Frais de construction des centrales nucléaires et prix de l'énergie

Autor(en): **Gardel, André**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin technique de la Suisse romande**

Band (Jahr): **86 (1960)**

Heft 18

PDF erstellt am: **23.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-64504

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

86e année Lausanne, 27 août 1960 N° 18

BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

paraissant tous les 15 jours

ORGANE OFFICIEL
de la Société suisse des ingénieurs et des architectes
de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes (S.V.I.A.)
de la Section genevoise de la S.I.A.
de l'Association des anciens élèves de l'EPUL (Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne)
et des Groupes romands des anciens élèves de l'E.P.F. (Ecole polytechnique fédérale de Zurich)

COMITÉ DE PATRONAGE
Président: J. Calame, ing. à Genève
Vice-président: E. d'Okolski, arch. à Lausanne
Secrétaire: S. Rieben, ing. à Genève
Membres:
Fribourg: H. Gicot, ing.; M. Waeber, arch.
Genève: G. Bovet, ing.; Cl. Grosgurin, arch.; E. Martin, arch.
Neuchâtel: J. Béguin, arch.; R. Guye, ing.
Valais: G. de Kalbermatten, ing.; D. Burgener, arch.
Vaud: A. Chevalley, ing.; A. Gardel, ing.; M. Renaud, ing.; Ch. Thévenaz, arch.

CONSEIL D'ADMINISTRATION
de la Société anonyme du « Bulletin technique »
Président: D. Bonnard, ing.
Membres: M. Bridel; J. Favre, arch.; R. Neeser, ing.; A. Robert, ing.; J. P. Stucky, ing.
Adresse: Avenue de la Gare 10, Lausanne

RÉDACTION
Vacat
Rédaction et Editions de la S. A. du « Bulletin technique »
Tirés à part, renseignements
Avenue de Cour 27, Lausanne

ABONNEMENTS

1 an	Suisse	Fr. 28.—	Etranger	Fr. 32.—
Sociétaires	»	» 23.—	»	» 28.—
Prix du numéro	»	» 1.60		

Chèques postaux: « Bulletin technique de la Suisse romande », N° II. 57 75, Lausanne

Adresser toutes communications concernant abonnement, changements d'adresse, expédition, etc., à: Imprimerie La Concorde, Terreaux 29, Lausanne

ANNONCES
Tarif des annonces:

1/1 page	Fr. 290.—
1/2 »	» 150.—
1/4 »	» 75.—
1/8 »	» 37.50

Adresse: Annonces Suisses S. A.
Place Bel-Air 2. Tél. (021) 22 33 26. Lausanne et succursales

SOMMAIRE

Frais de construction des centrales nucléaires et prix de l'énergie, par André Gardel, Dr ès sc. techn., privat-docent à l'EPUL, ingénieur-conseil.
Sur le calcul de réseaux électrotélémétriques, par A. Ansermet, ingénieur-professeur.
Bibliographie. — Les congrès. — Service de placement — Documentation générale. — Informations diverses.

SKA 401.1

FRAIS DE CONSTRUCTION DES CENTRALES NUCLÉAIRES ET PRIX DE L'ÉNERGIE

par ANDRÉ GARDEL, Dr ès sc. techn., privat-docent à l'EPUL, ingénieur-conseil [1]

I. Préambule

Il y a plus de dix-sept ans que le premier réacteur atomique est entré en service, et nombreuses sont aujourd'hui les installations qui ont plus de dix ans d'activité. C'est dire que la technique nucléaire n'en est plus à ses premiers balbutiements. Cependant, les premiers réacteurs étaient destinés à la recherche, et les installations construites pour la production d'énergie utile sont beaucoup plus récentes. La première centrale proprement dite est entrée en service en 1954, la deuxième à fin 1956. Le nombre des réacteurs de puissance en service aujourd'hui est de 23, répartis en quinze centrales, dont six seulement dépassent une puissance électrique de 10 MW ; elles ne fonctionnent, pour la plupart, que depuis un à deux ans.

Si donc on dispose déjà d'un recul certain en ce qui concerne les problèmes techniques, il n'en est manifestement pas de même des questions économiques. C'est pourquoi on rencontre des opinions si divergentes quant à la rentabilité des centrales nucléaires ; personne ne dispose à vrai dire de données précises, basées sur l'exploitation normale d'une centrale, pendant un temps suffisant. On est mieux renseigné quant aux coûts de construction, quoique la variété des types et des puissances doive rendre prudent lorsqu'il s'agit de faire des comparaisons ou d'établir des devis.

