste, mais avec un arbitraire dans la répartition des charges entre les divers usages de l'électricité.

De même, une progression très lente n'empêche pas de renter les centrales nouvelles que l'on construit à faible cadence, mais qui gardent leur utilité. Au contraire, toute prévision de régression ultérieure fait apparaître comme extrêmement onéreux tout développement de puissance installée, appelé à n'être indispensable que pour un petit nombre d'années.

Heureusement, les perspectives de développement de l'électricité sont assez brillantes pour que personne ne mette en doute que cette industrie restera pour longtemps encore en expansion.

On pourrait alors se demander si nous avons besoin d'en savoir beaucoup plus, et si nous ne pouvons pas vivre en équipant les groupes nouveaux et les lignes nouvelles au fur et à mesure des besoins, sans chercher à les prévoir d'avance: nous pouvons faire des programmes non datés, dans la seule perspective qu'il n'y aura pas régression, faire des études et préparer des sites de centrales assez à l'avance mais ne déclencher les travaux proprement dits que sur une prévision de consommation limitée à la stricte durée de ces travaux. Prévoir à 4 ans dans un pays hydraulique, à 2 ans dans un pays thermique ou mixte serait alors suffisant.

Dans cette optique, l'industrie électrique, grâce à la progressivité de son développement et au fait que chaque centrale ou chaque ligne n'est que différentielle par rapport au réseau interconnecté, n'a pas du tout les mêmes besoins de prévoir que les industries qui investissent massivement au lieu d'investir par différentielles. Pour prendre un exemple extrême, on ne pouvait pas engager la construction du canal de Suez sans faire des prévisions d'avenir de trafic au moins sur la durée d'amortissement des emprunts; suivant la valeur de ces prévisions, l'affaire pouvait apparaître rentable ou non.

Au contraire, pour emprunter de l'argent à 30 ans, un réseau électrique a seulement besoin de savoir qu'il n'y aura pas de régression des besoins de puissance pendant 30 ans, mais le taux de progression importe peu.

Une telle position peut se défendre si l'on considère la seule industrie de la production et de la distribution. Mais celle-ci n'est pas seule: elle nécessite — et elle fait vivre — les industries de la construction et de l'entreprise électrique qui la dépassent même en chiffres d'affaires et en main-d'œuvre.

Sans doute, ces industries mettent en jeu des capitaux bien plus réduits par rapport au chiffre d'affaires, et, de ce seul point de vue, auraient un moindre besoin de prévoir l'avenir.

Mais, par contre, leur activité est en grande partie liée aux travaux neufs, donc au développement de la production et de la distribution. Leur activité est en quelque sorte liée à la dérivée par rapport au temps de l'activité de la distribution: un accroissement de consommation régulier de 8 % impliquera presque une activité double, dans la construction électrique, de l'activité qui se manifesterait dans une période où la consommation ne croîtrait que de 4 % par an.

Ainsi, tout équipement d'atelier nouveau de turbines ou de disjoncteurs, par exemple, implique une prévision à long terme de l'avenir de la consommation électrique.

On peut encore noter que, du point de vue financier, les prévisions d'avenir ont toujours un certain aspect *relatif*. Il ne s'agit pas de savoir en absolu avec quelle sécurité les capitaux investis dans l'industrie électrique peuvent être rentés, mais de

savoir s'ils y trouvent plus de sécurité que dans les autres investissements possibles.

A ce point de vue, une réponse positive ressort nettement de ce que l'électricité joue un rôle très important dans le progrès technique, de sorte que les risques de stagnation sont certainement plus faibles dans les industries électriques que dans la très grande majorité des autres industries.

Ainsi, du seul point de vue de l'industrie de la production et de la distribution, les prévisions quantitatives ne sont vraiment nécessaires qu'à l'échelle des délais de construction des centrales. Au-delà, des prévisions assez qualitatives suffisent, l'essentiel étant de pouvoir considérer comme négligeable le risque de régression durable.

Pour traduire ces prévisions, on peut utiliser des nombres, mais en ne leur attribuant qu'un sens *qualitatif*. Les Américains nous ont habitué à cet usage des chiffres, et nous ne sommes plus choqués d'entendre dire que dans l'aptitude à telle fonction le caractère intervient pour 40 % et l'intelligence pour 25 %. Bien que nous ayons affaire à des grands nombres beaucoup mieux définies, les indications sur les prévisions à longue distance n'ont, elles aussi, qu'une valeur assez qualitative d'ordre de grandeur. Aucun calcul analytique ne peut servir à justifier une estimation que la consommation aura triplé ou quadruplé dans 20 ans, et l'emploi d'un appareil mathématique pour des formules d'extrapolation sans base sérieuse ne peut être que trompeur.

De telles estimations appartiennent, par leur nature, au domaine où la science et l'art se rencontrent.

De ce que les méthodes précises sont impuissantes, *il ne résulte pas que l'homme soit impuissant*. Son conscient et son subconscient comportent considérablement plus d'éléments que les machines mathématiques les plus modernes, et sont capables d'utiliser l'accumulation formidable des informations très variées recueillies au cours d'une longue expérience de l'industrie dans laquelle il vit. Les prévisions des hommes ont ainsi une valeur liée à celle de l'homme.

Nous ne sommes pas habitués, dans la plupart des métiers d'ingénieurs (sauf peut-être pour le génie civil), à ce que des chiffres soient mieux justifiés par l'autorité d'un homme que par des calculs numériques, et nous avons souvent tendance à réclamer la justification chiffrée par écrit. Mais, quand un grand chirurgien annonce la nécessité d'une grosse opération, qui oserait lui demander un calcul justificatif mettant en évidence les diverses probabilités en cause?

Il en est, au fond, de même dans la plupart des grandes décisions industrielles. Qui aurait pu par exemple justifier quantitativement l'intérêt militaire des recherches atomiques quand elles ont pris leur place dans l'effort de guerre américain? Et qui peut faire aujourd'hui la balance entre le coût des recherches nucléaires et la valeur actuelle de la différence probable entre les prix de revient des centrales nucléaires et des centrales traditionnelles?

Les routines administratives imposent les calculs justificatifs pour toutes les décisions courantes; nous avons tendance à surestimer le champ où ces calculs gardent un sens.

L'estimation à long terme des tendances de la consommation reste un domaine où l'appréciation n'est pas susceptible de véritables justifications et où il est impossible de préciser les probabilités de chacune des valeurs possibles de la consommation.

Sans doute, l'amélioration des données statistiques tendra à allonger la durée pour laquelle nous pouvons formuler des prévisions de quelque valeur.

Mais, en sens inverse, cette durée tend à être raccourcie par l'accélération des évolutions industrielles, qui suit l'accélération des progrès techniques.

