Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 90 (1964)
Heft: 21

Artikel: Contribution de la physique à l'énergétique de l'avenir
Autor: Zangger, C.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-67014

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: 16.07.2025

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

90e année Lausanne, 17 octobre 1964 N° 21

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 (SVIA)
de la Section genevoise de la SIA
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'EPF (Ecole polytechnique fédérale de Zurich)

COMITÉ DE PATRONAGE
Président: E. Martin, arch. 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.; J.-C. Ott, ing.
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.; J.-P. Vouga, arch.

CONSEIL D'ADMINISTRATION
de la Société anonyme du « Bulletin technique »
Président: D. Bonnard, ing.
Membres: Ed. Bourquin, ing.; G. Bovet, ing.; M. Bridel; J. Favre, arch.; A. Robert, ing.; J.-P. Stucky, ing.
Adresse: Avenue de la Gare 10, 1000 Lausanne

RÉDACTION
D. Bonnard, E. Schnitzler, S. Rieben, ingénieurs; M. Bevilacqua, architecte
Rédaction et Editions de la S.A. du « Bulletin technique »
Tirés à part, renseignements
Avenue de Cour 27, 1000 Lausanne

ABONNEMENTS

1 an	Suisse	Fr. 34.—	Etranger	Fr. 38.—
Sociétaires	»	» 28.—		
Prix du numéro	»	» 1.60	»	» 1.80

Chèques postaux : « Bulletin technique de la Suisse romande », N° 10 - 5775, Lausanne

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

ANNONCES
Tarif des annonces:

1/1 page	Fr. 350.—
1/2 »	» 180.—
1/4 »	» 93.—
1/8 »	» 47.—

Adresse: Annonces Suisses S.A.
Place Bel-Air 2. Tél. (021) 22 33 26. 1000 Lausanne et succursales

SOMMAIRE

Contribution de la physique à l'énergétique de l'avenir, par C. Zangger, professeur.
Bibliographie. — Divers. — Les congrès.
Documentation générale. — Nouveautés, informations diverses.

CONTRIBUTION DE LA PHYSIQUE A L'ÉNERGÉTIQUE DE L'AVENIR

par le professeur C. ZANGGER, suppléant du délégué du Conseil fédéral aux questions d'énergie atomique

Introduction générale

A un moment où les possibilités résiduelles offertes par les ressources hydrauliques de la Suisse s'épuisent rapidement et où les producteurs d'électricité se préparent à recourir définitivement à l'énergie nucléaire pour assurer l'avenir du pays, à une époque où l'on prend mondialement conscience que les réserves d'énergie conventionnelle du globe terrestre seront sollicitées de manière substantielle par la génération actuelle déjà, il m'a paru utile de rappeler et de décrire à grands traits les aspects dominants des vastes efforts entrepris dans le cadre de la physique moderne pour capter dans la nature de nouvelles sources d'énergie qui puissent assurer le relai de notre approvisionnement énergétique conventionnel pour une très longue échéance. Si l'application de certaines méthodes modernes de captage d'énergie a déjà conduit à des résultats spectaculaires et économiquement intéressants, il n'en reste pas moins qu'un effort patient et ardu de recherche et de développement reste à accomplir pour résoudre le problème fondamental, pour l'humanité, de la constitution d'un approvisionnement énergétique à vue humaine inépuisable.

Deux motifs majeurs me conduisent, en tant que physicien, à aborder avec le lecteur ce vaste sujet d'étude et de recherche :

— D'abord parce que pour le physicien l'énergie est l'aspect fondamental auquel se ramène toute démarche scientifique. Qu'il s'agisse de phénomènes statiques, respectivement dynamiques, le physicien parlera immanquablement états d'énergie stationnaires ou distributions énergétiques d'états, respectivement transitions entre états énergétiques avec transformation éventuelle d'énergie d'une forme dans une autre. Cette constatation prévaut aussi bien dans le domaine des phénomènes nucléaires, c'est-à-dire portant sur la transformation des noyaux, que dans le domaine des phénomènes atomiques, c'est-à-dire portant sur l'interaction entre les électrons d'un même atome, ou l'interaction entre les atomes, à l'état d'agrégation solide, liquide ou gazeux. Il n'est dans ces conditions pas étonnant qu'à partir de la recherche fondamentale le physicien ait été naturellement conduit à ouvrir un énorme champ de prospection scientifique de nouvelles sources d'énergie, champ dans lequel il joue le rôle directeur.

— La seconde motivation du choix de ce sujet réside dans la responsabilité accrue du physicien face au souci croissant que l'humanité assoiffée d'énergie éprouve en voyant ses besoins énergétiques se multiplier sans cesse en divergeant explosivement vers l'infini, alors que les ressources naturelles offertes par son système vital sont finies. Cette situation conduit à la conclusion absurde que, si le taux actuel d'expansion énergétique doit inexorablement se maintenir à l'avenir, alors dans quelque six cents ans toute la matière terrestre aura été convertie en énergie, selon la loi d'équivalence matière-énergie d'Einstein. Ainsi la contingence des possibilités énergétiques de l'humanité imposera tôt ou tard à cette dernière une limitation de son développement aboutissant très vraisemblablement à un état de saturation. D'aucuns ont déjà baptisé cet état « état asymptotique de l'humanité » et certains se sont même avancés à le préconiser pour le siècle prochain avec une population terrestre saturante d'environ 7 milliards d'âmes, soit un peu plus du double de la population actuelle. Le caractère de cet état asymptotique, qui peut consister en une vie plutôt d'abondance ou plutôt de paupérisme, le moment d'apparition de cet état, le niveau de la population qui pourra y accéder, dépendront essentiellement du succès avec lequel le chercheur aura su capter des sources d'énergie nouvelles aux possibilités les plus grandes. La question actuelle que l'on doit donc en fait se poser n'est certes pas si l'humanité atteindra un tel état asymptotique, mais quand et à quel niveau elle l'atteindra, et le devoir du chercheur est de reculer le plus possible cette échéance et cette limite.