Il est, en particulier, difficile de savoir exactement quelle est la part des frais d'étude et de développement que comprend le coût d'une centrale donnée. Difficile aussi, dans bien des cas, de connaître la mesure dans laquelle un projet est affecté par des préoccupations militaires : des réacteurs comme ceux de Marcoule ou de Calder Hall sont des producteurs de plutonium plutôt que des fournisseurs d'énergie et leur conception, de même que leur exploitation, en est influencée.

Il faut enfin faire la différence entre les coûts effectifs et les devis établis aux différents stades des études.

[1] Texte d'un exposé présenté le 24 mars 1960 à Zurich, dans le cadre des Journées d'étude sur l'énergie nucléaire organisées par la *Société suisse des ingénieurs et des architectes* et l'*Association suisse pour l'énergie atomique.*

Dans le domaine nucléaire, plus peut-être que partout ailleurs, on constate une sous-estimation systématique des premières évaluations. Au fur et à mesure que l'étude progresse, les installations de mesure, d'automatisme et de sécurité, apparaissent plus complexes, les spécifications techniques deviennent plus rigoureuses et tant les projeteurs que les fabricants consultés sont conduits à reviser les offres et les devis.

En conclusion de ce préambule, nous remarquerons donc qu'une grande prudence est indispensable pour parler de coût des travaux et prix de l'énergie. Nous nous y risquerons néanmoins en soulignant par avance le caractère approximatif de la plupart des chiffres qui seront indiqués.

II. Coût des travaux

La détermination du coût des travaux présente de grandes analogies avec le cas d'une installation conventionnelle de production d'énergie. On peut procéder soit de manière simplifiée et synthétique, soit de façon analytique.

a) *Méthode synthétique*

Cette première méthode consiste à baser l'estimation sur le coût du kW de puissance électrique nette installée. Celui-ci dépend de manière déterminante de la puissance, petite ou grande, de l'installation nucléaire, et du degré de maturité du projet (prototype ou réédition plusieurs fois améliorée). Nous préciserons plus loin ce que comprend ce coût des travaux. Indiquons, pour fixer les idées, les ordres de grandeurs suivants :

Centrale de faible puissance (5 à 10 MWe), première exécution du réacteur	5000 à 8000 fr./kWe
Centrale de moyenne puissance (50 à 100 MWe), type de réacteur déjà exécuté	2000 à 3000 fr./kWe
Grande centrale (250 à 500 MWe), réacteur de type bien connu, déjà exécuté à plusieurs reprises (p. ex. Dresden, U.S.A., Hinkley Point, U.K.)	1000 à 1500 fr./kWe

Le coût relativement très élevé des centrales de petite puissance provient du fait qu'une bonne partie de l'équipement de mesure et d'automatisme est le même que pour une grande centrale ; l'investissement peut être également plus étendu par suite du peu de maturité du projet et des mesures supplémentaires de sécurité nucléaire que cela nécessite.

A titre de comparaison, le coût des travaux pour une centrale thermique moderne, de grande puissance, s'élève de 600 à 900 fr./kW. Pour un aménagement hydroélectrique, il peut varier entre 1200 et 2200 fr./kW, selon le type d'installation (ces derniers chiffres, plus élevés, sont acceptables, puisqu'il n'y a pas de charge de combustible dans le prix de revient de l'énergie).

On voit donc que, dès à présent, le coût d'installation d'une centrale nucléaire de grande puissance se situe entre celui d'une centrale thermique et celui d'une usine hydroélectrique.

b) *Méthode analytique*

Cette méthode, seule véritablement satisfaisante, ne peut cependant être appliquée de manière valable qu'après exécution, ou tout au moins après des études assez poussées.

Le coût doit évidemment comprendre toutes les fournitures, travaux et équipements nécessaires à la construction de la centrale. Il comprend, en outre :

— les prospections et études préliminaires, l'achat des terrains, les raccordements routiers, électriques, hydrauliques, etc. ;
— les études proprement dites, celles-ci beaucoup plus importantes que pour une centrale conventionnelle ;
— la première charge de combustible, de même que la fourniture initiale de modérateur et autres fluides ;
— les frais de mise en service, relativement élevés par suite des nombreux contrôles, et opérations spéciales ;
— le matériel de recharge et réserve, les frais d'administration et, s'il s'agit d'un devis, une marge confortable pour divers et imprévus.