D'une manière générale, les temps de prévision de l'homme se raccourcissent; nous ne pouvons plus nous représenter la vie de nos arrière-petits-enfants aussi clairement que cela était possible aux générations précédentes. Notons, en passant, que cette même évolution technique devrait tendre à raccourcir les durées qui interviennent dans l'actualisation des valeurs lointaines: la période sur laquelle un capital pris à la fin de cette période ne vaut que la moitié de ce qu'il représente au début de cette période tend à se raccourcir avec l'accélération du progrès. Le taux d'intérêt, qui a la dimen-

sion de l'inverse d'un temps, devrait donc manifester une tendance séculaire à s'accroître, si l'effet de cette tendance n'était pas noyée dans les fluctuations des nombreux autres éléments qui interviennent dans le loyer de l'argent.

La prévision de l'avenir est donc de plus en plus délicate et échappe aux justifications simplistes.

Mais il n'en résulte pas de conséquences tellement graves pour l'industrie électrique, celle-ci conservant la possibilité d'adaptation de ses cadences de travaux à la cadence réelle de croissance des consommations, avec le seul décalage du temps nécessaire à la construction des matériels et aux travaux de génie civil.

Quant aux capitaux, s'ils jouent dans la distribution un rôle bien plus important que dans la construction électrique, la sécurité qu'ils demandent n'est pas absolue, mais relative. Que ce soit en économie purement libérale ou en économie planifiée, il s'agit toujours de choisir parmi les possibilités d'investissement, et ce choix ne fait intervenir que des sécurités relatives.

Adresse de l'auteur:

P. Ailleret, directeur des études et recherches de l'Electricité de France, 12, Place des Etats-Unis, Paris 16^e.

Les besoins mondiaux futurs en énergie et leur couverture

[D'après: «Energy in the Future». By Palmer Cosslett Putnam. New York, Nostrand 1953; 8°, X, 556 p., 160 fig., 152 tab., 18 pl.]

621.311.003

Vu l'épuisement progressif des réserves mondiales de combustibles fossiles, il semble judicieux de faire le point dans ce domaine et d'essayer d'établir des prévisions pour l'avenir. L'étude que nous résumons ici a été entreprise aux Etats-Unis à l'instigation de l'«Atomic Energy Commission» (AEC); elle représente un essai dans cette direction. Nous reproduisons les idées de l'auteur en pensant contribuer

ainsi à éclaircir le problème de la structure future de notre économie de l'énergie, problème qui nous préoccupe tous.

Les limites naturelles qui sont fixées à la production thermique d'énergie électrique basée sur les combustibles fossiles confirment la nécessité qu'il y a d'aménager complètement nos forces hydrauliques et de remplacer bientôt les dits combustibles par de nouvelles sources d'énergie, grâce notamment à l'utilisation de l'énergie nucléaire.

Bien que le mot «futur» soit contenu dans le titre de l'ouvrage de Putnam, celui-ci ne désire pas passer pour un prophète. L'avenir de l'humanité est incertain. Cela ne doit cependant pas nous empêcher d'examiner ce qui se produirait si la vie sur la terre continuait à se développer durant un siècle encore au rythme accéléré auquel nous nous sommes déjà habitués. L'auteur se propose donc d'essayer d'estimer les besoins mondiaux futurs maxima en énergie auxquels on peut raisonnablement s'attendre pour les prochains cinquante ou cent années. Putnam souligne plusieurs fois qu'il s'agit bien d'une estimation des besoins maxima probables en énergie, et non pas des besoins minima possibles. Comme l'ouvrage a été publié à l'instigation de l'«Atomic Energy Commission», son but final est de déterminer la demande maximum que devra couvrir l'énergie nucléaire dans les cinquante ou cent prochaines années.

Le plan de l'ouvrage est très simple. L'auteur étudie tout d'abord quel fut l'accroissement de la population du globe dans le passé, afin d'éclaircir si l'évolution future de cette même population est prévisible ou non. Après avoir déterminé l'augmentation maximum future, l'auteur estime ensuite les besoins maxima probables en énergie, aussi bien par habitant que pour la population totale maximum calculée. L'ouvrage donne ensuite un aperçu

des gisements économiquement exploitables de combustibles fossiles; il résume les possibilités existant — en dehors de l'énergie nucléaire — de couvrir les besoins en énergie à de faibles prix de revient: il s'agit là surtout des diverses formes de l'énergie solaire. Cette étude permet de conclure combien urgente est la nécessité de mettre à contribution de nouvelles sources d'énergie à bon marché, et permet ainsi de déterminer les besoins maxima auxquels devra faire face l'énergie nucléaire.

Une caractéristique de l'ouvrage est la riche documentation qu'il contient. A elle seule, la bibliographie des ouvrages parus ou non parus comprend 60 pages. L'auteur souligne que tout un groupe de collaborateurs de l'AEC aidèrent à rassembler cette documentation.

1. Comment a évolué jusqu'ici et évoluera à l'avenir la population du globe

Des découvertes archéologiques ont permis d'évaluer que la population du globe se montait, 10 000 ans avant Jésus-Christ, à 1 million d'habitants environ. L'évolution n'a pu être que très lente jusqu'à l'époque d'Auguste: le taux annuel moyen de l'augmentation fut d'environ 0,5 ‰ durant cette période. C'est ainsi que la population totale du globe atteignit environ 275 millions d'habitants à la nais-

sance du Christ. L'augmentation fut insensible durant les sept siècles du Moyen Age qui suivirent. C'est seulement à dater de l'an 1000 que l'on constate un net mouvement d'expansion, qui prit à partir du 17^e siècle un caractère explosif, et ceci aussi bien dans l'hémisphère occidentale que dans l'hémisphère orientale. Le rythme de l'augmentation devient toujours plus rapide; le taux annuel moyen passa de 2 ‰ en 1650 à 11 ‰ en 1951, et il a tendance à augmenter encore. La population du globe était en 1950 de 2,4 milliards d'habitants.

Les essais entrepris jusqu'ici dans le but de prévoir l'évolution du chiffre de la population se sont révélés infructueux. Les difficultés qu'avait prévues le philosophe anglais Malthus en 1798 comme devant être la conséquence d'une augmentation de la population en proportion géométrique et de la production des denrées alimentaires en proportion arithmétique se sont trouvés réfutés jusqu'ici par les progrès de la science. D'autres évaluations, qui se basent sur les chiffres de l'immigration et de l'émigration, ainsi que sur ceux des naissances et des décès, n'ont pas été non plus satisfaisantes, surtout par suite de l'impossibilité de prévoir les chiffres des naissances. Une méthode mathématique, basée sur l'emploi de courbes en S (courbes logistiques), qui passent d'une asymptote inférieure à une asymptote supérieure, est intéressante. Divers peuples ont évolué selon cette loi, mais d'autres non. La difficulté, dans cette méthode, réside dans la détermination du point d'inflexion de la courbe.

C'est pourquoi *Putnam* conclut qu'il ne semble pas encore possible aujourd'hui de prévoir de façon valable l'évolution réelle de la population. Cette impossibilité n'exclue cependant pas une estimation de la population maximum probable dans 50 ou 100 ans.