Pour illustrer la précarité flagrante de l'approvisionnement énergétique de l'humanité, qu'il me soit permis de mentionner que la consommation annuelle mondiale actuelle d'énergie est d'environ 4 milliards de tonnes de charbon équivalent, alors que les réserves connues de combustible fossile (charbon, pétrole et gaz naturel) se montent à une valeur de l'ordre de 700 milliards de tonnes. C'est dire, après un calcul élémentaire, qu'au rythme actuel d'expansion de la consommation énergétique, les réserves d'énergie thermique dites conventionnelles pourraient être épuisées dans le courant du siècle prochain, si d'autres sources ne venaient auparavant prendre le relai de l'approvisionnement.

Suivant les idées d'Aristote, l'humanité s'appuie sur les quatre éléments naturels fondamentaux qui sont : l'eau, l'air, le roc et le soleil, si nous identifions ce dernier au feu d'Aristote. Les sources importantes d'énergie fournies par ces éléments et identifiées à ce jour sont cataloguées schématiquement dans le tableau 1. Parmi les sources dites classiques, de technologie industrielle éprouvée, il faut relever tout spécialement la contribution majeure du soleil sous forme d'une réserve importante de combustible fossile (pétrole, charbon et gaz), d'un approvisionnement continu mais très faible de bois, ainsi que, grâce au cycle hydrique de l'atmosphère, d'un approvisionnement variable d'hydro-électricité.

Parmi les sources modernes d'énergie, le roc fournira à l'humanité la contribution importante de l'énergie nucléaire basée sur la fission des noyaux lourds, qui se trouve au stade du développement et dont les ressources naturelles sont abondantes mais finies. Ensuite, nous trouvons au stade du laboratoire une contribution éventuelle de l'eau sous la forme d'énergie nucléaire de fusion des noyaux légers, principalement le deutérium qu'elle contient, et finalement une contribution immédiate du soleil sous la forme d'énergie de chauffage local principalement.

L'illustration des possibilités de ces diverses sources d'énergie devient évidente lorsqu'on en présente les réserves respectives connues ou estimables. Le tableau 2 contient, dans la première colonne, l'indication du stade

Tableau 1.

Sources principales d'énergie

	Sources classiques	Sources modernes	
Technologie industrielle	Eprouvée (stade industriel)	Démontrée (stade du développement)	Non démontrée (stade du laboratoire)
1. Soleil	*Combustible fossile* charbon, pétrole, gaz, bois 1) 2) 3) *Hydro-électricité* (centrales d'accumulation et au fil de l'eau)		*Energie solaire* (principalement énergie de chauffage local)
2. Roc		*Energie nucléaire de fission* des noyaux lourds: uranium, thorium 1)	
3. Eau	Hydro-électricité (stations marémotrices)		*Energie nucléaire* de *fusion* des noyaux légers : deutérium, etc. 1)
4. Air	Aéro-électricité (stations aéromotrices)		

1) Centrales de puissance thermique et électrique.
2) Chauffage local.
3) Propulsion.

de développement des sources respectives. On trouve évidemment le combustible fossile et l'hydro-électricité au stade industriel. Si pour la fission de l'isotope uranium-235 l'extraction d'énergie nucléaire a déjà atteint le stade industriel, cela n'est pas encore le cas pour la combustion de l'uranium-238 et du thorium-232, qui se trouvent respectivement au stade du développement et au stade du laboratoire. La mise en valeur de ces deux derniers isotopes fait intervenir le processus de surrégénération, qui sera expliqué plus loin. Enfin, l'énergie nucléaire de fusion des noyaux légers et l'énergie solaire directe sont au stade du laboratoire.

La deuxième colonne présente les ressources annuelles des sources permanentes fournies par le soleil : l'hydro-électricité et l'énergie solaire directe. On constate que les possibilités pratiques offertes par l'hydro-électricité sont déjà largement dépassées par la consommation énergétique actuelle : à l'avenir, cet apport perdra de plus en plus d'importance relative. Quant à la contribution directe du soleil, nous y reviendrons plus loin.

La troisième colonne présente les réserves totales des sources primaires d'énergie qui ne se renouvellent pas ou trop lentement, et que l'on peut qualifier de combustibles proprement dits : les combustibles fossiles et nucléaires. On voit que les réserves connues et estimées économiquement exploitables de combustible fossile (pétrole, charbon et gaz naturel) et de combustible nucléaire basé sur la fission des noyaux lourds (uranium et thorium) sont dans le rapport approximatif de 1 pour le combustible fossile à 5 pour le combustible nucléaire de fission, alors que le combustible de la fusion nucléaire, même basé sur le deutérium seulement, pourrait offrir une réserve dix millions de fois supérieure.

L'enseignement global à tirer de ces considérations est le suivant :

Pour une expansion énergétique qui se poursuivrait inexorablement au rythme de ces dernières décades pen-

TABLEAU 2.

Réserves exploitables connues des principales sources d'énergie (en milliards de TEC)

	Stade	Annuelles	Intégrales
Consommation mondiale			
Actuelle		4	
Réserves classiques			
Combustible fossile : pétrole, charbon, gaz	industriel		700
Hydro-électricité.	industriel	1,5	
Réserves modernes			
Energie nucléaire de *fission* :			
Uranium brûlé dans les réacteurs thermiques actuels . . . . . (U-235 → fission)	industriel		10-50
Uranium brûlé dans les réact. surrégénérateurs . (U-238 → Pu-239 → fission)	développem.		500-3000
Thorium brûlé dans les réact. surrégénérateurs . (Th-232 → U-233 → fission)	laboratoire		500-3000
Energie nucléaire de *fusion* :			
Deutérium et noyaux légers brûlés dans les réacteurs à plasma	laboratoire		10 000 000 000
Energie *solaire* :			
Chauffage local principalement	laboratoire	?	

