Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 38 (1947)
Heft: 21

Artikel: Energie atomique et économie électrique
Autor: Winiger, A.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1056765

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: 23.08.2025

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

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

BULLETIN

RÉDACTION:
Secrétariat de l'Association Suisse des Electriciens
Zurich 8, Seefeldstrasse 301

ADMINISTRATION:
Zurich, Stauffacherquai 36 ♦ Téléphone 23 77 44
Chèques postaux VIII 8481

Reproduction interdite sans l'assentiment de la rédaction et sans indication des sources

38e Année | N° 21 | Samedi, 18 octobre 1947

Energie atomique et économie électrique

Conférence donnée à l'Assemblée générale de l'Association Suisse des Electriciens du 6 septembre 1947, à Interlaken,

par M. *A. Winiger*, Zurich

621.499.4

Les données à disposition actuellement concernant l'utilisation de l'énergie atomique sont peu probantes. Les processus physiques fondamentaux pour produire de la chaleur au moyen de minerais d'uranium et de thorium sont seuls connus actuellement. Les possibilités de désintégration avec ce matériau de base sont esquissés dans l'article suivant. L'auteur indique la nature des installations «primaire» et «secondaire» et décrit brièvement les quelques éléments de construction connus. Les données permettant d'apprécier la rentabilité sont également incomplètes. Il semble toutefois que les frais résultant des «combustibles» pour un kilowattheure d'énergie électrique produite par des usines atomiques s'élèvera à environ 0,6 cts pour les installations primaires et de 6 cts pour les installations secondaires, par rapport aux centrales ordinaires. Les frais d'investissement sont plus élevés pour les centrales atomiques que pour les autres centrales thermiques. Les frais résultant des combustibles représentent, pour les réseaux de distribution d'électricité américains, environ le 20 % du prix de vente moyen de l'énergie. Une diminution des frais résultant des combustibles ne peut que porter sur ce pourcentage du prix de l'énergie. Ces conditions sont en prinzipe également valables pour la Suisse.

L'utilisation en Suisse de l'énergie atomique pour la production d'énergie est parfaitement dans le domaine des possibilités pour un avenir assez lointain. Il serait toutefois fantaisiste de croire à une révolution dans le domaine de la production d'énergie. Les considérations fortement étayées de l'auteur lui permettent d'affirmer que la formule suivante ne pourra jamais s'appliquer à la Suisse: énergie hydraulique ou atomique, mais tout au plus: énergie hydraulique et atomique.

Die Quellen, die über die Frage der Nutzbarmachung der Atomenergie z. Z. zur Verfügung stehen, sind wenig aufschlussreich. Bekannt sind die grundsätzlichen physikalischen Verfahren, um aus Uran- und Thoriumerzen Wärme zu gewinnen. Die mit diesem Ausgangsmaterial möglichen Kernprozesse werden im folgenden skizziert. Das Wesen der «Primäranlage» und der «Sekundäranlage» wird erläutert, und es werden die wenigen bekannt gewordenen konstruktiven Elemente kurz beschrieben. Auch die Unterlagen zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit sind unvollständig. Immerhin scheint es, dass die «Brennstoffkosten» für die Kilowattstunde erzeugter elektrischer Energie aus Atomkraftwerken zur Zeit in der Grössenordnung von 0,6 Rp. für Primäranlagen und 6 Rp. für Sekundäranlagen liegen. Dabei ist die Atomanlage gegenüber thermischen Werken mit höheren Investitionskosten belastet. Bei amerikanischen Elektrizitätsversorgungsnetzen betragen die Brennstoffkosten rund 20 % des mittleren Verkaufspreises der Energie. Eine Verringerung der Brennstoffkosten beim Atomkraftwerk kann sich deshalb nur auf diesem Anteil des Energiepreises auswirken. Für die Schweiz dürften die Verhältnisse grundsätzlich die gleichen sein.

Der Einsatz von Atomenergie in der schweizerischen Energieversorgung liegt also in einer späteren Zukunft durchaus im Bereich der Möglichkeit. Eine Revolution auf dem Energiemarkt gehört jedoch ins Reich der Fabel. Die eingehenden Ueberlegungen führen den Referenten zur These, dass die Formel für die Schweiz niemals lauten kann: hydraulische oder Atomenergie, sondern höchstens: hydraulische und Atomenergie.

(Traduction)

Avant d'entrer dans le vif de mon sujet, j'aimerais vous indiquer brièvement comment l'objet de mon exposé s'est trouvé délimité. N'étant pas physicien et manquant d'expérience propre et de contacts personnels avec cette nouvelle technique, ce n'est pas sans une certaine appréhension que j'ai accepté la tâche de vous présenter les divers aspects de la production d'énergie nucléaire, bien que cette nouvelle source d'énergie ait déjà largement dépassé le stade des laboratoires de physique et de chimie pour pénétrer dans le champ d'action de l'ingénieur. Un très grand nombre de publications, de valeur très diverse, ont déjà traité ce sujet; toutes se basent plus ou moins sur les mêmes sources américaines [1]). D'une façon générale, elles évitent soigneusement tout ce qui a trait aux «tours de métier». En ce qui concerne notamment les aspects techniques et économiques de la production d'énergie sur une grande échelle, on ne trouve que peu d'indications positives et dignes de confiance, ce qui se conçoit aisément puisque ce domaine est en pleine évolution. Il est donc tout au plus possible, en se basant sur certains faits déjà passés dans le domaine public et sur des données résultant de l'emploi militaire de la transmutation atomique, d'esquisser l'évolution probable qui déterminera la place que prendra cette nouvelle source d'énergie dans l'économie énergétique en général. Pour des raisons bien compréhensibles, j'ai dû me borner aux processus nucléaires qui à l'heure actuelle paraissent entrer principalement en ligne de compte pour des applications pratiques, c'est-à-dire

[1]) Voir la bibliographie qui figure à la fin du texte.

ceux qui utilisent des minerais d'uranium et de thorium.