Pour calculer ce maximum, l'auteur emploie deux méthodes. La première est purement mathématique et consiste à «projeter» dans l'avenir l'évolution constatée jusqu'ici. On vérifie ensuite les résultats en répartissant la population du globe en six groupes distincts et en déterminant le taux maximum probable d'augmentation de la population pour chacun de ces groupes en particulier.

Il est certain que le rythme actuel de l'augmentation de la population ne peut être qu'un phénomène passager; il est impossible qu'il dure encore quelques milliers d'années, sinon la surface entière de la terre serait alors littéralement couverte d'hommes. Mais il n'y a pas de raisons valables pour penser que le rythme actuel de l'augmentation diminue déjà dans les 100 prochaines années. Dans l'immédiat, on doit considérer que les seules limites qui sont fixées à une alimentation suffisante de la population sont constituées par le capital que nous voulons investir dans la production des denrées alimentaires et par les mesures de nature politique et économique qui sont nécessaires pour répartir ces denrées. L'auteur considère donc que c'est un hasard — mais un hasard dont la probabilité de se réaliser est si grande qu'on est obligé d'en tenir compte — si la population du globe continue à se développer durant les 50 ou 100 prochaines années au rythme de 11 ‰ d'augmentation annuelle. Dans

un tel cas — et si l'on part d'une population de $2,33 \pm 0,17$ milliards d'habitants pour 1950 — on arrive, par «projection» purement mathématique, à un chiffre de $3,9 \pm 0,3$ milliards pour l'an 2000 et de $7,2 \pm 1,0$ milliards pour l'an 2050.

Une telle augmentation de la population ne serait possible que si une grande partie des peuples qui, à l'heure actuelle, végètent encore dans des formes d'existence agricoles primitives, subissaient une profonde transformation démographique et passaient à des formes évoluées de caractère industriel — urbain — agricole. L'analphabétisme, qui s'étend encore aujourd'hui à la moitié de la population du globe, diminuerait. Une telle transformation est impossible sans une augmentation de la population; elle est caractérisée, comme l'expérience l'a montré, tout d'abord par une diminution de la mortalité puis — plus tard seulement, il est vrai — par un recul de la natalité. Une population en augmentation serait impossible sur la base des formes primitives agricoles de la vie, car le nombre de personnes pouvant exister en ayant une activité non agricole serait alors très faible. Il y a donc une grande probabilité pour qu'une population de type évolué, industrialisé et urbain, — si elle devenait une réalité pour la terre entière — soit nécessairement plus nombreuse que la population actuelle. Ceci ne veut pas dire que les différences existant aujourd'hui déjà entre les peuples du point de vue de leur évolution, devraient diminuer.

L'auteur représente systématiquement, grâce à des courbes en S, à quel stade de la transformation démographique citée plus haut se trouvent les divers peuples de la terre, qui sont répartis en 6 groupes distincts. C'est dans la plus grande partie des territoires de l'Afrique, de la Chine, des Indes et de l'Indonésie que la dite transformation est le moins avancée; en Europe, au Canada et aux États-Unis qu'elle est le plus avancée. Il est possible cependant que certains peuples, ou certaines parties de ces peuples ne passent jamais complètement par cette transformation. La caractéristique des groupes de peuples situés au-dessous du point d'inflexion de la courbe est un taux d'accroissement de la population relativement élevé; celle des groupes de peuples situés au-dessus de ce point d'inflexion un taux relativement bas.

Pour chacun de ces groupes de peuples, l'auteur calcule des «multiplicateurs» spécifiques et détermine l'accroissement probable de la population de chacun des groupes. La population mondiale totale qui en résulte est de 6,3 milliards d'habitants, chiffre légèrement en-dessous de celui de $7,2 \pm 1$ milliards trouvé par la méthode mathématique. On peut dire cependant, en gros, que dans 100 ans la population maximum probable du globe sera environ trois fois plus nombreuse qu'en 1950 et s'exprimera par un chiffre situé entre 6 et 8 milliards. Il ne s'agit pas là du chiffre maximum possible en soi pour l'année 2050; ce n'est qu'un maximum probable.

Les moyens de pourvoir ces hommes d'un toit, de nourriture et de vêtements existent. Une annexe donne un aperçu des estimations qui ont été faites en ce qui concerne les sols cultivables de la terre

entière et de l'augmentation possible des rendements des sols qui sont actuellement déjà cultivés; la mécanisation de l'agriculture et l'amendement des sols par les engrais joueront un grand rôle dans ce domaine.

Pour les considérations qui suivent relatives aux besoins en énergie, l'auteur adopte — se fondant sur cette étude de l'évolution probable de la population — les chiffres de 3,7 milliards pour l'an 2000 et de 6 milliards pour l'an 2050. De telles masses de population seraient nécessairement caractérisées par des besoins en énergie par habitant plus élevés qu'aujourd'hui.

2. Les besoins en énergie dans le passé et à l'avenir

L'auteur donne un aperçu des besoins en énergie brute et énergie utile durant la période allant de 1860 à 1950, et ceci pour diverses zones et pays, comme l'Argentine, la France, l'Allemagne, l'Inde, le Japon, la Grande-Bretagne, les Etats-Unis et l'URSS; il souligne que les statistiques renferment pour certaines régions des possibilités d'erreurs. L'unité qui a été choisie pour la représentation est l'unité anglaise de chaleur dite BThU¹⁾. Tandis que les besoins mondiaux en énergie brute se sont montés entre 1850 et 1950 à 4 Q²⁾, ils furent en 1947 de 0,093 Q, ce qui correspondrait à 9,3 Q en cent ans, et en 1950 de 0,1 Q, ce qui correspondrait à 10 Q en cent ans. En 1950, les besoins mondiaux annuels en énergie brute ont représenté environ 0,003 % de l'énergie solaire tombant sur la surface de la terre.

Parmi les diverses sources d'énergie, le bois fut la principale jusqu'en 1880. C'est à ce moment qu'il fut dépassé par le charbon. La part de ce dernier atteignit son maximum en 1910 avec 88 %; cette part a diminué depuis, pour atteindre 53 % en 1947. Jusqu'en 1940, les déchets de l'agriculture contribuaient dans une plus grande mesure à couvrir les besoins en énergie brute que l'ensemble de tous les combustibles liquides (y compris le gaz). La part des combustibles liquides s'est cependant rapidement accrue ces derniers temps: elle est passée de 3 % en 1900 à 12 % en 1925 et 25 % en 1947, et on l'estime à 30 % pour 1950. Bien que la part de l'énergie hydraulique ait aussi tendance à s'accroître depuis 1900, elle n'atteint pas encore 1 %.