1 TEC (« Tonne d'équivalent charbon ») est l'équivalent énergétique d'une tonne de charbon à 7000 kcal.

dant un siècle, on montre par un calcul élémentaire que l'appoint de l'hydro-électricité serait alors minime et que la couverture de la demande d'énergie exigerait jusque-là la combustion de la plus grande partie des réserves actuellement connues de combustible fossile et de combustible nucléaire basé sur la fission. Il est sous ces conditions évident que l'appoint de l'énergie nucléaire de fusion et de l'énergie solaire directe est de première nécessité pour les générations immédiatement futures déjà. Il est d'autre part indispensable de poursuivre les travaux de prospection des combustibles.

Ainsi, sous la réserve que les laboratoires scientifiques de demain ou peut-être la recherche spatiale de l'avenir ne nous apportent une nouvelle source d'énergie insoupçonnée à ce jour, les chiffres mentionnés, à la condition qu'ils ne soient pas infirmés demain, laissent nettement apparaître une responsabilité de la génération actuelle de l'humanité vis-à-vis des générations immédiatement futures dans le domaine de l'énergétique. Cette responsabilité est double : elle consiste d'une part à tendre vers une utilisation rationalisée des sources énergétiques actuellement disponibles et d'autre part à mettre en œuvre les moyens scientifiques et techniques nécessaires pour promouvoir l'avènement définitif des diverses sources d'énergie modernes.

En ce qui concerne l'impératif de l'utilisation rationnelle des sources énergétiques actuellement disponibles, force est de constater que le combustible fossile dessert, entre d'autres, deux buts particulièrement importants qui lui reviennent en propre. Tout d'abord il sert de matériau de base à toute la chimie organique (produits pharmaceutiques, plastiques, etc.), et ne saurait, à épuisement total, trouver qu'un matériau de remplacement dispendieux dans les produits du monde végétal (bois, etc.). Ensuite, le combustible fossile est le seul qui puisse raisonnablement servir à produire de l'énergie mobile économique à petite échelle ; il faut entendre par là la propulsion des véhicules de dimension moyenne à petite (voitures, camions, avions, etc.), qui absorbe à elle seule une fraction importante de la consommation actuelle de combustible fossile. Le remplacement de cette énergie mobile par des accumulateurs électriques ou des accumulateurs chimiques (par exemple le combustible des fusées) est possible, mais de prix très élevé à performances égales. L'emploi de la propulsion nucléaire pour les petits transporteurs ne peut être envisagé, en raison des protections biologiques énormes impliquées par cette technique.

Ainsi donc, afin de ménager à longue échéance l'avenir de l'industrie organique et celui des petits et moyens transporteurs, il importe de supplanter le combustible fossile par le combustible nucléaire, partout où cela est économiquement raisonnable. Ceci est d'ores et déjà le cas pour la production d'électricité et il est réjouissant de constater que les programmes de réacteurs de puissance des nations nucléaires prévoient, dans un avenir rapproché, l'implantation massive de réacteurs nucléaires producteurs d'électricité et qu'en l'an 2000 au moins la moitié de l'électricité de ces pays sera vraisemblablement produite par voie de fission nucléaire.

Un autre domaine qui permettrait aussi une économie substantielle de combustible fossile, en l'occurrence de charbon, est le processus de la réduction de l'oxyde de fer au métal, qui consomme, aux USA par exemple, un quart du charbon dans les fours. Une telle réduction pourrait être effectuée directement par électrolyse, ou quasi directement par électrolyse de l'eau et réduction de l'oxyde de fer par l'hydrogène produit. Le coût additionnel dans ce cas paraît infime. Analoguement, l'électricité pourrait éventuellement être utilisée pour produire tous les autres métaux à partir des oxydes fournis par les minerais.

Quant au second impératif, qui demande la mise en œuvre des moyens scientifiques et techniques nécessaires pour le parachèvement du captage des sources d'énergie modernes, ses caractéristiques et implications scientifiques et techniques feront l'objet du reste de cet exposé.

En grandes lignes, le physicien d'abord, puis l'ingénieur sont confrontés aux quatre grandes tâches suivantes qui ressortent du tableau 2, et que j'examinerai plus loin une à une :

1. La première consiste à parachever la captation de l'énergie nucléaire de fission et l'amener intégralement au stade industriel. Etant donné que la combustion de l'uranium-235 dans les réacteurs thermiques actuels est maîtrisée, il reste à réaliser les conditions de surrégénération, c'est-à-dire de transformation d'uranium-238 difficilement fissile en plutonium-239 fissile et de thorium 232 difficilement fissile en uranium-233 fissile. Les réserves intégrales correspondantes montrent avec évidence que, sous l'angle de l'économie des matières premières énergétiques, l'utilisation de la fission nucléaire ne prend vraiment un sens complet qu'avec la surrégénération, puisque cette dernière décuple (40 à 60 fois) les possibilités offertes par l'uranium-235. Il importe donc de brûler le plus complètement possible les deux isotopes de l'uranium et celui du thorium.

2. Quant à la seconde tâche, elle demande au chercheur qu'il trouve, par la voie de la théorie et de l'expérience, les conditions dans lesquelles la fusion des noyaux légers peut être réalisée et ménagée en laboratoire d'abord, puis en grande centrale. Cela comporte la prospection des propriétés physiques de ce qu'on a déjà appelé le quatrième état de la matière : le plasma,

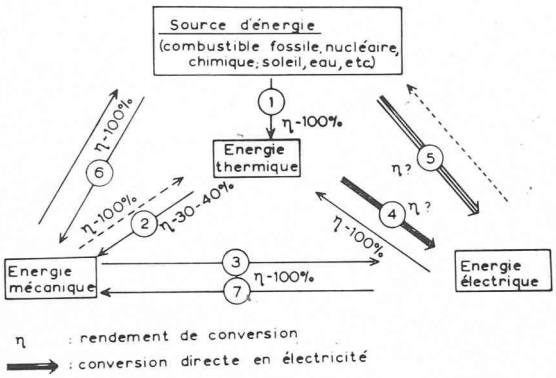


Fig. 1. — Schéma de production de l'énergie.

c'est-à-dire un gaz complètement ionisé, qui doit être porté à des températures de quelques dizaines à quelques centaines de millions de degrés et confiné pendant un temps suffisamment long pour permettre la fusion des noyaux. Le physicien se meut ici dans un monde entièrement nouveau et rencontre des difficultés insoupçonnées qui exigent le développement de théories nouvelles et le diagnostic de grandeurs physiques insondées jusque-là.