Je ne voudrais pas manquer d'exprimer ici mes vifs remerciements à M. le Professeur Tank, qui m'a aidé à obtenir la documentation nécessaire et dont les conseils m'ont été précieux pour la préparation de cette conférence.

I

Le Professeur *Durrer* estime que l'énergie produite annuellement sur notre planète et consommée par ses habitants équivaut à environ 2,5 milliards de tonnes de houille de bonne qualité [2]). Le 72 % de cette consommation totale est fourni par les différentes espèces de *charbon*, le *24 %* par le *pétrole*, le gaz naturel et l'huile de schiste, et le *4 %* seulement par *l'énergie hydroélectrique*. Les deux tiers environ du charbon extrait des mines sont brûlés sans subir de raffinage et ne sont donc pas traités chimiquement. Si la consommation se poursuivait au rythme actuel, nos réserves de charbon et surtout

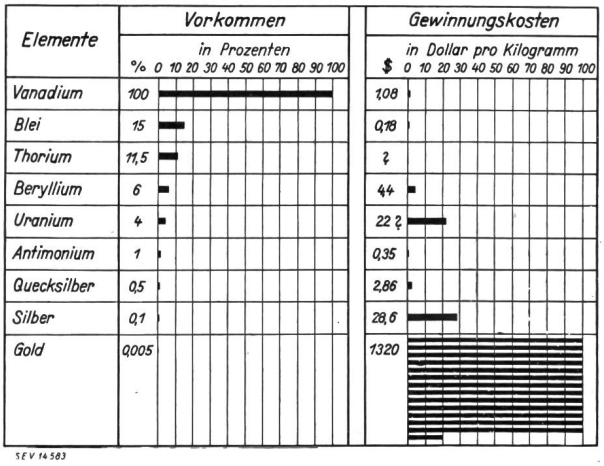

Fig. 1
Réserves d'uranium et de thorium par rapport à d'autres métaux (vanadium = 100)

de carburants seraient ainsi épuisées dans quelques centaines d'années. Cette situation extrêmement sérieuse exige que l'on prenne dès maintenant certaines mesures qui doivent tendre:

à pousser activement l'aménagement des forces hydrauliques, dont la «matière première» se renouvelle constamment,

à utiliser l'énergie nucléaire pour la production de chaleur, de travail mécanique et d'énergie électrique, afin de pouvoir réserver le charbon, le pétrole et le gaz naturel à la chimie organique.

L'expérience sensationnelle du 16 juillet 1945 dans le désert d'Alamogordo prouva que la collaboration des meilleurs physiciens, chimistes et ingénieurs avait permis de mettre au service de l'humanité des énergies qui sommeillent dans les noyaux des atomes et d'ouvrir ainsi un nouveau chapitre de l'économie énergétique.

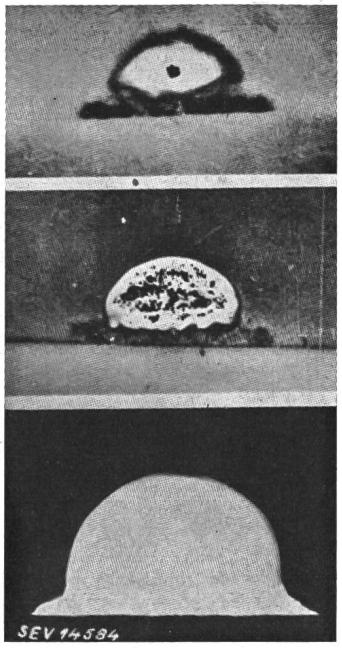

Fig. 2
Essai d'une bombe atomique à New Mexico, le 16. 7. 1945 photographié d'une distance d'environ 10 km

En haut:
Début de l'explosion. — Ce petit nuage s'éleva par la suite à une altitude de 12 km environ

Au centre:
Nuage multicolore d'explosion. Les taches noires ont une intensité lumineuse supérieure à celle du soleil.

En bas:
Forme ultérieure du nuage d'explosion.

II

Une pierre angulaire de la théorie de la relativité établie au début de ce siècle par Einstein, dont l'importance est aussi considérable que l'originalité, est la loi de l'équivalence entre la masse et l'énergie. La masse au repos représente en effet la forme la plus concentrée de l'énergie. Le facteur par lequel chaque diminution de masse doit être multipliée pour obtenir l'énergie correspondante, atteint la valeur extraordinairement élevée du carré de la vitesse de la lumière ($W = m\,c^2$). La transformation complète d'un gramme de matière fournirait en conséquence, pour autant qu'elle fût possible, une quantité d'énergie d'environ *25 millions de kWh*, soit l'équivalent de la chaleur de combustion de *3000 t de charbon*. En théorie, la production annuelle d'énergie électrique en Suisse, de *10 milliards de kWh*, ne correspondrait qu'à une perte de masse de *400 g* seulement. Pour obtenir des modifications de masse mesurables, il faut mettre en jeu des quantités d'énergie extrêmement grandes. Ce n'est que grâce à l'étude des particules de masse les plus petites, résultant des recherches de la physique nucléaire moderne, que l'on a pu prouver expérimentalement les relations établies par *Einstein*.