Cette définition très large du coût des travaux revient à la détermination du capital investi (et il faut alors y ajouter les intérêts intercalaires) ; elle comprend donc bien plus que le coût de la construction proprement dite.

La plupart des postes indiqués n'appellent pas de commentaires particuliers ; nous donnerons quelques précisions supplémentaires concernant le coût des études et du combustible.

Les études d'une petite centrale peuvent s'élever de 7 à 10 millions de francs. Ce montant, extrêmement élevé, provient, d'une part, de la complexité de l'installation, mais d'autre part et surtout du manque d'expérience du personnel et du fait qu'il y a peu de solutions-types ; chaque problème doit être examiné à fond, en particulier sous l'aspect de la sécurité nucléaire.

Les études d'une grande centrale sont évidemment plus coûteuses en valeur absolue, mais elles le sont moins en valeur relative.

Le coût des études peut ainsi atteindre 12 à 20 % du coût total des travaux.

Il est nécessaire de s'arrêter un peu plus longuement sur le coût du combustible, car nous le retrouverons dans les charges annuelles. Il est déterminé par le prix de base du combustible proprement dit et par celui de la fabrication des éléments.

Sous la forme d'hexafluorure (UF_6, contenant 68 % d'U), l'uranium se vend à un prix qui croît rapidement avec l'enrichissement en U 235. Pour fixer les idées, on peut donner les valeurs suivantes :

U nat.	0,7 % U 235	170 fr./kg U	24 fr./g U 235
U enr.	1,4 % U 235	560 fr./kg U	40 fr./g U 235
U enr.	4 %	2200 fr./kg U	57 fr./g U 235
U enr.	90 %	6600 fr./kg U	73 fr./g U 235

A ce prix de base s'ajoutent les frais de transformation en uranium métallique, ou oxyde d'uranium (UO_2), ou autre forme, les frais de transport, de fabrication et gainage des éléments de combustible. Ce coût de fabrication dépend de la quantité, des formes simples ou compliquées des éléments, des pertes de matières (plus onéreuses s'il s'agit d'uranium enrichi). On peut estimer ce coût à environ :

100 fr./kg	pour de l'uranium naturel, des formes simples et de grandes quantités (cas d'un grand réacteur à graphite au gaz) ;
500 fr./kg	pour de l'uranium d'un enrichissement moyen (2 à 4 %), une faible série (quelques tonnes) et des formes plus compliquées.

Tous ces prix sont susceptibles de très fortes réductions à l'avenir, lorsque les techniques seront tout à fait au point et les séries très grandes.

Une première évaluation de la charge de combustible peut être faite à partir de la quantité de matière fissile nécessaire par MW de puissance thermique :

Pour un réacteur à graphite et gaz = 5 à 1 kg U 235/MWt
Pour un réacteur à eau . . . = 2,5 à 0,5 kg U 235/MWt

(Les chiffres les plus faibles correspondent à des unités de grande puissance ou de performance spéciale, tandis que les chiffres les plus élevés sont ceux des des premières réalisations en service.)

III. Montant des charges annuelles

Le coût du kWh résultant immédiatement du quotient des charges annuelles par l'énergie produite, ces charges doivent donc tout d'abord être déterminées.

Elles sont formées principalement :

— des charges financières provenant du capital initial investi, égal au coût des travaux définis précédemment ;
— des frais d'entretien et de renouvellement ;
— des frais généraux de toute nature et autres charges d'exploitation ;
— de la valeur du combustible consommé.

a) *Charges financières*

Nous ne discuterons pas ici de la proportion admissible du capital obligataire, ni du taux d'intérêt ou de dividende à admettre. Une question plus délicate est celle de la durée d'amortissement. On est, en effet, porté à fixer, par prudence, une durée plutôt courte : par exemple de l'ordre de vingt-cinq à trente ans (il est bien entendu que s'il s'agit d'une installation expérimentale, non rentable, la question se présente tout différemment). L'amortissement peut ainsi se révéler très lourd (3 % en vingt-cinq ans). Il y aura lieu d'en tenir compte dans l'estimation des frais de renouvellement, une grande part de l'installation n'ayant pas à être remplacée dans un délai si court.

Les charges financières peuvent donc s'élever de 6 à 8 %, selon les conditions du marché de l'argent et la durée d'amortissement prévue.

b) *Frais d'entretien et de renouvellement*

Ceux-ci se calculent, comme usuellement, en pourcentage du coût de chaque partie de l'installation, selon sa fragilité, son usure, ses possibilités de réparation. Certains renouvellements initiaux peuvent être inclus dans les frais de mise au point, c'est-à-dire inclus dans le coût des travaux.