3. La troisième tâche comporte l'élaboration de méthodes expérimentales raffinées et efficaces pour la captation directe et la mise en valeur de l'énergie solaire. La difficulté majeure dans ce domaine est, pour ne pas devoir intercepter l'énergie solaire sur de trop grandes surfaces, de trouver des méthodes de transformation de l'énergie solaire en une autre forme d'énergie qui offrent le rendement de conversion le plus élevé possible.

4. La quatrième tâche est encore inédite, dans le cadre de cet exposé. Elle concerne les processus de conversion directe des énergies primaires en énergie électrique, qui est la forme d'énergie la plus souple et la plus pratique. Elle comporte la recherche de méthodes aptes à effectuer de telles conversions avec le maximum de rendement possible, c'est-à-dire avec le minimum de pertes inutilisables. La motivation de cette tâche apparaîtra plus loin.

Conversion directe

La figure 1 présente un schéma généralisé de la production d'énergie thermique, mécanique ou électrique à partir d'une source d'énergie primaire quelconque : combustible fossile, nucléaire ou chimique, soleil, eau de rivière ou accumulée, etc. Illustrons-le par quelques cas concrets :

— La production d'énergie hydro-électrique, par exemple, passe par la voie 6 (conversion de l'énergie potentielle de l'eau en énergie mécanique de la turbine) puis par la voie 3 (conversion de l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique dans l'alternateur).

— Prenons aussi le cas de la production d'énergie électrique par une centrale thermique marchant au combustible fossile ou nucléaire. La combustion chimique du pétrole ou nucléaire de l'uranium nous mène par la voie 1 à l'énergie thermique ; celle-ci, par la voie 2, est convertie en énergie mécanique de la turbine à vapeur pour finalement devenir, par la voie 3, énergie électrique aux bornes de l'alternateur.

— Pensons maintenant au cas moins actuel d'une cellule photo-électrique qui, excitée par la lumière du soleil, mettrait en mouvement un petit moteur électro-mécanique ; c'est alors l'énergie solaire qui, par la voie 5, devient directement énergie électrique dans la cellule et, finalement, par la voie 7, énergie mécanique du moteur.

La considération qui importe cependant ici est celle du rendement de conversion, appelé η sur la figure. η exprime en pour-cent la fraction d'énergie utile récupérée lors d'un phénomène de conversion. On remarquera que dans toutes les voies de conversion pour lesquelles la valeur du rendement est indiquée sur la figure, cette valeur est très proche de la valeur parfaite de 100 %, sauf dans un cas, celui de la voie 2, qui correspond à la conversion d'énergie thermique en énergie mécanique. C'est le rendement thermique bien connu de Carnot, dont la valeur est limitée à 30-40 % dans les centrales thermiques actuelles. Ceci signifie que le passage de l'énergie thermique à l'énergie mécanique dans ces centrales implique que 60 à 70 % de l'énergie primaire est consommée de manière inhérente en pure perte. Dans un bilan énergétique aux ressources finies, ce handicap est sérieux. L'idée moderne est ainsi d'éviter cette voie 2 et de tenter de rechercher des méthodes de conversion plus rentables, afin d'épargner le plus possible les ressources d'énergie primaire. Les deux voies disponibles que le scientifique moderne tente d'ouvrir sont les voies 4 et 5. La voie 4 représente la conversion directe de l'énergie thermique en énergie électrique, conversion qui, bien que soumise à la restriction de Carnot, laisse néanmoins espérer des rendements supérieurs. La voie 5 représente la conversion directe de l'énergie primaire en énergie électrique, conversion qui signifie par exemple la transformation directe d'énergie chimique ou d'énergie solaire en électricité.

Il existe des douzaines de méthodes possibles de conversion directe. Je me bornerai cependant à illustrer les trois d'entre elles qui sont considérées comme d'intérêt immédiat et qui sont activement prospectées dans les laboratoires.

La batterie thermo-électronique

Ce dispositif (fig. 2) convertit l'énergie thermique directement en énergie électrique (voie 4).

L'effet thermo-électronique des métaux, c'est-à-dire l'émission spontanée d'électrons par des métaux chauffés, est connu depuis longtemps et appliqué couramment pour l'émission de courant par le filament de chauffage d'un tube électronique. Ce n'est cependant que récemment que l'on a songé à utiliser cet effet pour transformer la chaleur en électricité. Le convertisseur d'énergie le plus simple fondé sur ce principe est un tube à vide comprenant une cathode portée à une température assez élevée pour émettre des électrons et une anode maintenue à une température plus basse jouant le rôle de collecteur d'électrons. La population d'électrons $\frac{dNe}{d\varepsilon}$ de la cathode étant en effet supérieure à celle de l'anode, dans le domaine des énergies E positives, il s'ensuit un courant net dominant dans la direction de l'anode. Si l'on réunit à l'extérieur cathode et anode par une résistance de charge adaptée, on obtient alors une puissance électrique.