Notre conception de la structure de la matière a subi une modification complète durant les 50 dernières années. Avant la découverte de la radioactivité par *Becquerel* et *Curie*, vers 1900, l'atome était considéré comme la plus petite particule indivisible de la masse. De nos jours, on sait que l'atome lui-même est d'une structure compliquée. Il est constitué par un noyau, qui concentre pratiquement toute la masse de l'atome et porte une charge positive, en-

[2]) *Durrer, Robert:* Betrachtungen über die Weltenergieerzeugung. Zürich, 1946. (Rapport paru dans le Bull. ASE t. 37(1946), N° 11, p. 310...312).

touré d'électrons chargés négativement. Le nombre des électrons correspond au nombre atomique, c'est-à-dire au numéro d'ordre dans le système périodique des éléments. Il est par exemple de 92 pour l'uranium, l'élément qui nous intéresse le plus. Tandis que la couche périphérique présente un diamètre d'environ 10^{-8} cm, le noyau est encore bien plus petit (10^{-13} cm). Il se compose de son côté de particules minuscules, à savoir de protons positifs en même nombre que les électrons, et de neutrons, particules électriquement neutres. La somme des protons et des neutrons équivaut au poids atomique de l'élément. Dans l'uranium 238, dont il sera encore question par la suite, le noyau atomique comporte 92 protons et 146 neutrons. Si le nombre des neutrons se modifie, tandis que celui des protons demeure inchangé, on a affaire à un *isotope*, qui se distingue de l'élément fondamental par un poids atomique différent, alors que le nombre atomique reste le même. C'est ainsi que l'uranium naturel renferme environ 0,7 % d'un isotope de poids atomique 235, dont le noyau ne possède par conséquent que 143 neutrons au lieu de 146. Les isotopes d'un élément ne peuvent pas être séparés chimiquement, car leurs propriétés chimiques ne dépendent que de la couche périphérique constituée par les cortèges électroniques.

Quatre résultats de recherches ont une importance primordiale pour le développement futur de la pile à uranium. En 1931, les physiciens *Cockcroft* et *Walton*, du laboratoire de Cavendish, à Cambridge, réalisèrent pour la première fois la fission d'un noyau atomique par bombardement de lithium avec des protons accélérés artificiellement. En 1932, *Chadwick* découvrit le neutron comme projectile nouveau et actif pour la transmutation des atomes. Le neutron possède à peu près la même masse que le proton, mais il est extrêmement pénétrant, car il est dépourvu de charge électrique et n'est de ce fait pas dévié par les champs nucléaires des atomes. En 1939, *Hahn* et *Stassmann* constatèrent qu'en bombardant des atomes d'uranium avec des neutrons, il se produit une fission du noyau avec fort dégagement d'énergie. Peu de temps après, on se rendit compte que ce processus libère également de nouveaux neutrons, capables d'engendrer de nouvelles réactions nucléaires. Enfin, en 1942, le physicien italien *Fermi* prouva qu'il était possible d'obtenir une *réaction en chaîne*, capable de poursuivre automatiquement le processus de fission amorcé — condition indispensable pour l'utilisation technique du procédé. Déjà auparavant, *Fermi* avait pu constater l'efficacité des *neutrons lents* dans un grand nombre de processus nucléaires.

L'uranium pur de nombre atomique 92 comprend 99,3 % d'isotope 238 et 0,7 % d'isotope 235. Ce sont surtout les noyaux de l'isotope 235 qui sont rendus instables par l'entrée de neutrons et se décomposent en éléments de nombre atomique inférieur, dont la masse totale est plus faible que celle du noyau atomique primitif. Cette perte de masse équivaut à l'énergie libérée sous forme de chaleur et de rayonnement lors du processus. Cette fission donne en outre lieu à l'émission de deux à trois nouveaux neutrons qui peuvent servir à la fission d'autres noyaux. Une telle réaction nucléaire ne peut toutefois se produire que si la vitesse des neutrons est inférieure à une certaine limite, c'est-à-dire lorsqu'il s'agit de neutrons lents. Il fallait donc trouver le moyen de freiner suffisamment les neutrons rapides qui se produisent lors de la fission du noyau, de telle sorte que la réaction puisse se poursuivre. Cela nécessitait l'emploi d'un moyen de freinage approprié et une certaine dimension minimum du bloc de réaction.

Pour la production d'énergie thermique, seules entrent en ligne de compte les matières avec lesquelles il est possible de maintenir automatiquement une réaction en chaîne, d'une manière analogue à ce

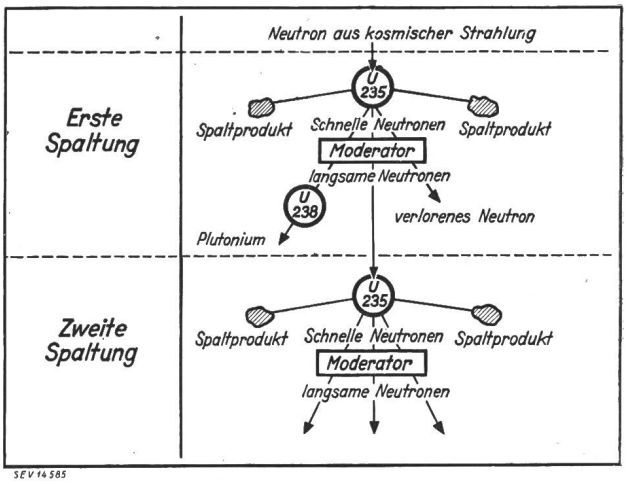

Fig. 3
Représentation du principe de la fission d'un noyau d'atome
(tirée du rapport de Smyth)

qui se passe lorsqu'un processus de combustion a été amorcé. Pour le moment, la nature ne nous livre qu'un seul élément capable d'être utilisé directement dans une pile atomique, à savoir l'isotope 235 de l'uranium, dont la séparation d'avec l'isotope 238 est toutefois extrêmement malaisée et coûteuse. Les recherches concernant la fabrication d'armes atomiques ont cependant permis de découvrir d'autres matières artificielles utilisables dans les piles atomiques. Selon un rapport publié par la Commission de l'énergie atomique des Nations Unies, il est très probable que seuls les éléments ci-après entreront ces prochaines années en ligne de compte pour les piles atomiques:

l'isotope U 235 de l'uranium,
le plutonium Pu 239 transuranien,
l'isotope U 233 de l'uranium.