Comme indiqué, il faut tenir compte de la durée d'amortissement : il serait absurde d'en arriver au bout de vingt-cinq ans à disposer d'une installation entièrement renouvelée et d'un capital totalement amorti !

On peut ainsi estimer les frais annuels de renouvellement et d'entretien à 5 % du coût de l'installation pour une longue durée d'amortissement (soixante à cent ans), ou de 3 % à 4 % pour une durée courte (vingt-cinq à trente ans). Par rapport au capital investi total, il s'agit donc, dans ce dernier cas, d'une charge d'environ 2 % à 3 %.

c) *Frais généraux de toute nature*

Ces frais comprennent les dépenses d'administration générale et celles dues au personnel de la centrale ; il s'y ajoute les charges fiscales et d'assurance. Nous noterons qu'à puissance égale, le personnel d'une centrale nucléaire est plus important que celui d'une centrale hydroélectrique : un certain nombre de personnes doivent être affectées au service de sécurité ; en outre, un contrôle plus étroit des opérations est nécessaire.

Mais l'élément particulier et important est celui des primes d'assurances. On manque, pour l'instant, complètement d'expérience à ce sujet, la loi des grands nombres ne jouant pas encore et beaucoup d'installations étant militaires ou propriété des Etats. Il apparaît cependant qu'aux yeux des assureurs, et malgré le comportement très satisfaisant des centrales existantes, le risque demeure important. Les primes annuelles sont par conséquent très élevées, spécialement pour les petites centrales, et peuvent atteindre 1 % du coût des travaux.

Les frais généraux de toute nature s'élèvent donc approximativement de 3 à 4 % pour une grande centrale, 4 à 5 % pour une petite installation.

Le total des frais annuels proportionnels au capital investi atteint donc 12 à 16 %.

d) *Combustible consommé*

La première charge de combustible est généralement incluse dans le coût de construction. Si l'on crée par ailleurs un fonds de renouvellement du combustible, on disposera, à échéance de la durée d'amortissement, d'une charge complète neuve, ou de sa contre-valeur financière. La méthode qui consiste à majorer les dépenses annuelles de la valeur du combustible consommé est donc un peu trop sévère. On peut compenser ce fait en ne prévoyant pas d'amortissement de cette première charge de combustible [1].

D'autre part, pour des raisons techniques, les éléments de combustible ne peuvent être maintenus dans le réacteur que pendant une durée limitée (généralement de l'ordre de six à dix-huit mois). L'énergie que le combustible peut libérer avant son remplacement se calcule en MWj (1 MWj = 24 000 kWh thermiques). Une limite supérieure de cette énergie devrait correspondre à la fission complète de l'U 235 contenu, soit 0,956 MWj/g U 235 ≅ 1 MWj/g U 235. Ainsi, 1 t d'uranium naturel permettrait la libération de 7000 MWj. Cette limite théorique devrait être réduite de la part d'U 235 transmuté en U 236 (sans fission), mais elle doit d'autre part être majorée de l'énergie provenant de la fission du plutonium produit dans le réacteur à partir de l'U 238. En réalité, et par suite des limitations techniques (perte de réactivité, empoisonnement, modifications technologiques), on n'espère pas tirer plus de 2500 à 3500 MWj par tonne d'uranium naturel, ce qui ne constitue donc qu'un épuisement partiel du combustible ; ces chiffres n'ont pas encore été atteints dans une exploitation normale, les réacteurs existants étant plutôt utilisés à la production de plutonium, ce qui conduit à interrompre l'irradiation à quelques centaines de MWj/t. Cette énergie est notablement plus élevée pour de l'uranium enrichi, la proportion d'U 235 y étant plus élevée.

[1] Ou, selon une méthode utilisée aux U.S.A., en n'achetant pas la première charge (qui disparaît ainsi du coût des travaux), mais en la louant à l'Etat ; il est clair que, financièrement, les deux procédés reviennent au même.