Pour améliorer le rendement, il faut tenir compte du fait que l'émission d'électrons croît rapidement avec la température de la cathode, l'accroissement des pertes par rayonnement étant relativement moins important que l'augmentation du courant thermo-électronique. Le

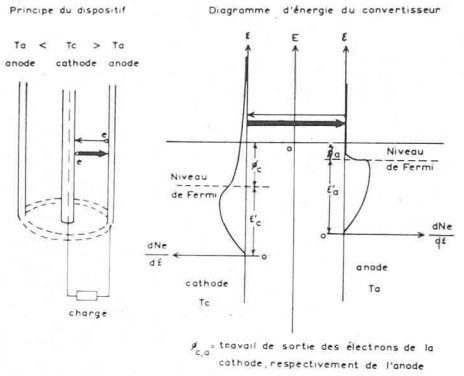


Fig. 2. — Principe physique de la batterie thermo-électronique.

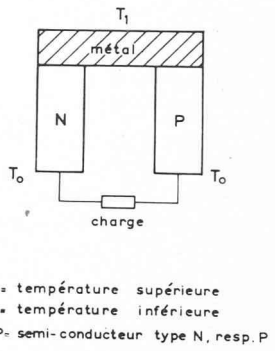


Fig. 3. — Dispositif de la batterie thermo-électrique.

rendement dépend également du matériau anodique, qui devrait présenter le travail de sortie des électrons le plus faible possible.

On espère obtenir par cette méthode, pour de hautes températures de la cathode, un rendement de conversion allant jusqu'à 30 %, au maximum égal à celui de Carnot, ainsi qu'une très haute densité d'énergie électrique ; dans certains essais on a déjà atteint des valeurs remarquables de 30 watts/cm².

La difficulté principale survenant dans cette méthode réside dans la formation d'une charge électrique spatiale au voisinage de la cathode émettrice. Plusieurs solutions ont été adoptées, parmi lesquelles la plus prometteuse est l'utilisation d'un gaz fortement ionisé, un plasma, dont l'effet sera de régulariser le champ électrique entre les deux électrodes. Ce plasma peut être produit soit par l'adjonction de vapeur d'atomes facilement ionisables à haute température (par exemple du cæsium ou du rubidium), soit par l'adjonction d'un gaz noble (par exemple le xénon) soumis à un champ de radiations ionisantes.

Le fait que dans cette dernière possibilité le champ de radiations, au lieu d'être nocif, remplit une fonction utile, rend l'emploi de cette méthode très intéressante dans un réacteur nucléaire. Pour des températures cathodiques de 2000°C à 3000°C, les matériaux nucléaires offrant un pouvoir thermo-électronique très élevé sont le carbure d'uranium (UC), le carbure de thorium (ThC) et un mélange de carbure de zirconium (ZrC) et de carbure d'uranium (UC). Les premiers essais exécutés dans cette direction concernaient un élément de combustible dont la cathode était constituée d'un mélange ZrC-UC et dont l'anode était en acier inoxydable, la neutralisation de la charge d'espace étant assurée par de la vapeur de cæsium. Le rendement obtenu à 2000°C, qui était de 5 % dans cet essai, est susceptible d'être amélioré et on espère, par ce développement, obtenir une méthode concurrentielle de la conversion indirecte par la turbine à vapeur ou à gaz. La combinaison simultanée des deux méthodes, effet thermo-électronique dans l'élément de combustible nucléaire et cycle thermique de gaz ou de vapeur dans le circuit primaire de refroidissement du réacteur, est susceptible de donner un rendement élevé de l'ordre de 60 %.

La batterie thermo-électrique

Ce dispositif (fig. 3) convertit également l'énergie thermique directement en énergie électrique (voie 4).

L'effet thermo-électrique des métaux est connu depuis très longtemps sous le nom d'effet Seebeck et appliqué couramment sous la forme du thermo-couple à la mesure de la température. Si on soude ensemble une des extrémités de deux fils conducteurs de matériaux différents et si l'on porte la soudure à une température élevée, il se forme entre les extrémités libres des fils, maintenues à une température inférieure, un potentiel électrique capable d'engendrer un courant. Ce potentiel électrique est d'autant plus important que la différence des températures entre les extrémités soudées et les extrémités libres est grande. Cette propriété est analogue à celle de l'émission thermo-électronique, mais repose sur un effet des potentiels de contact interne des métaux.

C'est le mérite des physiciens modernes d'avoir su reconnaître que les pouvoirs thermo-électriques des matériaux semi-conducteurs étaient beaucoup plus élevés, d'un facteur 10 à 100 environ, que ceux des métaux. Etant en outre reconnu que la conductivité thermique des semi-conducteurs est nettement plus faible que celle des métaux, ce qui diminue l'effet de court-circuit thermique entre sources chaude et froide, il est devenu possible, grâce aux développements de la physique du solide, d'envisager le problème de la conversion directe de la chaleur en énergie électrique par cette méthode.

Dans ce but, un thermo-couple doit comprendre deux cristaux semi-conducteurs respectivement de type N et P, reliés sur un de leurs côtés par un pont métallique. Les côtés soudés à ce pont sont portés à une température élevée par une source de chaleur chauffant le pont ; grâce à la mauvaise conduction thermique du matériau, les deux autres côtés peuvent être maintenus à une température proche de la température ambiante et délivreront alors une puissance électrique à une résistance de charge.

Les difficultés rencontrées dans l'application pratique des matériaux thermo-électriques sont diverses :

— tout d'abord, ces matériaux doivent posséder une bonne résistance mécanique et une certaine élasticité pour éviter leur destruction sous l'influence des énormes forces mécaniques développées par les grandes différences de température ;

— en plus, le pont métallique reliant les deux branches du thermo-couple doit être fait de telle manière que les résistances électriques au contact des semi-conducteurs soient faibles devant les résistances des branches ;

— et surtout, la conductivité thermique des matériaux semi-conducteurs qui constituent un court-circuit thermique entre les sources chaude et froide doit être réduite au maximum tout en conservant une conduction électrique suffisante.