Pour pouvoir passer des chiffres donnant la consommation d'énergie brute à ceux de l'énergie utile produite, l'auteur traite en détail du rendement de la transformation de l'énergie brute provenant des diverses sources en chaleur «de consommation», chaleur «de production» et en force motrice, dans les divers pays. Il conclut de cette étude que le rendement moyen pour toutes les formes de l'énergie utile a presque triplé aux Etats-Unis entre 1900 et 1950; il est passé en effet de 11 % à 30 % environ. Le même rendement moyen pour le monde entier est passé dans le même temps de 11 % à 22 %. C'est l'Inde et le Japon qui viennent en dernier rang: le rendement moyen n'y est que de 6 % et 13 % respectivement.

C'est par suite de cette augmentation du rendement que les besoins en énergie brute par habitant n'ont augmenté que très lentement durant ces dernières décennies dans divers pays et dans le monde entier, ou sont même restés stationnaires, bien que les besoins en énergie utile croissent constamment. C'est ainsi que la consommation d'énergie brute par habitant ne s'est accrue aux Etats-Unis entre 1917 et 1947 que de 7 % seulement, alors que la production d'énergie utile par habitant augmentait dans le même temps de 260 %. Si l'on part de l'année 1860, le premier doublement de consommation d'énergie utile par habitant dans le monde a exigé 39 ans, le deuxième 37 ans, et le troisième 16 ans environ. En 1950, la consommation moyenne annuelle d'énergie utile par habitant s'est montée pour le monde entier à 10 millions de BThU (2,52 millions de kcal).

La consommation mondiale totale d'énergie utile a augmenté entre 1860 et 1950 en moyenne de 2,2 % par an; ce taux d'accroissement annuel est lui-même en augmentation; il est d'environ 3 % depuis 1935. Comme une amélioration du rendement aussi importante que celle qui a été constatée jusqu'ici est pratiquement devenue impossible, tout accroissement futur de la consommation d'énergie utile se traduira sans doute par un accroissement de la consommation d'énergie brute relativement plus important que jusqu'ici.

La forte extension prévue pour la population mondiale ne pourra se réaliser que parallèlement à une forte augmentation des besoins en énergie utile par habitant, car la transformation démographique que nous citons plus haut exigera une augmentation de la productivité, du revenu réel et de la demande par habitant.

Pour évaluer la consommation future maximum d'énergie, l'auteur détermine tout d'abord — à l'aide du taux d'accroissement annuel en pour-cent — l'évolution de la consommation moyenne en énergie utile par habitant. Puis il estime quelle sera l'augmentation minimum probable du rendement moyen. En tenant compte du rendement ainsi obtenu, on peut alors calculer les besoins en énergie brute par habitant; en multipliant par les chiffres estimés de la population future, on obtient les besoins totaux en énergie brute. L'auteur additionne ensuite les consommations annuelles, et compare le résultat avec les réserves mondiales en charbon, pétrole et autres sources d'énergie.

Tout tend à confirmer que l'accroissement annuel des besoins en énergie utile par habitant ne tombera pas, au cours des cinquante prochaines années, au-dessous du taux de 3 % qu'il a atteint aujourd'hui. Bien au contraire, il est probable que cet accroissement dépassera bientôt 3 %. L'Allemagne, l'URSS, les Etats-Unis et le Japon ont déjà connu de longues périodes durant lesquelles l'accroissement annuel de la consommation en énergie utile se situait entre 3,2 et 4,4 %.

Dans 100 ans, le rendement aura sans doute atteint aux Etats-Unis 43 % et dans le monde entier 36 % au minimum.

Sur la base de ces estimations, on peut calculer que, pour un accroissement annuel de la consom-

¹⁾ British Thermal Unit; 1 BThU = 1 lb (water). 1 °F = 0,252 kcal.

²⁾ 1 Q = 10¹⁸ BThU = 0,252 · 10¹⁸ kcal = 0,252 · 10⁹ Tcal = 2,92 · 10¹⁴ kWh; 1 Q ≅ 38 milliards de tonnes de charbon.

mation d'énergie utile par habitant de 3 % et pour une population mondiale de 6 milliards d'habitants, les besoins en énergie brute se monteront en 2050 à 2,6 Q; ces besoins seraient donc 28 fois plus élevés que pour l'année 1950, où ils furent de 0,09 Q. Les besoins moyens annuels en énergie brute par habitant seraient alors de 500 millions de BThU, soit le double de la consommation aux Etats-Unis en 1950. La consommation totale d'énergie brute jusqu'en 2050 se monterait à 72 Q. Si par contre le taux d'accroissement annuel passait à 5 % et la population à 8 milliards d'habitants, 487 Q deviendraient nécessaires pour les 100 prochaines années.

3. Les sources d'énergie économiquement exploitables (sans l'énergie nucléaire)

Grâce à un vaste aperçu sur les gisements mondiaux actuellement connus de combustibles fossiles tels que le charbon, le pétrole, et le gaz naturel — aperçu qui tient compte de l'évolution des prix de revient — l'auteur cherche à répondre à la question de savoir pour combien de temps encore l'humanité est en droit d'espérer un niveau de vie élevé sur la base des dites sources d'énergie (appelées sources d'«énergie-capital»). Putnam appelle «économiquement exploitables» les gisements pour lesquels les prix de revient de l'unité produite ne dépasseront pas le double des prix atteints en 1950 (compte tenu de l'amélioration future du rendement). Cette condition restrictive élimine toute question relative aux quantités de ces sources d'énergie qui existent en fait dans les couches les plus reculées du sous-sol. Des prix de revient de l'énergie qui seraient un multiple des prix actuels se traduiraient par un ralentissement de la vie économique et rapprocheraient la date à laquelle il deviendrait nécessaire de mettre à contribution d'autres sources d'énergie.

Le charbon est le combustible minéral le plus anciennement connu. Jusqu'en 1950, 55 % de l'ensemble des besoins en énergie brute ont été couverts grâce à lui. Jusqu'en 1948, 2,3 Q environ de charbon ont été consommés au total, dont les trois quarts depuis 1900 et la moitié depuis 1923.

L'équivalent en chaleur des gisements mondiaux de charbon économiquement exploitables est estimé à 32 Q. Aussi bien en Europe qu'aux Etats-Unis, les coûts de production ont fortement augmenté par rapport à l'époque du début du vingtième siècle; cette augmentation atteint souvent 50 % et même 100 %. Jusqu'à une époque récente, cette augmentation a été cependant plus que compensée par l'amélioration du rendement de la transformation de l'énergie. Par exemple, au cours des 50 dernières années, le rendement de la production thermique d'énergie électrique a triplé aux Etats-Unis, alors que le prix de revient du charbon augmentait seulement de 50 %.