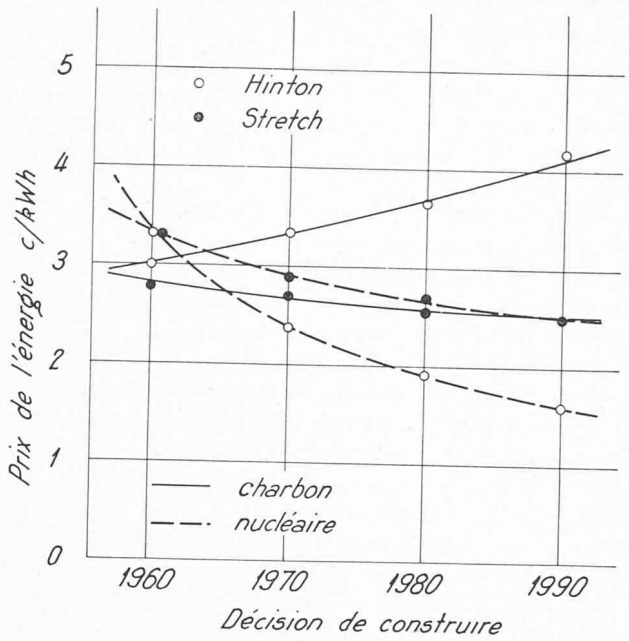

Fig. 1. — Estimations anglaises du coût du kWh.

Un calcul simplifié consiste donc à admettre que, une fois ce taux d'épuisement atteint, le combustible est retiré et que sa valeur marchande restante compensera les frais de stockage et traitement.

Un calcul plus détaillé peut être conduit en tenant compte de la valeur de l'uranium non utilisé, de celle du plutonium et des produits de fission que l'on peut extraire : il faut en déduire les frais du cycle de traitement. On peut même envisager le réenrichissement du combustible traité, de manière à pouvoir l'utiliser à nouveau plusieurs fois. Ces calculs, assez compliqués, exigent de nombreuses hypothèses sur le taux d'épuisement qui sera atteint, sur la production de plutonium, sur la valeur marchande des produits restants et sur le coût des traitements. Il faut donc les apprécier avec prudence. Ils conduisent d'ailleurs à une amélioration sensible de la rentabilité, mais postulent que le marché des combustibles restera ce qu'il est, en particulier pour le plutonium ; il est bien certain que ce ne sera pas le cas et que les prix baisseront tant pour le combustible de base que pour les traitements. Il nous paraît donc sage de s'abstenir de prévisions à trop longue échéance.

Cette consommation du combustible est proportionnelle à l'énergie produite par la centrale ; la charge annuelle correspondante ne peut donc être calculée qu'en fixant la durée d'utilisation. On peut aussi évaluer le coût du combustible par kWh d'électricité fournie.

En prenant le cas simple de l'uranium naturel, et en partant des prix déjà mentionnés (170 fr./kg U contenu dans UF_6, 100 fr./kg U pour traitement, façonnage et gainage), on trouve un coût du combustible inférieur à 300 fr./kg [1]. Le taux d'épuisement étant fixé à la valeur moyenne de 3000 MWj/t, et le rendement thermique étant estimé à 25 % (valeur plutôt modeste), on trouve un coût du combustible de 1,7 c./kWh. Plus généralement, et pour d'autres types de réacteurs, on trouve des prix échelonnés entre 1 et 2 c./kWh (cas des centrales expérimentales excepté).

[1] Ce prix tombera vraisemblablement à environ 200 fr. au cours des prochaines années.

IV. Prix de l'énergie

Les charges annuelles étant définies, le prix du kWh dépend, au premier chef, de l'énergie qui peut être produite, elle-même proportionnelle au nombre d'heures d'utilisation (facteur de charge).

On admet volontiers que les centrales nucléaires fonctionneront en centrales de base ; on peut alors fixer le facteur de charge à 80 %, soit 7000 heures d'utilisation annuelle à pleine puissance. Cependant, rien n'empêche d'utiliser une telle centrale selon un programme, ce qui améliore sensiblement la valeur marchande de l'énergie produite ; il ne sert évidemment à rien de produire de l'énergie de déchet qui devrait être vendue à un prix inférieur au coût du seul combustible : ce serait travailler à perte. A cet égard, il peut être utile de préciser, contrairement à une opinion qui paraît assez répandue, que les centrales nucléaires sont susceptibles d'une adaptation assez rapide de la puissance fournie à celle demandée. C'est plutôt la partie thermique de l'installation qui limite la liberté d'exploitation.

Il faut aussi rappeler que le facteur de charge moyen des centrales électriques existant actuellement est relativement faible : inférieur à 50 % en Suisse, plus faible encore dans d'autres pays.