Sous ce dernier rapport, les grands progrès des années récentes sont dus surtout à l'utilisation de solutions solides de deux composés semi-conducteurs au lieu d'un seul, par exemple le tellurure de plomb type N avec traces de bismuth et type P avec traces de sodium. Les meilleurs matériaux développés à ce jour ont permis d'atteindre des rendements de conversion d'énergie thermique en énergie électrique de l'ordre de 18 % pour un domaine de température et de différence de température de 150 à 500°C.

En principe, n'importe quelle source thermique peut être utilisée dans les convertisseurs thermo-électriques. Une sélection des possibilités est imposée toutefois par la nécessité de concentrer la production de cette énergie sur une très petite surface. En outre, dans le cas de l'énergie nucléaire, cette sélection est limitée par le fait qu'un champ de radiations traversant les semi-conducteurs détériore rapidement leurs propriétés.

L'utilisation de matériaux thermo-électriques avec des radio-isotopes de longue durée de vie offre des possibilités intéressantes pour la construction de petits générateurs d'électricité à grande durée de vie. L'application pratique la plus connue de cette méthode a été réalisée aux USA avec la batterie thermo-électrique nucléaire appelée Snap III. Dans cette batterie, l'énergie nucléaire est fournie au pont métallique du couple par l'absorption des particules α d'une source radio-active de polonium-210 de 1495 curies. La puissance électrique débitée était d'environ 2 watts, le rendement de conversion de 5 % et le poids d'environ 2,5 kg. Signalons que, dans cette application, le problème de la détérioration des jonctions par irradiation ne se pose pas puisque le pont métallique, qui est capable d'absorber les particules α, protège les jonctions.

Pour l'application dans les réacteurs nucléaires, plusieurs possibilités sont étudiées, par exemple l'installation de matériaux thermo-électriques directement dans les éléments de combustible ou l'application d'éléments thermo-électriques dans les échangeurs de chaleur. Une difficulté essentielle pour l'application dans l'enceinte du réacteur réside dans la nécessité de développer des matériaux thermo-électriques qui soient peu sensibles aux radiations nucléaires. Des essais avec des matériaux nouveaux, tels que l'oxyde de nickel au lithium, permettent des espoirs justifiés sous ce rapport.

L'utilisation de l'énergie classique, telle la combustion de gaz de propane, a déjà permis la construction d'un générateur thermo-électrique d'une puissance de 100 W. Des installations de ce type peuvent actuellement être envisagées pour des puissances de quelques kW.

En ce qui concerne l'utilisation de l'énergie solaire, les générateurs thermo-électriques alimentés par cette énergie n'ont atteint que des rendements de l'ordre de 1,2 à 1,8 %, les différences de température obtenues sur le thermo-couple n'ayant été que d'environ 120°C. Avec des systèmes optiques de concentration de l'énergie solaire (miroirs concaves), on espère pousser ces différences de température à des valeurs d'environ 350°C et obtenir ainsi des rendements de l'ordre de 8 %. Ces conditions réalisées, les physiciens pensent alors pouvoir d'ici quelques années pratiquer la première méthode quasi économique de récupération directe de l'énergie solaire dans de petites installations.

En résumé, l'application de l'effet thermo-électrique à la conversion de l'énergie thermique en énergie électrique est en pleine voie de développement. Compte tenu de toutes les pertes thermiques, les rendements les plus élevés atteints à ce jour dans des conditions pratiques sont de l'ordre de 18 %. L'application massive de cet effet nécessitera à l'avenir encore un sérieux effort de la part de la physique du solide dans le développement de matériaux thermo-électriques satisfaisants à tous les points de vue. Les espoirs suscités par cette technique sont grands.

La batterie photo-électrique

Comme son nom l'indique, cette batterie convertit l'énergie lumineuse, solaire par exemple, en énergie électrique de manière directe (voie 5).

Le principe de la batterie photo-électrique est simple. Il repose sur l'effet photo-voltaïque bien connu depuis 1876 et utilisé dans les cellules photo-électriques du photographe (fig. 4). Les rayons solaires, en tombant sur une jonction P-N d'un semi-conducteur, créent des paires électron négatif - trou positif. Les électrons négatifs sont alors mis en mouvement par la barrière du potentiel dans une direction, les trous positifs dans l'autre direction et il en résulte un courant électrique.

Les batteries photo-électriques modernes consistent en une bande de silicium monocristallin, par exemple de type N, sur laquelle une couche de type P, épaisse de quelques microns, est formée par diffusion gazeuse de bore à haute température.

Avec la radiation solaire, le rendement des batteries photo-électriques est limité, car une fraction mineure seulement des photons solaires est capable de produire des paires électron négatif - trou positif. Il est aussi pratiquement impossible d'éliminer d'autres pertes, telles que celles dues à la réflexion de la lumière sur le semi-conducteur, à l'effet Joule d'échauffement et à la recombinaison spontanée d'électrons et de trous.

Les meilleures batteries au silicium réalisées actuellement offrent un rendement de 14 %, c'est-à-dire environ deux tiers du rendement théorique maximum. Dans des conditions optimales de lumière naturelle, on obtient une énergie utile d'environ 14 mW/cm², soit 140 W/m². En dépit de ce résultat très prometteur, l'utilisation des piles au silicium ne peut être actuellement envisagée que dans certaines applications restreintes comportant des puissances de l'ordre de la dizaine de watts, telles que l'alimentation des véhicules spatiaux, ceci en raison de leur prix élevé et de leur encombrement.