L'isotope U 233, qui peut être produit par transmutation nucléaire du thorium, n'a pas encore été beaucoup étudié jusqu'ici, tandis que le plutonium et l'uranium 235 sont déjà produits en quantités industrielles pour les besoins militaires.

L'isotope 238, dont l'uranium naturel renferme 99 %, est inutilisable pour l'amorçage de réactions en chaîne. Par bombardement avec des neutrons à vitesse moyenne il peut être toutefois transformé successivement en plutonium artificiel de nombre atomique 94, que l'on peut alors utiliser dans les piles atomiques. La production de plutonium s'opère

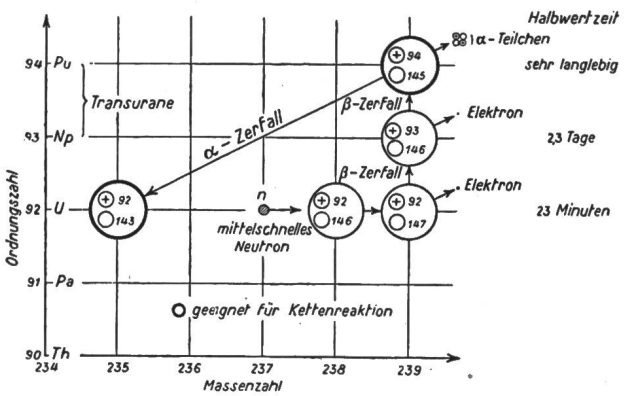

Fig. 4
Transmutation de U 238 en Pu 239
(rapport Smyth et article Dubs)

dans une *installation primaire* alimentée en uranium naturel et où, grâce à des procédés appropriés, l'isotope U 235 assure le maintien de la réaction et fournit les neutrons nécessaires à la transmutation de l'uranium 238. Comme produit accessoire, on obtient de la chaleur.

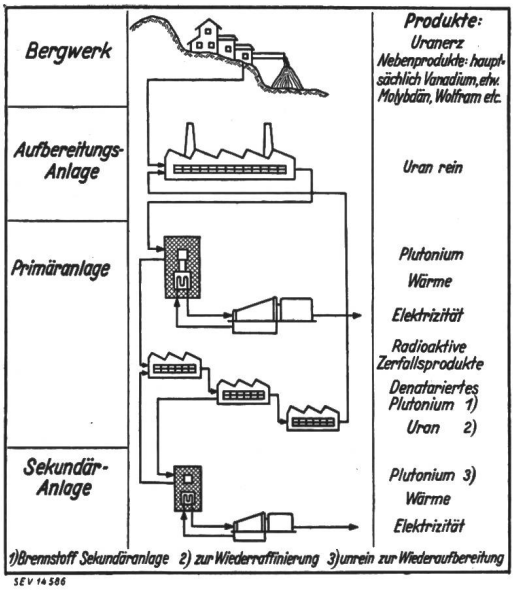

Fig. 5
Constitution schématique d'une usine nucléothermique
(installations primaire et secondaire)

Par opposition aux installations primaires, qui servent avant tout à produire les éléments capables d'engendrer des réactions en chaîne, on qualifie les usines atomiques proprement dites *d'installations secondaires*. Celles-ci doivent produire de l'énergie en partant de matières premières pures telles que le plutonium ou l'uranium 235, préalablement traitées de manière à empêcher toute utilisation illégale pour la fabrication d'armes atomiques. Une telle dénaturation peut, par exemple, consister en une adjonction d'isotopes appropriés.

III

Après ces brèves indications au sujet des processus fondamentaux de transmutation des éléments appropriés à la production d'énergie nucléaire, j'aborderai non moins brièvement la construction des piles atomiques, en me basant sur ce qui a été publié jusqu'ici. Dans un bloc de graphite, dont les dimensions ne doivent pas être inférieures à un certain minimum, des ouvertures sont aménagées pour l'introduction des barres actives et des barres de freinage. La disposition géométrique des divers éléments de la construction a une très grande importance. Le graphite sert d'une part à ralentir la vitesse des neutrons libérés par les barres d'uranium après l'amorçage de la réaction en chaîne, jusqu'à ce qu'ils atteignent une autre barre d'uranium. D'autre part, il constitue une enveloppe qui ramène vers l'intérieur de la pile les neutrons qui tendraient à en sortir, contribuant ainsi à réduire les pertes en neutrons actifs. Le graphite peut être remplacé par de l'eau lourde et du béryllium, capables eux aussi de freiner les neutrons.

Pour empêcher que la réaction en chaîne ne devienne trop violente et ne détruise l'installation, le flux de neutrons doit être freiné par l'interposition d'écrans en matière qui absorbe les neutrons, comme par exemple le cadmium ou le bore, de manière à maintenir la production d'énergie à un niveau déterminé. Le rapport entre les nouveaux neutrons actifs engendrés lors de chaque fission de noyau et le neutron produisant la fission s'appelle *facteur de multiplication K*. K—1 est donc une mesure pour la production thermique, qui doit paraît-il atteindre 0,03 dans le cas des grandes piles à plutonium fonctionnant à des températures relativement basses, de sorte que chaque nouvelle génération de neutrons ne serait que de 3 % plus grande que la précédente.