Soulignons enfin que la consommation propre de la centrale peut être importante, particulièrement s'il s'agit de réacteurs refroidis à gaz. Les auxiliaires peuvent absorber ainsi jusqu'à 20 % de la puissance (Marcoule, Calder Hall).

De très nombreux exemples de calculs de prix du kWh pourraient être établis, ou extraits de la littérature.

Nous nous bornerons à citer ceux qui, à divers égards, nous ont paru intéressants. Tout d'abord, les études faites en Angleterre par Hinton et par Stretch : ces auteurs divergent notablement quant au coût du combustible, tant conventionnel que nucléaire, mais ils admettent les mêmes charges financières et d'exploitation. Alors que Hinton estime que le prix du charbon va croître de 2,2 à 3,6 c./kWh au cours des trente prochaines années, Stretch admet qu'il décroîtra de

Puissance électrique nette : 300 MW
Facteur de charge : 80 %

Centrale		Nucléaire	Charbon
Température vapeur . .	°C	230	540
Pression vapeur	atm	86	300
Rendement thermique .	%	24	35
Puissance thermique . .	MW	1250	860
Investissement (fr./kW) :			
Centrale		840	610
Etudes, terrain.		70	50
Mise en service		60	40
Première charge combustible		70	—
Total		1040	800
Prix de l'énergie (c./kWh) :			
Charges fixes		2,0	1,3
Frais d'exploitation		0,3	0,2
Combustible		0,6	1,5
Total		2,9	3,0

Fig. 2. — Comparaison de centrales nucléaire et à charbon.

2,0 à 1,9 c./kWh. Inversement, Hinton pense que le coût du combustible nucléaire tombera de 1,2 à 0,3 c./kWh, tandis que Stretch l'admet fixe, à 1,2 c./kWh. L'un des points de vue peut paraître très optimiste pour l'avenir de l'énergie nucléaire, tandis que l'autre nous semble trop pessimiste. Leur comparaison est instructive ; elle fait l'objet de la figure 1. On peut en tirer la constatation que tous deux admettent un prix actuel du kWh nucléaire de l'ordre, toutes charges comprises, de 3,5 c./kWh, tandis que le prix du kWh tiré du charbon serait voisin de 3 c./kWh. Ce dernier prix est basé sur une part du combustible seul de 2 à 2,2 c./kWh, alors que le coût du charbon en Suisse est aujourd'hui de plus de 3 c./kWh. Il en résulte cette conclusion intéressante que, dans notre pays, l'énergie nucléaire paraît être, dès aujourd'hui, compétitive avec l'énergie tirée du charbon, cela pour de grandes centrales bien entendu.

Il est également intéressant de citer ici le résultat d'une étude plus ancienne de la société américaine Edison, comparant les chiffres correspondant à deux grandes centrales de même puissance, l'une nucléaire et l'autre thermique, telles qu'on peut prévoir de les construire dans les meilleures conditions. Cette comparaison fait l'objet de la figure 2.

Quoiqu'il s'agisse d'une puissance élevée, le prix du kWh paraît optimiste, ce qui provient d'estimations basses, aussi bien des investissements que des charges.

On peut cependant remarquer la faible part prise par le combustible dans le prix du kWh ce qui permet de supporter une charge de capital plus élevée que pour une centrale thermique classique.

Une troisième indication utile peut être tirée de l'exploitation, dès 1956, du réacteur EBWR d'Argonne. Comme le montre la figure 3, le coût de l'énergie produite par cette installation expérimentale est de 20 c./kWh environ. Depuis lors, la puissance de ce réacteur a été triplée. En majorant le coût des travaux du prix supplémentaire qui en résulte pour l'équipement de transformation d'énergie, le prix du kWh est abaissé à 16 c. Mais une réduction bien plus importante résulterait de la construction aujourd'hui d'une centrale comprenant quatre réacteurs EBWR identiques ; non seulement le coût des travaux ne serait pas quadruplé, mais la fabrication du combustible en plus grande série, selon un procédé déjà connu, permettrait un abaissement substantiel de ce poste. On arrive ainsi, avec une installation de puissance moyenne et sur la base d'une construction effective, à un coût de 7 c./kWh.

Puissance thermique :			
Construction 1956 MW	20		
actuellement 1959 MW		60	
4 unités 1959 MW . .			240
Coût de l'énergie (c./kWh) :			
Charge financière . .	9,5	5,6	3,9
Exploitation	1,7	1,3	0,7
amortiss. combustible	2,2	1,7	1,1
combustible consommé	7,3	7,3	1,1
Total	20,7	15,9	6,8
Degré d'épuisement MWj/t	2000		10 000

Fig. 3. — Coût du kWh à EBWR.