L'équivalent en chaleur de l'ensemble des gisements mondiaux économiquement exploitables — connus et encore inconnus — de pétrole (y compris le gaz naturel qui l'accompagne) est évalué à 5 Q. Comme l'on préfère de plus en plus les combustibles liquides, et comme on peut estimer que les

besoins se monteront à 6,3 Q pour les 50 prochaines années, il faut admettre que les besoins en combustibles liquides devront, à partir de l'an 2000, être entièrement couverts par des combustibles liquides synthétiques. L'époque où l'on produira le pétrole à partir du charbon s'approche de plus en plus, par suite de l'accroissement des coûts de production du pétrole naturel et de la diminution des coûts de la production synthétique. Si l'on admet que jusqu'en l'an 2000 10 Q de charbon seront consommés sous la même forme que jusqu'ici, 22 Q resteraient encore à disposition des hommes pour la production synthétique de combustibles liquides. Les pertes résultant de cette transformation se chiffrent à 11 Q environ, si bien que l'on peut dire que les gisements de charbon économiquement exploitables étaient estimés en 1950 à 21 Q. Si l'on tient compte de l'ensemble des gisements économiquement exploitables de combustibles liquides naturels, on peut admettre que la réserve mondiale de combustibles fossiles se monte à 27 Q environ.

Une comparaison de ces chiffres avec ceux des besoins en énergie calculés en partant de l'évolution probable de la population permet de conclure que ce n'est que pour un temps relativement court que l'humanité peut encore espérer maintenir son niveau de vie en basant sa production d'énergie sur les combustibles fossiles. Si l'on veut supprimer le danger de prix de revient rapidement croissants, c'est à partir de 1975 déjà aux Etats-Unis — et pas beaucoup plus tard dans le monde entier — que des sources nouvelles et à bon marché devraient être mises à contribution pour couvrir les besoins en énergie.

Putnam étudie ensuite la question de savoir jusqu'à quel point l'humanité pourra être à l'avenir approvisionnée en énergie à bon marché par des sources dites sources d'«énergie-revenu», c'est-à-dire qui se renouvellent constamment et à de courts intervalles; l'auteur examine la production minimum qu'on peut attendre des dites sources.

Dix sources d'énergie de cette sorte, qui sont déjà exploitées, à savoir le bois, les déchets agricoles l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne, l'énergie solaire directement utilisée pour la production de chaleur et de force motrice, les pompes de chaleur, les différences de températures existant dans les eaux tropicales, les marées et les vapeurs d'eau naturelles, sont examinées en détail l'une après l'autre. L'auteur conclut de cet examen que la contribution de ces diverses sources d'énergie à la couverture des besoins mondiaux futurs en énergie ne peut être que faible — à l'exception de l'énergie solaire utilisée directement pour la production de chaleur. Les besoins totaux en énergie brute sont estimés par l'auteur à 72 Q au minimum jusqu'en 2050; or, les dites sources d'énergie ne pourront couvrir que 5 à 10 Q de ces besoins, c'est-à-dire 7 à 15 %, la moitié de ce montant provenant de l'utilisation directe de l'énergie solaire pour la production de chaleur.

La part actuelle de l'énergie hydraulique dans la consommation mondiale d'énergie brute se monte à 0,7 %. L'aménagement des forces hydrauliques

se développe constamment, mais le taux annuel d'extension est en diminution; ce taux est tombé en effet de 22 % durant la période allant de 1890 à 1900, à 4,75 % durant la période allant de 1940 à 1950. Si ce taux ne diminuait pas au-dessous de 1 % dans cent ans, la quantité d'énergie produite annuellement grâce aux forces hydrauliques serait en l'an 2000 cinq fois plus grande et en l'an 2050 sept fois plus grande qu'aujourd'hui.

En 1950, les forces hydrauliques ont produit une puissance de 75 GW environ (la puissance installée des machines génératrices était de 70 GW environ) et la production de puissance continuellement disponible fut de 50 GW environ. Si l'on admet que la durée d'utilisation annuelle reste la même, les facteurs cinq et sept dont nous parlions plus haut se traduiraient par une puissance de 375 GW en l'an 2000 et de 1275 GW en 2050. Or, les forces hydrauliques exploitables totales du globe sont estimées à moins de 400 GW, à savoir:

100 GW pour la Russie orientale, l'Inde, la Chine, le Japon, l'Australie et la Nouvelle-Zélande.

104 GW pour l'Amérique du Nord et du Sud.

175 GW pour l'Europe, la Russie occidentale, le Moyen Orient et l'Afrique.

Ces données représentent la puissance minimum disponible des usines au fil de l'eau. Si l'on tient compte de l'accumulation, la production annuelle pourrait atteindre — au stade définitif de l'aménagement — 1000 GW.année, ce qui nécessiterait une puissance installée de 2000 GW environ.

Si la production annuelle d'énergie devenait vraiment jusqu'en 2050 dix-sept fois plus importante qu'aujourd'hui, la contribution totale des forces hydrauliques jusqu'à cette date ne se monterait qu'à 0,6 Q, soit 0,8 % des besoins mondiaux minima estimés en énergie brute. Ces chiffres ne tiennent d'ailleurs pas compte du fait que le colmatage progressif des bassins d'accumulation a tendance à faire diminuer la puissance produite. C'est ainsi que le bassin «Lake Mead» (Bolder Dam) sur le Colorado sera complètement colmaté dans 127 ans, et que l'usine génératrice ne pourra plus être exploitée que comme usine au fil de l'eau avec une puissance réduite de moitié.

Même si l'utilisation des forces hydrauliques devait faire des progrès plus rapides qu'il a été admis, il n'est pas probable que cette source d'énergie permette jamais de couvrir plus de quelques pourcent des besoins mondiaux en énergie.

A côté des sources d'«énergie-revenu» déjà exploitées pratiquement, l'auteur rappelle l'existence de diverses autres, dont l'exploitation en est encore au stade expérimental. Intéressante est la description de l'utilisation de l'énergie solaire par l'intermédiaire de son assimilation par une espèce d'algue, la chlorelle (*Chlorella pyrenoidosa*). Des essais ont déjà été entrepris en Amérique dans cette direction. Cette algue est cultivée en laboratoire dans une solution déterminée et dans une atmosphère enrichie d'acide carbonique; on atteint ainsi un rendement de l'utilisation de l'énergie solaire de près de 10 %. Par an et par acre (0,4 ha), il est possible d'obtenir une production de 75 tonnes

d'une poudre vert-jaunâtre contenant 54 % de protéines. Cette poudre peut servir de combustible dans des usines génératrices. L'acide carbonique et les autres produits qui seraient ainsi libérés pourraient être recueillis et employés à nouveau.

Le coût de production pour l'exploitation du procédé à l'échelle industrielle n'est pas encore connu. D'après les essais en laboratoire, on peut s'attendre à ce que le coût de production d'une même quantité d'énergie soit 150 fois plus élevé dans ce cas que dans le cas du charbon. Cela voudrait dire que l'énergie électrique produite en partant du combustible «chlorelle» serait 40 à 50 fois plus chère que celle produite en partant du charbon.