Si la construction même des piles atomiques semble simple, les problèmes relatifs à leur conduite et à leur utilisation pour la production d'énergie sont par contre fort compliqués. Ainsi, pour protéger le personnel chargé de l'exploitation contre les effets des rayonnements extrêmement intenses, tout l'appareil doit être entouré d'une cuirasse protectrice qui, dans les installations existantes, serait constituée par des murs de béton de près de 3 mètres d'épaisseur. Pour éviter les risques résultant de l'échappement de vapeurs et de gaz radioactifs aux alentours de l'usine nucléothermique, celle-ci devra de préférence être installée dans une contrée non habitée.

Pour utiliser industriellement la chaleur libérée par la pile atomique, il faut la transmettre à des agents gazeux ou liquides, qui de leur côté risquent d'être rendus radioactifs et doivent en conséquence

être protégés par des écrans. Une autre complication provient du fait que les propriétés du matériel de construction et des matières servant aux échanges de chaleur ne doivent pas être altérées par l'effet des rayonnements de neutrons et autres, ce qui pourrait donner lieu à des perturbations dans l'exploitation.

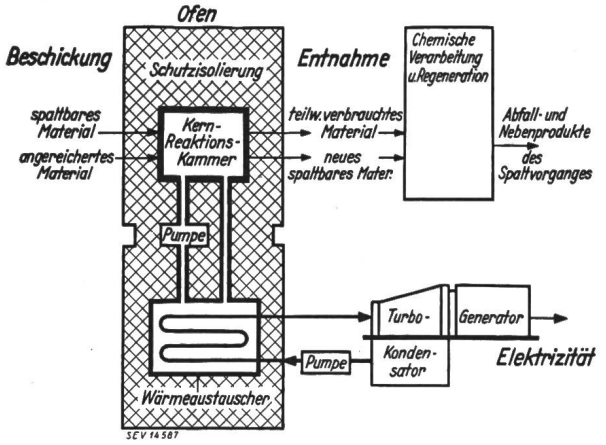

Fig. 6
Schéma d'une pile atomique

La technologie de ces matières a heureusement déjà fait des progrès. L'hélium pur, par exemple, est un excellent moyen de transport de la chaleur. Grâce à son noyau stable il ne forme, lors du contact avec la pile atomique, aucun isotope radioactif susceptible de mettre en danger le personnel.

IV

En ce qui concerne l'économie électrique, il serait intéressant de savoir si ce nouveau mode de production d'énergie est capable de concurrencer les installations hydrauliques et thermiques actuelles. Notons à ce propos qu'il ne sera probablement pas possible de produire directement de l'énergie électrique par des réactions nucléaires. L'énergie libérée dans les piles atomiques ne se présente que sous la forme de rayonnements et d'énergie cinétique de particules en mouvement, de sorte qu'elle ne peut être utilisée que sous forme de chaleur. Les usines nucléothermiques seront donc constituées d'une manière analogue aux usines thermiques ordinaires et comporteront:

une pile atomique servant à la production de l'énergie;
un échangeur thermique, qui aura également pour mission d'empêcher l'entrée de matières radioactives dans l'installation des machines;
un générateur d'énergie électrique, entraîné par turbine à vapeur ou à gaz, selon la nature des transmetteurs de la chaleur.

Par rapport à une installation thermique normale, l'usine nucléothermique exige en plus un échangeur thermique compliqué et des mesures coûteuses destinées à protéger le personnel. Ces deux conditions indispensables conduisent à une augmentation du capital à investir et à une diminution du rendement thermique. Il faut en outre tenir compte des importants services auxiliaires de chimie et de métallurgie, qui seront chargés de régénérer et de préparer les matières actives.

La question des dépenses afférentes à l'achat du combustible est de nature encore plus complexe. Il y a lieu de distinguer tout d'abord entre les installations primaires, dans lesquelles la chaleur n'est qu'un produit résiduel, et les installations secondaires qui ne servent qu'à la production d'énergie.

Lorsqu'il s'agit d'une installation primaire alimentée en uranium naturel et en supposant que celui-ci revienne à *fr. 100.— le kg*, un calcul très approximatif, basé sur un rendement thermique de 10 %, donne un prix de matière active de *0,6 cts* seulement par kilowattheure produit, auquel cas le plutonium *non isolé*, obtenu simultanément, serait produit gratuitement. On peut naturellement considérer que les frais d'exploitation ne concernent que le plutonium et admettre alors que la chaleur est un produit résiduel qui est cédé gratuitement à l'échange thermique.

Les conditions sont complètement différentes lorsqu'il s'agit d'une installation secondaire, qui n'utilise que des matières actives pures dont la fabrication est évidemment fort coûteuse et qui sert exclusivement à la production d'énergie. Si l'on admet par exemple que le plutonium revienne à fr. 150.— le gramme, comme l'indique la presse américaine, et que le rendement thermique soit de 10 %, les frais relatifs aux matières actives s'élèveraient à *6 cts/kWh*, ce qui n'est pas négligeable.

Lorsque l'on compare ces frais avec ceux des usines thermiques existantes, il faut évidemment tenir compte du fait que les matières actives utilisées dans les usines nucléothermiques ne sont pratiquement pas grevées de frais de transport, tandis que pour le charbon et le mazout ces frais sont parfois très élevés, lorsque l'usine est éloignée du lieu d'extraction du combustible.

H. A. Winne, secrétaire de la Commission pour l'énergie atomique des Etats-Unis et l'un des ingénieurs en chef de l'installation d'essai d'Oakridge, construite par l'industrie américaine sous la direction de la General Electric Co. et de la Monsanto Chemical Co., a essayé de délimiter le problème du rendement des futures usines nucléothermiques en considérant que, selon toutes prévisions, les frais de premier établissement d'une installation pour la production d'électricité à l'aide d'énergie nucléaire seront plus élevés que ceux d'une installation thermique ordinaire et que des économies ne pourront donc être réalisées qu'en réduisant les frais des matières actives. Aux Etats-Unis, les frais relatifs à l'achat du combustible atteignent à peu près le 20 % du prix moyen de l'énergie électrique facturée aux consommateurs. La production d'énergie électrique par des usines nucléothermiques ne pourra donc prendre en considération que cette part des frais.