Divers domaines de recherche ont été ouverts qui peuvent élargir les perspectives des piles photo-électriques. Ces domaines incluent la production de très grandes surfaces de silicium monocristallin, l'étude d'autres semi-conducteurs ayant un grand effet photovoltaïque, tels l'arséniure de gallium (Ga As), l'antimoniure d'aluminium (Al Sb) et le tellurure de cadmium (Cd Te), etc. Ces nouveaux composés, qui peuvent être utilisés à des températures supérieures à celle tolérée par le silicium, pourraient fonctionner avec de

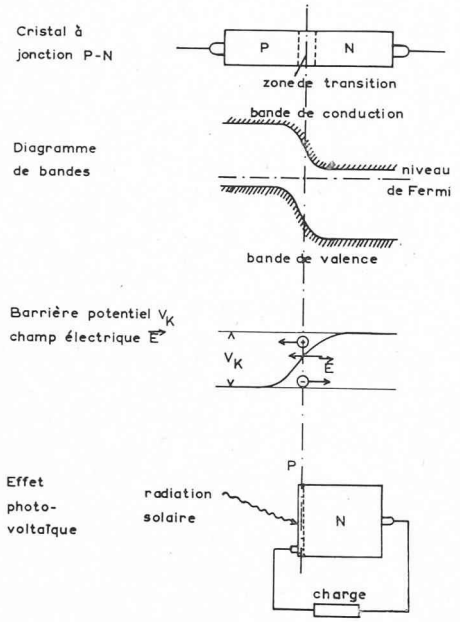


Fig. 4. — Principe physique de la batterie photo-électrique.

l'énergie solaire concentrée par des miroirs et donner une augmentation substantielle de puissance débitée par unité de surface de batterie.

On peut à longue échéance espérer par cette méthode alimenter en électricité une maison de quelques familles, en recouvrant par exemple la toiture de batteries photo-électriques qui alimenteraient des batteries d'accumulation sises dans le bâtiment. On peut cependant difficilement imaginer de grandes centrales de puissance basées sur ce principe en raison de l'encombrement qu'elles impliqueraient. Actuellement ces batteries solaires ont trouvé une application judicieuse dans l'alimentation électrique des satellites et des véhicules interstellaires.

Energie solaire

Quoique la surface du soleil émette des radiations avec une densité de puissance de 8 kW par cm², la surface de la terre reçoit au mieux 1 kW par m², même dans les conditions climatiques les plus favorables. Comme ce flux d'énergie est disponible de manière quasi permanente en de nombreuses parties du globe, la recherche du captage de cette énergie a été sérieusement encouragée ces dernières années. Elle est actuellement orientée dans plusieurs directions générales.

La première direction concerne l'utilisation de cette énergie dans un but purement thermique, c'est-à-dire pour obtenir, par absorption dans des corps noirs, des températures élevées. On appelle ces dispositifs des fourneaux solaires ; ils servent, par exemple, à chauffer ou purifier l'eau, à cuire, etc. Pour disposer d'unités de chauffage de plusieurs kilowatts, il est nécessaire d'utiliser des moyens de concentration de l'énergie solaire ; les plus utilisés sont des miroirs paraboliques fixes sur lesquels le rayonnement est dirigé par un miroir plan mobile dont l'orientation s'adapte au mouvement du soleil. Les recherches concernent ici l'étude et l'amélioration des propriétés des surfaces réfléchissantes pour les réflections d'énergie et absorbantes pour les fourneaux. La fabrication des miroirs, leur résistance aux vents et aux intempéries et les fluctuations de température posent également de nombreux problèmes. Les physiciens ont pu déjà obtenir par ces méthodes de concentration des températures de 3000°C et plus au moyen de miroirs de quelques mètres de diamètre.

La seconde direction prolonge la première en visant la transformation de cette énergie thermique concentrée en énergie mécanique, en vue d'actionner par exemple des machines industrielles qui seraient situées loin de réseaux électriques. Le fourneau solaire sert ici de source chaude pour produire la vapeur alimentant la machine thermique. Les rendements thermiques généralisés obtenus (produit : rendement de conversion de l'énergie solaire en énergie thermique × rendement de la machine thermique) sont de l'ordre de 5 %. Ils correspondent à une surface de collecteur de 20 m² pour 1 cheval-vapeur, soit 30 m² par kW mécanique. Un certain nombre d'installations-pilotes de ce type ont déjà été réalisées dans de nombreux pays et peuvent satisfaire à certains besoins de régions éloignées de réseaux de distribution d'énergie. Un exemple pratique est le transport d'eau d'irrigation dans les vastes régions agricoles.

La troisième direction concerne la conversion d'énergie solaire en énergie électrique. Les méthodes appliquées, effets photo-électrique, thermo-électrique et thermo-électronique exposés plus haut ont été l'objet chacune d'essais au niveau d'une puissance récupérée de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de watts, suivant les cas. La toiture d'une maison familiale a, par exemple, été entièrement recouverte de cellules photo-électriques alimentant des batteries d'accumulation. Ou bien des miroirs de quelques mètres de diamètre ont concentré l'énergie solaire sur des dispositifs thermo-électrique et thermo-électronique. Actuellement le prix de ces dispositifs ne justifie leur utilisation que dans des situations bien particulières, par exemple pour l'alimentation de satellites et véhicules spatiaux. La recherche en laboratoire sur ces effets est activement poursuivie et il n'est pas exclu qu'à l'échéance d'une à deux décennies l'une des trois méthodes permettra tout d'abord d'alimenter les habitations des régions isolées, puis progressivement d'autres, sur une base économiquement attractive.

Peut-être l'énergie solaire pourra-t-elle à longue échéance fournir de cette manière un appoint à notre approvisionnement énergétique qui pourrait être intéressant. Pour caractériser ses possibilités, mentionnons cependant qu'à la consommation énergétique mondiale actuelle correspondrait grosso modo la captation de l'énergie solaire tombant sur l'Italie.

La quatrième direction, que je cite pour mémoire dans ce paragraphe, concerne la recherche de méthodes de synthèse photo-chimique, méthodes par lesquelles les radiations lumineuses transforment, sans passer par les phases thermique ou électrique, des molécules énergétiquement plus pauvres en molécules énergétiquement plus riches. Cette imitation en laboratoire du processus photo-synthétique des plantes constitue une accumulation d'énergie chimique. Cette recherche est toute récente et les possibilités de cette voie sont encore mal délimitées.