Puissance électrique	150 MW
Investissement . . . . . (sans combustible)	190 à 260 millions de fr. s.
Soit	1300 à 1700 fr./kW
Facteur de charge	80 % à 70 %
Coût du kWh électrique :	
Charges fixes	2,8 à 4,3 c./kWh
Combustible consommé .	1,3 à 2,1 c./kWh
Amortissement première charge combustible . .	0,2 à 0,4 c./kWh
Exploitation	0,4 à 0,9 c./kWh
Coût total.	4,7 à 7,7 c./kWh

Fig. 4. — Exemple d'estimation du coût de l'énergie.

Nous citerons maintenant le résultat d'une étude américaine [1], approfondie et réaliste, datant d'il y a quelques mois, et basée sur les expériences de construction et d'exploitation aux U.S.A., particulièrement avec la centrale de Shippingport (60 MWe, en service depuis décembre 1957).

Le cas envisagé est celui d'une centrale d'une puissance électrique nette de 150 MW, munie d'un réacteur à eau sous pression ou à eau bouillante, tel qu'on peut le construire aujourd'hui. Le calcul est fondé sur des charges annuelles (combustible non compris) de 15,5 %, donc plutôt élevées, ce qui s'explique, en particulier, par les conditions du marché de l'argent. On ne doit pas non plus oublier que le coût de la main-d'œuvre et les salaires des spécialistes sont sensiblement plus élevés aux U.S.A. La figure 4 donne les résultats de cette étude.

Nous mentionnerons enfin les chiffres donnés par Wootton, directeur de Babcock & Wilcox, dans une récente communication relative aux grandes centrales actuellement en construction en Grande-Bretagne. Ces renseignements sont groupés au tableau 5 qui fait ressortir des prix du kWh compris entre 3 et 4 c. ; ces prix sont basés cependant sur un facteur de charge de 80 %.

Nous pouvons donc faire une moyenne assez prudente en admettant, pour des centrales importantes construites en Europe par des groupements disposant déjà d'expérience, un coût de l'électricité compris entre *4 et 6 c. le kWh.*

[1] TID-8506. A.E.C.

Nom	Hunterston Bradwell	Hinkley Point Trawsfynydd	Dungeness Sizewell
Puissance électrique nette par centrale .	300 MW	500 MW	600 MW
Coût de la centrale.	1500 fr./kW	1300 fr./kW	1200 fr./kW
Coût de l'énergie			
Capital	2,5 c./kWh	2,0 c./kWh	1,8 c./kWh
Combustible . . .	0,9 c./kWh	1,0 c./kWh	0,9 c./kWh
Exploitation . . .	0,3 c./kWh	0,3 c./kWh	0,3 c./kWh
Total . . .	3,7 c./kWh	3,3 c./kWh	3,0 c./kWh

Fig. 5. — Centrales anglaises en construction.
Coût de l'énergie.

V. Tendance et conclusions

Pour de l'énergie de base, et par rapport aux prix du kWh obtenus en Suisse avec des centrales au fil de l'eau, ce coût de 4 à 6 c./kWh est encore élevé. Mais il est déjà du même ordre de grandeur que celui résultant de l'exploitation de centrales thermiques, ce qui justifie le point de vue des Britanniques lorsqu'ils prétendent que les centrales qui entreront en service dans leur pays dans une dizaine d'années produiront un courant meilleur marché que celui produit à partir du charbon dans les meilleures conditions.

Certaines tendances de l'évolution du coût de l'énergie peuvent être dégagées. Quiconque a eu l'occasion de se pencher d'un peu près sur un projet de centrale nucléaire est frappé par les considérables possibilités de simplification et d'économie qui subsistent et dont quelques années d'exploitation et d'expérience permettront de bénéficier. Les études sont actuellement encore fort coûteuses, nous l'avons déjà noté, parce que des solutions nouvelles doivent être apportées à de nombreux problèmes et par souci d'une grande sécurité nucléaire. Les dispositions constructives imposées par cette préoccupation de sécurité sont innombrables et pourront certainement être beaucoup simplifiées dans l'avenir. Le coût de la fabrication des éléments de combustible est extraordinairement élevé, parce qu'il s'agit d'une technique délicate et complètement neuve. Les limites d'exploitation ne sont pas connues et les performances des réacteurs sont déterminées de manière très prudente. Nous rappellerons, à cet égard, le cas frappant du réacteur à eau bouillante d'Argonne (EBWR), construit pour une puissance thermique de 20 MW en 1955, dont on a depuis porté la puissance à 60 MW et que l'on compte pousser prochainement à 100 MW. Une puissance spécifique élevée réduit d'autant la part des charges fixées dans le prix du kWh.