Il est absolument impossible de se faire une idée, même très approximative, du montant des capitaux qui devront être engagés et des frais d'exploitation, avant que les nombreuses inconnues n'aient été plus ou moins déterminées. Au nombre de celles-ci il faut compter le traitement chimique et métallurgique des

matières premières et des résidus de réaction, les dispositifs de protection contre les effets néfastes des rayons radioactifs, la préparation des matières destinées à la transmission de la chaleur et à la construction des piles atomiques, et, last but not least, la régulation convenable de la réaction en chaîne. A elle seule la fabrication des matières utilisées à la confection des piles atomiques, comme par exemple le graphite, exige des dispositifs très coûteux afin d'obtenir le degré de pureté indispensable, vu que de nombreux éléments n'admettent pas d'impuretés dépassant un dixmillième de pour cent. Etant donné tous ces éléments, il va de soi que pour des motifs d'ordre économique les usines nucléothermiques devront être aussi puissantes que possible, notamment à cause des services auxiliaires indispensables.

Un autre facteur qui pourra exercer une influence non négligeable sur le prix du courant électrique tiré de l'énergie nucléaire est l'ingérence de l'Etat dans l'exploitation des piles atomiques, pour des raisons militaires. Il est intéressant de considérer les chiffres publiés par le Service d'information des Nations Unies au sujet des frais occasionnés par la mise au point de la bombe atomique: au 30 juin 1945, les dépenses s'élevaient déjà à 2 milliards de dollars en chiffre rond, soit près de 8,5 milliards de francs suisses. Or, après la cessation des hostilités, les recherches dans le domaine de la transmutation des atomes se sont naturellement poursuivies. Elles doivent certainement coûter chaque année 1,5 à 2 milliards de francs suisses aux Etats-Unis et à la Grande-Bretagne seulement. En regard de ces sommes considérables, le montant de 18 millions de francs alloué pour une durée de trois ans à la Commission Suisse de l'énergie atomique paraît bien modeste.

Ces frais de recherche sont tellement élevés qu'ils seront sans doute par la suite, au moins partiellement, mis à la charge de la production d'énergie atomique, soit sous forme de droits de concession ou de licences, soit au moyen d'un prix de base majoré pour les matières actives livrées par les usines nucléothermiques nationales. Il est fort probable que les prix de l'énergie électrique provenant de ces usines seront adaptés aux frais de production des usines thermiques existantes ou aux prix du marché, même si les frais de production des usines nucléothermiques devenaient inférieurs à ce niveau, ce qui n'est pas à prévoir pour le moment.

En résumé, les données publiées jusqu'ici laissent entrevoir que l'énergie électrique produite par de l'énergie nucléaire pourra peu à peu concurrencer les autres modes de production, mais qu'une *révolution* sur le marché de l'énergie est un mythe pour autant que l'on s'en tienne à des considérations basées sur une saine économie.

V

Quelles sont les conséquences qui résultent de ce qui précède en ce qui concerne l'économie électrique suisse? Notre pays ne possède — fort heureusement peut-être — pas de gisements d'uranium, ni de thorium, qui vaillent la peine d'être exploités. Pour obtenir les matières premières nécessaires au fonctionnement d'usines nucléothermiques, nous serions par conséquent dépendants de l'étranger, comme pour le charbon et les carburants. Cette dépendance d'autres Etats serait d'autant plus étroite que le problème de l'énergie atomique est devenu un problème de haute politique. En effet, les matières premières destinées aux piles atomiques risquent de servir à la fabrication d'engins de guerre, même en étant «dénaturées». Au cas où un Etat étranger serait prêt à nous fournir, à un prix probablement élevé, les matières destinées à alimenter une usine nucléothermique, nous devrions alors vraisemblablement nous soumettre à un contrôle international, qu'il serait sans doute difficile de concilier avec notre souveraineté.

Quelques données concernant des installations de transmutation d'atomes aménagées aux Etats-Unis

Objet	Frais, en millions de dollars	Nombre d'ouvriers occupés à la construction	Superficies
Installation pour la séparation des isotopes par diffusion gazeuse	545	25 000	4 bâtiments occupant 232 000 m² sur un terrain de 800 × 400 m
Installation pour la séparation des isotopes par triage électromagnétique	350	13 200	175 bâtiments, dont 9 pour le processus principal
Installation pour la séparation des isotopes par diffusion thermique	10,5	—	Bâtiment principal 158 × 25 × 22,5 m
Pile d'essai de Clinton	12	3 247	Puissance 1000 kW
Hanford	350	45 000	3 grandes piles et installations de séparation chimique. 600 000 m³ de béton, L'installation complète couvre 1540 km²
Los Alamos	60	—	—

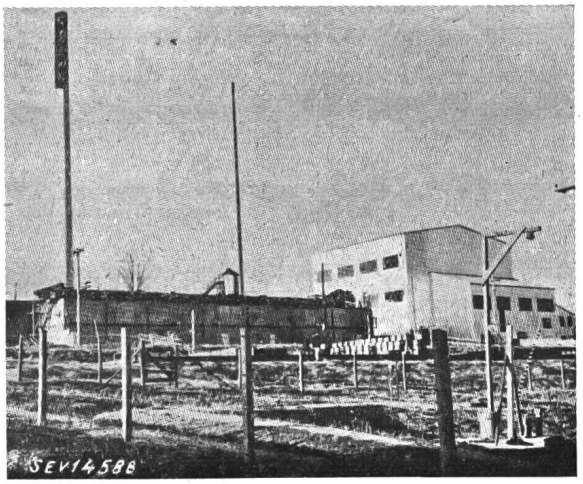

Fig. 7
Pile d'essai à plutonium d'Oakridge (Tennessee)