Bien que la production des ces algues, si elles étaient cultivées sur une surface égale à celle cultivée actuellement au total pût suffire à couvrir les besoins en énergie de 6 milliards d'habitants en 2050, et bien que les protéines en question pussent aussi être utilisées pour l'alimentation des hommes et des animaux, il n'y a que peu d'espoir que cette méthode de transformation de l'énergie solaire devienne un jour rentable.

Il n'y a donc que peu d'espoir que les sources d'«énergie-revenu» puissent garantir à l'humanité à l'avenir un niveau de vie élevé. La contribution de ces sources d'énergie restera probablement dans d'étroites limites. Il est donc absolument nécessaire de mettre à contribution de nouvelles sources d'«énergie-capital» à bon marché.

4. L'importance future de l'énergie nucléaire

Bien que la solution des problèmes techniques relatifs à l'utilisation de l'énergie nucléaire ait pu être rapidement avancée, l'aspect économique comprend encore de nombreuses inconnues, telles les frais de capital, la durée des installations, leur entretien, etc... C'est donc aujourd'hui uniquement une question de coût si l'énergie nucléaire peut ou non concurrencer les autres sources d'énergie. La marge d'incertitude relative au coût est très faible: elle commence à un niveau qui se trouve légèrement en-dessous du coût de l'énergie produite en partant du charbon et s'étend jusqu'à un niveau correspondant à un coût double de celui de cette dernière énergie. Les différences de coût sont donc sensiblement moins grandes que pour la méthode basée sur l'utilisation de l'algue chlorelle. Même sans fabrication d'armes atomiques, le plutonium que livrerait le réacteur comme sous-produit pourrait être employé à nouveau comme combustible.

La production d'énergie électrique semble être l'application la plus avantageuse de l'énergie nucléaire. En prenant l'exemple des Etats-Unis, l'auteur illustre en détail l'introduction de l'énergie nucléaire sur un marché de l'énergie qui serait inchangé par rapport à celui d'aujourd'hui.

Aux Etats-Unis, au cours des 40 dernières années, la production d'énergie électrique a doublé tous les dix ans; la production y est donc aujourd'hui dix-sept fois plus grande qu'en 1910. 90 % de cette énergie ont été produits dans des centrales thermiques. Par suite de l'amélioration constante du

Statistique de l'énergie électrique

des entreprises livrant de l'énergie à des tiers

Elaborée par l'Office fédéral de l'économie électrique et l'Union des Centrales Suisses d'électricité

Cette statistique comprend la production d'énergie de toutes les entreprises électriques livrant de l'énergie à des tiers et disposant d'installations de production d'une puissance supérieure à 300 kW. On peut pratiquement la considérer comme concernant toutes les entreprises livrant de l'énergie à des tiers, car la production des usines dont il n'est pas tenu compte ne représente que 0,5 % environ de la production totale.

La production des chemins de fer fédéraux pour les besoins de la traction et celle des entreprises industrielles pour leur consommation propre ne sont pas prises en considération. La statistique de la production et de la distribution de ces entreprises paraît une fois par an dans le Bulletin.

Mois	Production et achat d'énergie											Accumulation d'énergie				Exportation d'énergie	
	Production hydraulique		Production thermique		Energie achetée aux entreprises ferroviaires et industrielles		Energie importée		Energie fournie aux réseaux		Différence par rapport à l'année précédente	Energie emmagasinée dans les bassins d'accumulation à la fin du mois		Différences constatées pendant le mois — vidange + remplissage			
	1953/54	1954/55	1953/54	1954/55	1953/54	1954/55	1953/54	1954/55	1953/54	1954/55		1953/54	1954/55	1953/54	1954/55	1953/54	1954/55
	en millions de kWh											%	en millions de kWh				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Octobre	897	940	12	3	32	51	26	62	967	1056	+ 9,2	1369	1533	— 43	— 6	100	135
Novembre ..	797	829	17	14	19	26	101	120	934	989	+ 5,9	1183	1360	—186	—173	67	73
Décembre ..	719	901	34	8	18	19	192	131	963	1059	+10,0	872	1210	—311	—150	61	86
Janvier	699	924	27	3	21	25	221	99	968	1051	+ 8,6	596	1049	—276	—161	51	91
Février	636	949	33	1	16	20	213	55	898	1025	+14,1	324	766	—272	—283	51	124
Mars	701	1067	17	3	19	21	166	67	903	1158	+28,2	187	398	—137	—368	46	144
Avril	807	1019	5	1	24	28	73	10	909	1058	+16,4	146	294	— 41	—104	69	151
Mai	958		2		34		40		1034			313		+167		126	
Juin	1048		1		60		27		1136			695		+382		203	
Juillet	1123		1		65		39		1228			949		+254		240	
Août	995		1		71		47		1114			1357		+408		201	
Septembre ..	1011		2		72		52		1137			1539 ⁴⁾		+182		209	
Année	10391		152		451		1197		12191							1424	
Oct.-mars ...	4449	5610	140	32	125	162	919	534	5633	6338	+12,5					376	653

Mois	Distribution d'énergie dans le pays																	
	Usages domestiques et artisanat		Industrie		Electro-chimie, métallurgie, thermie		Chaudières électriques ¹⁾		Traction		Pertes et énergie de pompage ²⁾		Consommation en Suisse et pertes					
													sans les chaudières et le pompage		Diffé- rence % ³⁾	avec les chaudières et le pompage		
	1953/54	1954/55	1953/54	1954/55	1953/54	1954/55	1953/54	1954/55	1953/54	1954/55	1953/54	1954/55	1953/54	1954/55				
en millions de kWh																		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Octobre	394	413	162	168	112	118	24	30	43	55	132	137	834	881	+ 5,7	867	921	
Novembre ..	411	431	161	178	101	111	10	9	58	59	126	128	851	903	+ 6,1	867	916	
Décembre ..	435	459	166	174	97	119	4	9	67	75	133	137	895	958	+ 7,0	902	973	
Janvier	445	465	164	170	96	114	5	12	71	69	136	130	907	944	+ 4,1	917	960	
Février	407	417	158	162	91	111	4	26	63	66	124	119	839	874	+ 4,0	847	901	
Mars	404	456	160	181	106	143	5	34	61	67	121	133	847	978	+15,5	857	1014	
Avril	379	396	148	158	125	138	22	46	56	48	110 (5)	121 (8)	813	853	+ 4,9	840	907	
Mai	379		151		128		68		47		135		819			908		
Juin	351		154		127		116		42		143		793			933		
Juillet	357		154		137		136		52		152		831			988		
Août	368		152		130		65		53		145		824			913		
Septembre ..	378		158		124		66		55		147		839			928		
Année	4708		1888		1374		525		668		1604 (150)		10092			10767		
Oct.-mars ...	2496	2641	971	1033	603	716	52	120	363	391	772 (32)	784 (27)	5173	5538	+ 7,1	5257	5685	

¹⁾ Chaudières à électrodes.