Si l'on peut envisager que les progrès de la technique permettent d'abaisser encore un peu le prix du kWh d'origine thermique, là où les conditions d'approvisionnement et de construction sont favorables, il apparaît, par contre, que le coût de l'énergie hydroélectrique évolue en sens inverse, en Suisse et dans les pays européens.

L'énergie nucléaire, comme toute technique nouvelle, verra ses prix de revient baisser rapidement au cours des années à venir. C'est pourquoi notre programme doit être pensé, non en fonction de la situation présente, mais de celle que l'on estime probable dans une dizaine d'années.

Lausanne, le 18 mars 1960.

621.317.083.7

SUR LE CALCUL DE RÉSEAUX ÉLECTROTÉLÉMÉTRIQUES

par A. ANSERMET, ingénieur-professeur

Au cours de ces dernières années, le *Bulletin technique* a déjà consacré quelques lignes aux méthodes modernes de mesures linéaires, qu'il s'agisse d'appareils électro-optiques (géodimètres, etc.) ou électroniques purs (telluromètres, équipements Hiran, etc.). En Suisse, on commence à se rendre compte de l'importance que peuvent revêtir ces nouveaux moyens et on a, à cet effet, mesuré avec la collaboration des Etats voisins (Autriche et Allemagne occidentale) un réseau spécial de haute précision. Ce réseau est destiné surtout à procéder à des étalonnages qui doivent être nombreux et très variés si l'on veut que les radiotélémètres donnent leur plein rendement. Le côté principal est Säntis-Pfänder, déterminé à partir de la base d'Heerbrugg située sur la rive gauche du Rhin (longueur 7,2 km). La précision linéaire réalisée est $\pm$ 1 : 1 000 000 environ, ce qui est remarquable ; mais ce n'est pas trop, eu égard aux résultats déjà obtenus en électrotélémétrie. La base fut mesurée à l'aide de fils d'invar, étalonnés eux-mêmes, tour à tour, en laboratoire et hors laboratoire par comparaison avec la base standard de Munich, cette dernière étant vérifiée par le procédé de Väisälä (interférences).

On conçoit sans peine que, pour réaliser de telles précisions, une foule de problèmes assez complexes sont à résoudre ; ils portent sur le rôle des conditions atmosphériques, l'influence de la proximité, parfois très variable, du sol par rapport aux trajectoires sur lesquelles les ondes se propagent, la courbure de ces trajectoires, etc. Mais surtout la propagation des erreurs pose des problèmes ardus ; pour chaque appareil il faut compter avec une erreur de caractère interne, indépendante de la distance mesurée. Cet élément est d'une détermination malaisée même si l'on procède à des étalonnages nombreux et judicieux. Un réseau radio télémétré libre peut donner lieu à des résultats favorables quant à la compensation ; malgré cela, des erreurs subsistent qu'il n'a pas été possible de déceler (erreurs d'échelle surtout).

De plus, à la base de toute compensation, en topographie ou géodésie, on admet l'hypothèse que les quantités mesurées sont indépendantes mutuellement; si ce n'est pas le cas, il y a de la covariance, dont l'importance n'est pas facile à exprimer en chiffres mais dont il faut aussi tenir compte. En radiotélémétrie, on ne peut pas exclure une telle éventualité. Certains praticiens suggèrent de soumettre à une précompensation les éléments mesurés puis, ensuite, d'effectuer la compensation définitive. Le problème est complexe ; il fait l'objet de controverses et le but de ces lignes est de formuler quelques suggestions en traitant des exemples de caractère élémentaire.

Avant de poursuivre, il convient de rappeler dans leurs grandes lignes les principes de l'électrotélémétrie ; il s'agit de convertir en mesures linéaires des mesures de temps. C'est dans la haute précision à atteindre que réside surtout la difficulté.

Dans le géodimètre un faisceau lumineux, dont l'intensité est modulée, est émis à partir d'une extrémité A de la base D à mesurer ; à l'autre extrémité B, il est