D'autre part, les Etats-Unis d'Amérique, la Grande-Bretagne, la France et probablement d'autres Etats encore, ont une avance considérable sur nous dans le domaine des réactions nucléaires. Il nous faudrait donc presque nécessairement utiliser des brevets pris par des commissions de l'énergie

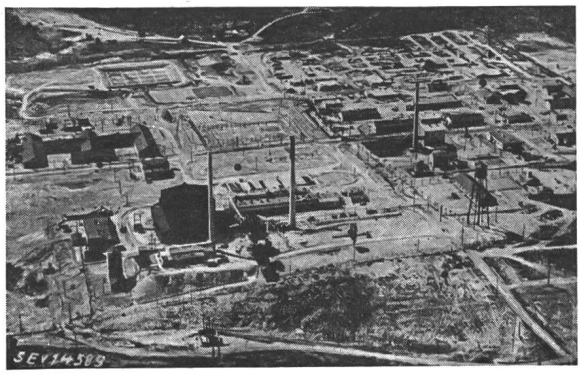

Fig. 8
Installation d'essai des Clinton Engineering Works, à Oakridge

atomique d'Etats étrangers et payer des licences. De tels brevets sont d'ailleurs déjà déposés dans notre pays. Il est vrai que nous avons également des physiciens compétents qui seraient capables de participer au développement de cette science et qui pourraient échanger de nouveaux procédés et de nouvelles méthodes avec les autres pays. Si nous voulons toutefois suivre cette voie, les moyens mis jusqu'ici à notre disposition ne suffiront guère, et il ne faut en outre pas oublier que nous dépendons de l'étranger pour la fourniture des éléments lourds, indispensables pour produire une réaction en chaîne.

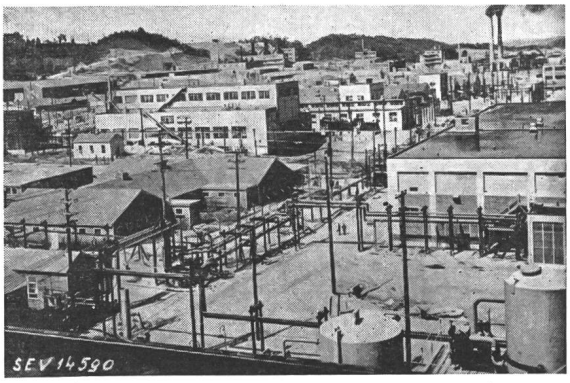

Fig. 9
Installation de fabrication des Clinton Engineering Works, à Oakridge

Il n'y a pas lieu de craindre que les usines nucléothermiques concurrencent prochainement la production des usines thermiques, même si les prix du charbon et des carburants devaient encore augmenter, ce qui est possible. La poursuite de l'aménagement de nos forces hydrauliques se justifie donc pleinement. Dans notre pays, l'eau demeure la matière première la moins coûteuse, à condition bien entendu qu'elle puisse être utilisée pour la production d'une énergie de qualité, à des prix de revient qui ne dépassent pas ceux des usines thermiques.

En outre, les usines nucléothermiques devront être aussi puissantes que possible et installées dans des régions peu peuplées, conditions qui seraient

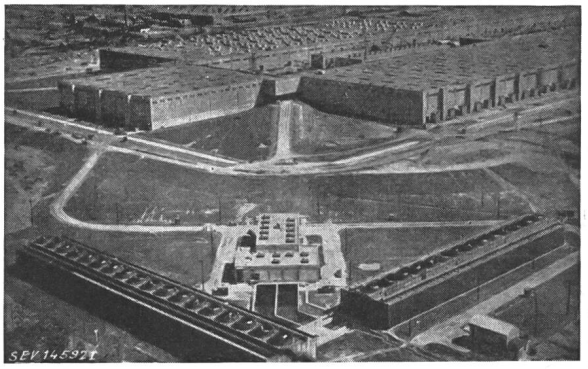

Fig. 10
Installation de fabrication des Clinton Engineering Works, à Oakridge

difficiles à remplir en Suisse, à moins que l'on ne songe à des installations souterraines ou immergées dans nos lacs.

De par leur nature même, les usines nucléothermiques sont destinées avant tout à servir d'usines de base à puissance aussi constante que possible pendant 8760 heures par an. Mais le marché de l'énergie exige également la fourniture d'énergie de pointe, qui, dans notre pays, doit s'obtenir de préférence par des usines hydroélectriques à accumulation.

En Suisse, la solution de ce problème consiste, comme précédemment, en un aménagement aussi

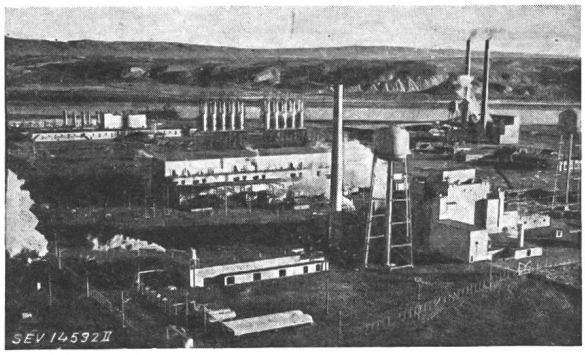

Fig. 11
Installation de fabrication des Hanford Engineering Works, près de Pasco (Washington)

poussé que possible de nos forces hydrauliques et de bassins de retenue, ainsi qu'en une politique judicieuse d'amortissement qui permette de réduire les capitaux engagés dans les installations hydrauliques, de telle façon que les surprises les plus grandes dans le domaine des recherches sur l'énergie nucléaire ne puissent guère avoir de répercussions désagréables pour nous.