²⁾ Les chiffres entre parenthèses représentent l'énergie employée au remplissage des bassins d'accumulation par pompage.

³⁾ Colonne 15 par rapport à la colonne 14.

⁴⁾ Energie accumulée à bassins remplis: Sept. 1954 = 1714,10⁶ kWh.

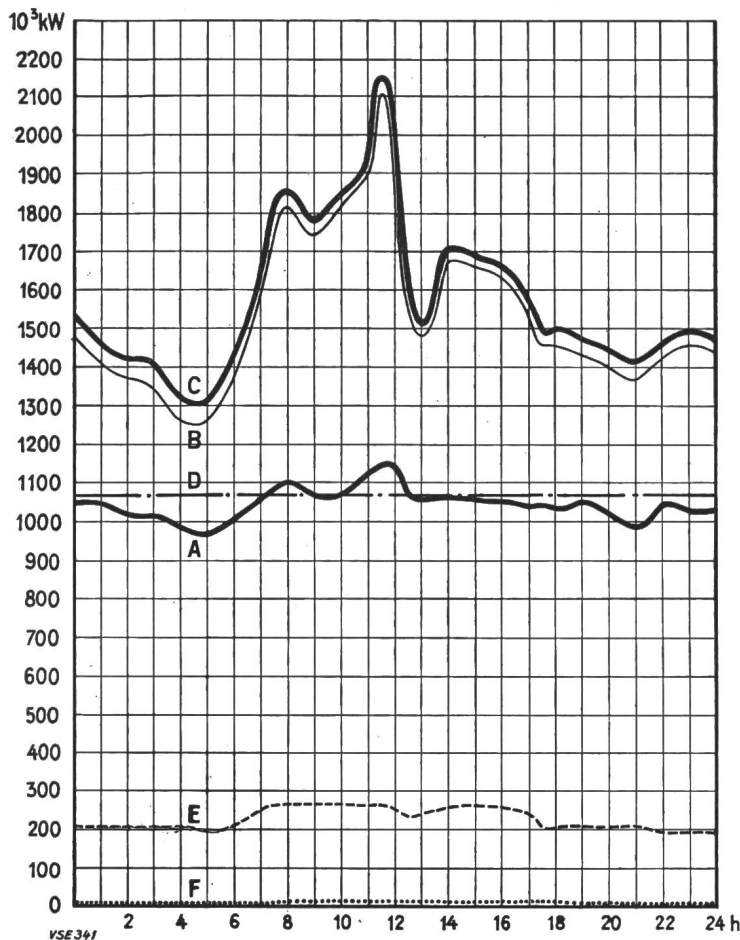


Diagramme de charge journalier du mercredi

13 avril 1955

Légende:

1. Puissances disponibles: 10³ kW

Usines au fil de l'eau, disponibilités d'après les apports d'eau (0—D)	1067
Usines à accumulation saisonnière (au niveau maximum)	1367
Puissance totale des usines hydrauliques	2434
Réserve dans les usines thermiques	155

2. Puissances constatées:

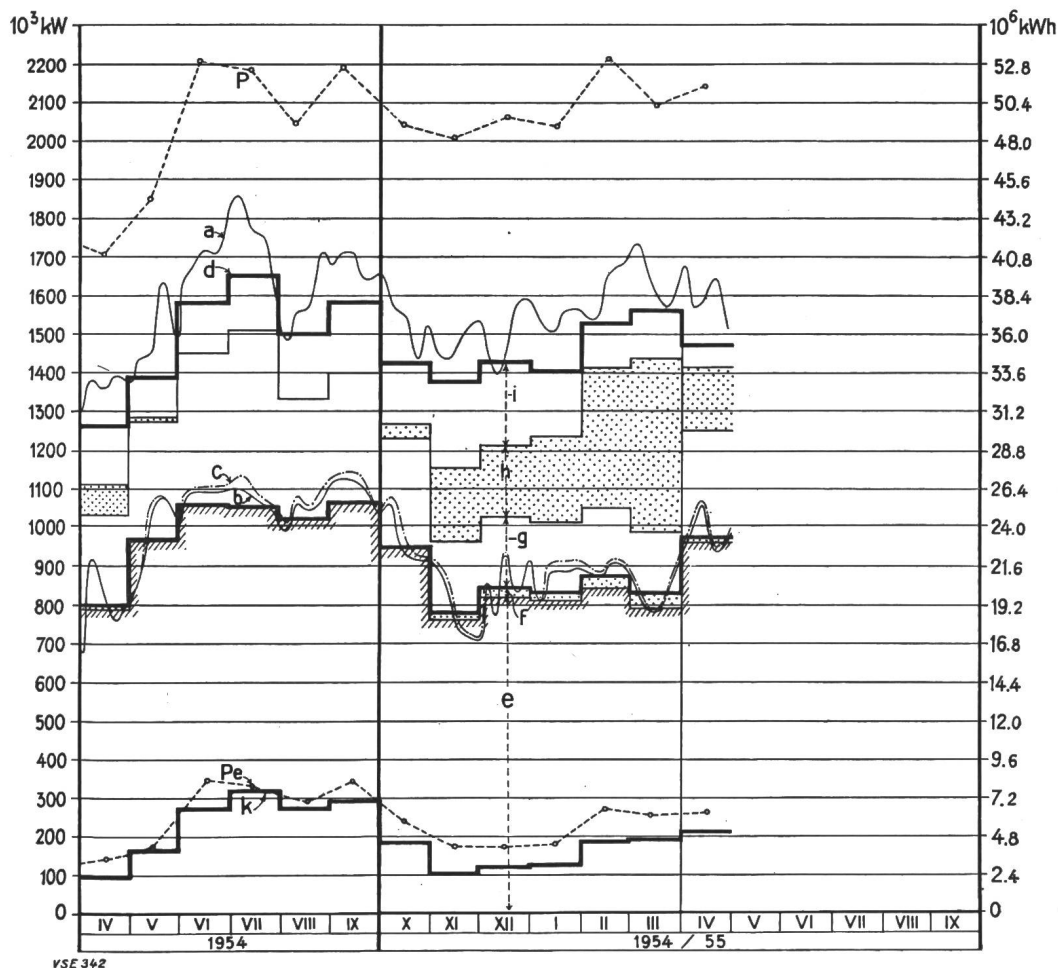
0—A Usines au fil de l'eau (y compris usines à bassin d'accumulation journalière et hebdomadaire).
A—B Usines à accumulation saisonnière.
B—C Usines thermiques + livraisons des usines des CFF, de l'industrie et importation.
0—E Exportation d'énergie.
0—F Importation d'énergie.

3. Production d'énergie 10⁶ kWh

Usines au fil de l'eau	25,3
Usines à accumulation saisonnière	12,0
Usines thermiques	0
Livraisons des usines des CFF et de l'industrie	0,8
Importation	0,2
Total, Mercredi 13 avril 1955	38,3
Total, Samedi 16 avril 1955	36,2
Total, Dimanche 17 avril 1955	28,9

4. Consommation d'énergie

Consommation dans le pays	32,9
Exportation d'énergie	5,4

Production du
mercredi et pro-
duction mensuelle

Légende:

1. Puissances maxima:
(chaque mercredi du milieu du mois)
P de la production totale;
Pe de l'exportation.

2. Production du mercredi:
(puissance ou quantité d'énergie moyenne)
a totale;
b effective d. usines au fil de l'eau;
c possible d. usines au fil de l'eau.

3. Production mensuelle:
(puissance moyenne mensuelle ou quantité journalière moyenne d'énergie)
d totale;
e des usines au fil de l'eau par les apports naturels;

f des usines au fil de l'eau par les apports provenant de bassins d'accumulation;
g des usines à accumulation par les apports naturels;
h des usines à accumulation par prélèvement s. les réserves accumul.;

i des usines thermiques, achats aux entreprises ferroviaires et indust. import.;

j exportation;

k consommation dans le pays.

rendement, cette extension de la production ne se traduit que par des besoins en énergie brute dix fois plus importants aujourd'hui qu'en 1910. En 1947, la consommation d'énergie brute pour la production d'électricité fut aux Etats-Unis de $4300 \cdot 10^{12}$ BThU, sur une consommation totale d'énergie brute de $33\,700 \cdot 10^{12}$ BThU. 30 % de ces $4300 \cdot 10^{12}$ BThU ont été absorbés par des usines génératrices hydrauliques ou par de très petites usines thermiques, si bien que $3000 \cdot 10^{12}$ BThU, soit 9 % de la consommation totale en énergie brute auraient pu être couverts par l'énergie nucléaire. Si l'on admet que la production d'énergie électrique soit dans 50 ans huit fois plus élevée qu'aujourd'hui, et que ceci corresponde à des besoins en énergie brute six fois plus grands qu'aujourd'hui (la puissance installée augmenterait alors de 4,25 % par an), la production d'électricité exigerait en l'an 2000 une énergie brute de $25\,000 \cdot 10^{12}$ BThU environ, soit 17 % des besoins totaux en énergie brute estimés pour la même année. Si 70 % de la dite énergie électrique étaient produits par des réacteurs nucléaires, 12 % de l'ensemble des besoins en énergie brute des Etats-Unis pourraient donc être couverts par l'énergie atomique.

Pour produire $3000 \cdot 10^{12}$ BThU en 1947 dans des centrales nucléaires, une puissance thermique de 100 GW environ aurait été nécessaire. De même, la production de $17\,500 \cdot 10^{12}$ BThU exigerait en l'an 2000 une puissance thermique d'environ 600 GW.

De plus, on peut s'attendre à ce qu'aux Etats-Unis en l'an 2000 un dixième des besoins en chaleur «de consommation» et «de production» seront couverts par l'énergie nucléaire; les puissances correspondantes seraient de 100 GW et 50 GW respectivement. Au total, 15 % des besoins en énergie brute pourraient donc être couverts par l'énergie nucléaire. Si l'on veut atteindre cependant une puissance de 750 GW en l'an 2000, il faudra équiper chaque année, à partir de 1970, 25 GW.

Comme l'approvisionnement en énergie à bon marché est l'une des conditions fondamentales d'une économie saine, il faut conclure que le système actuel, où 85 % des besoins en énergie ne peuvent pas être couverts par l'énergie nucléaire, est devenu complètement faux. Tant qu'une grande partie de l'énergie sera consommée par de petits consommateurs tels que les automobiles, les autobus, les avions, les locomotives, les bateaux, les maisons, etc..., l'augmentation future du coût de l'énergie — augmentation qui se traduirait nécessairement par une diminution de notre niveau de vie — ne pourra pas être empêchée. On constatera donc sans doute une forte tendance économique et sociale vers la transformation du système actuel, transformation devant permettre une utilisation accrue de l'énergie nucléaire. Une solution serait donnée par une forte extension de l'électrification. Dans les pays qui ne sont pas encore trop liés au système

actuel, tels que l'URSS, l'Inde, la Mandchourie, le Brésil et la Chine, une telle transformation serait plus facile à réaliser que dans les autres pays.

Il est certain que le coût de l'électrification des chemins de fer et des chauffages d'habitation serait élevé; cela reviendrait encore plus cher d'électrifier les routes principales et d'équiper les véhicules à moteurs de moteurs électriques et de batteries pour l'utilisation des routes secondaires. De même, la dépense serait énorme pour équiper les bateaux et les avions de réacteurs nucléaires. Malgré tout, le renchérissement n'atteindrait jamais le facteur 40 comme dans le cas où les hommes seraient obligés un jour d'utiliser l'énergie solaire à grande échelle pour la transformer en force motrice. On pourrait peut-être, grâce à une telle transformation, augmenter la contribution de l'énergie nucléaire à la couverture de l'ensemble des besoins mondiaux en énergie brute à 60 % en 2050.

Les gisements d'uranium et de thorium actuellement connus et économiquement exploitables sont estimés à $25 \cdot 10^6$ t pour l'uranium et $1 \cdot 10^6$ t pour le thorium. On peut admettre que, grâce aux progrès de la technique, le coût de l'extraction ne dépassera pas un jour 100 dollars par «livre». La quantité de chaleur libérée par la fission d'une «livre» d'uranium est de $3,3 \cdot 10^{10}$ BThU. Un admettant une combustion complète des réserves contenues dans les gisements économiquement exploitables, on obtient:

$$26 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 3,3 \cdot 10^{10} = 1716 \cdot 10^{18} \text{ BThU} \\ = 1716 \text{ Q}$$

S'il se montrait économique de n'utiliser qu'un tiers de la quantité de chaleur contenue dans le combustible nucléaire, on peut dire que le monde possède une réserve de combustible nucléaire de 575 Q, réserve qui est donc 25 fois plus importante que la réserve de charbon économiquement exploitable et 100 fois plus importante que la réserve de pétrole et de gaz naturel. Les gisements de combustible nucléaire pourraient donc probablement couvrir les besoins mondiaux en énergie durant quelques siècles.

Le prix de revient de l'énergie nucléaire est encore inconnu; en 1953, les coûts de combustible, augmentés des coûts du transport et de la combustion répétée se montaient à 0,001 dollar par kWh.

Certains espoirs sont déjà permis aujourd'hui en ce qui concerne l'utilisation de la fission de l'hydrogène pour des buts pacifiques. La fission de l'hydrogène contenu dans un «cubic mile»¹⁾ d'eau de mer couvrirait les besoins d'énergie du monde entier durant plusieurs centaines d'années.

Répetons pour terminer la conclusion principale de *Putnam*: les circonstances nous forcent à découvrir de nouvelles sources d'énergie à bon marché.

W. Goldschmid

¹⁾ $4,2 \cdot 10^9 \text{ m}^3$.