Pour être complet, signalons encore que les gisements d'uranium et de thorium ne sont pas non plus inépuisables, tandis que l'eau redevient constamment disponible par un cycle naturel.

Il est évidemment possible que d'ici quelques années on nous livre, pour nos besoins en énergie thermique, de l'énergie atomique en lieu et place de

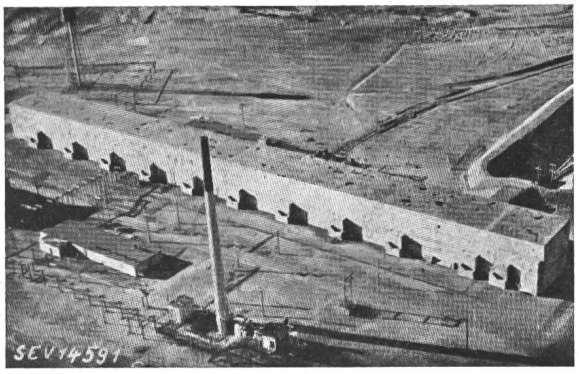

Fig. 12
Pile atomique pour la production de plutonium des Hanford Engineering Works, près de Pasco

charbon et de carburants et que nous soyons amenés à livrer de l'énergie hydraulique de pointe en échange d'énergie de base provenant de grandes usines nucléothermiques de l'étranger. Nous ne serons toutefois jamais placés, en Suisse, devant l'alternative suivante: *énergie hydraulique ou énergie atomique;* tout au plus s'agira-t-il peut-être d'adopter la formule: *énergie hydraulique et atomique.*

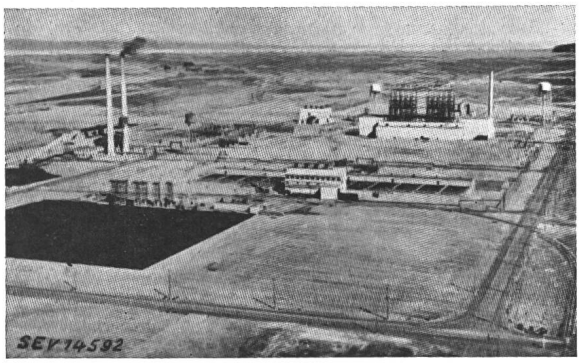

Fig. 13
Usines chimiques pour le traitement des produits de la pile atomique des Hanford Engineering Works, près de Pasco

VI

Les rapports entre l'homme et le monde de la matière ont passé par trois stades au cours des siècles. Dans l'antiquité et au moyen âge, la technique se bornait à utiliser les lois du macrocosme, sans chercher à pénétrer à l'intérieur de la matière. En tirant profit des lois de la pesanteur et en faisant usage de dispositifs mécaniques très simples, tels que les rouleaux et les leviers, les faibles forces des hommes et des animaux furent multipliées. D'imposantes constructions apportent encore de nos jours la preuve du succès de ce mode de travail primitif, pour lequel le facteur temps ne jouait à vrai dire qu'un rôle secondaire.

Avec l'invention de la poudre et de la machine à vapeur commença l'utilisation de l'énergie chimique de la matière, la pénétration dans le microcosme. En libérant les énergies latentes dans les couches périphériques des atomes, l'homme apprit à tirer profit de ces forces, plusieurs millions de fois supérieures aux siennes.

De nos jours, l'homme a enfin réussi à pénétrer les arcanes de la matière et à dominer les énormes énergies qui dorment dans les noyaux des atomes. De la sorte, la plus puissante énergie thermique libérée par des processus chimiques se trouve à son tour dépassée par une force qui lui est des millions de fois supérieure.

Il faut espérer que l'ère atomique contribuera à nous rendre un monde uni et paisible. Si cela ne devait pas être le cas, nous pourrions alors avoir les mêmes craintes que celles exprimées par Gottfried Keller, dans les vers suivants, lors de l'invention de la dynamite:

Seit ihr die Berge versetzet mit archimedischen Kräften,
Fürcht ich, den Hebel entführt euch ein dämonisch Geschlecht!
Gleich dem bösen Gewissen geht um die verwünschte Patrone,
Jegliches Bübchen verbirgt schielend den Greuel im Sack.
Wahrlich, die Weltvernichtung, sie nahet mit länglichen Schritten,
Und aus dem Nichts wird nichts: herrlich erfüllt sich das Wort!

Bibliographie

[1] *Smyth, Henry:* Atomic Energy for Military Purposes; The Official Report on the Development of the Atomic Bomb under the Auspices of the United States Government 1940—1945.

[2] *United Nations, Department of Public Information:* Scientific and Technical Aspects of «The Control of Atomic Energy».

[3] Atomic Energy—Its Future in Power Production. A Chemical Engineering Report. Tirage à part de Chem. Engng. t. 1946, octobre.

[4] *Winne, H. A.:* Atomic Energy in Industry. Electr. Engng. t. 66(1947), N° 7, p. 631...638.

[5] Atom Power Plant. Workaday Electricity will Come from First Nuclear Utility in 1948. Wall Street J. t. 1947, 4 mars.

[6] *Meitner, Lise:* Das Atom, Neue Rdsch. t. 1945, octobre.

[7] *Masters, Dexter* et *Way, Katherine:* One World or Nome. A Report to the Public on the Full Meaning of the Atomic Bomb. Chicago.

[8] *Dubs, Werner R.:* Die physikalischen Grundlagen der Atomenergie-Anlage. Schweiz. Bauztg. t. 128(1946), N° 9, p. 107...111, et N° 10, p. 123...127.

Adresse de l'auteur:
A. Winiger, Directeur de l'«Electro-Watt», Entreprises électriques et industrielles S. A., Zurich.