Energie de la fission

La découverte de la fission est déjà ancienne. Elle remonte à 1938 et est due aux physiciens allemands Hahn et Strassmann. Très vite, on put vérifier en laboratoire que la fission de l'uranium en deux fragments dégageait une énergie énorme, soit environ 23 000 kWh_{th} par gramme d'uranium détruit, et surtout que ce processus était accompagné de l'émission de plusieurs neutrons qui pourraient assurer la réaction en chaîne.

Depuis la mise en service, en 1942, du premier réacteur expérimental à fission sous la conduite de E. Fermi, recherche et développement ont permis de maîtriser impeccablement cette source d'énergie. Il est maintenant un fait désormais établi que l'énergie nucléaire peut être asservie pour produire de l'énergie électrique rentablement dans des réacteurs basés sur la fission de noyaux lourds. Le principe des centrales nucléaires de puissance (fig. 5) est analogue à celui des centrales conventionnelles au combustible fossile ; la seule différence essentielle réside dans le fait que la chaudière classique, où le combustible fossile est brûlé, est remplacée par le réacteur nucléaire, où un fluide primaire, gazeux ou liquide, est chauffé. Ainsi la chaleur de la fission dégagée dans les barreaux d'uranium par les produits de fission est extraite par un agent de refroidissement dans un circuit primaire, fermé, à partir duquel elle est transmise, au moyen d'un échangeur de chaleur, au cycle de vapeur alimentant le turbo-alternateur. La construction et l'exploitation de dizaines de réacteurs de puissance ont déjà permis de mettre en évidence la très grande sécurité de telles installations, une excellente sûreté de fonctionnement, ainsi que d'intéressantes performances économiques en centrales de plusieurs centaines de milliers de kW.

Plutôt que de poursuivre la description des mérites pratiques acquis et reconnus de ce développement, je vais m'attacher dans la suite à circonscrire les efforts qui restent à accomplir et leur motivation.

Nous avons reconnu dans l'introduction que seule la fission de l'uranium-235, isotope peu abondant, était actuellement maîtrisée et que, sur le plan de l'économie des matières premières énergétiques, il était indispensable que l'on parvienne, à partir du réservoir d'uranium-235, à convertir l'uranium-238 fertile en plutonium-239 fissile et le thorium-232 fertile en uranium-233 fissile. Pour ce faire, il s'agit de réaliser, dans un réacteur, des conditions telles que les neutrons supplémentaires non requis par le maintien de la réaction en chaîne soient absorbés dans l'uranium-238 ou le thorium-232 à transmuter. Il devrait être alors possible de produire, à partir d'une charge de combustible, plus de combustible fissile nouveau par transmutation des isotopes fertiles. Ceci équivaut au concept de surrégénération du combustible et introduit la notion de temps de doublement, c'est-à-dire le temps requis pour multiplier par deux l'inventaire de combustible fissile. Ainsi, pour tenir compte de l'expansion énergétique persistante, le physicien qui calcule le cœur de réacteurs surrégénérateurs, on dit aussi piles couveuses, se voit-il dicter la tâche de réaliser un temps de doublement du combustible d'un ordre relativement court, si possible une dizaine d'années environ.

Le départ étant assuré par la réserve d'uranium-235, on conçoit en principe deux cycles possibles de surrégénération pouvant se soutenir d'eux-mêmes et que nous allons très brièvement analyser (fig. 6).

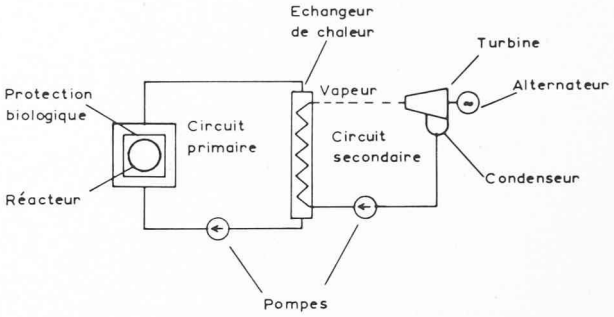
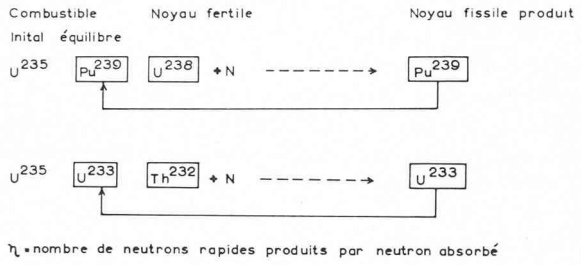


Fig. 5. — Schéma de principe d'une centrale nucléaire de puissance.

La constante nucléaire déterminante pour la surrégénération est le nombre moyen, appelé η, de neutrons produits par neutron absorbé dans le noyau fissile. Pour que la surrégénération soit possible, il faut que η soit supérieur à 2, de manière à laisser un neutron disponible pour la réaction en chaîne et plus d'un neutron pour la transmutation d'un noyau fertile en un noyau fissile. En fait, η doit être suffisamment supérieur à 2 pour laisser une marge à l'inévitable absorption parasitique de neutrons dans les matériaux structurels et pour couvrir les pertes de neutrons vers l'extérieur du réacteur dans la protection biologique.

Pour le cycle uranium-238 - plutonium-239, le plutonium produit est appelé à prendre le relai de l'uranium-235 et à sustenter lui-même le cycle qui le produit à partir de l'uranium-238. La valeur η du plutonium n'est suffisamment élevée, pour assurer une surrégénération, que si la réaction en chaîne est maintenue par des neutrons rapides. Le réacteur sera donc du type rapide, c'est-à-dire sans modérateur, au lieu de thermique, et la valeur de η, environ 2,9, laisse après soustraction du neutron nécessaire à la réaction en chaîne 1,9 neutron disponible pour l'absorption dans l'uranium-238 fertile, ainsi que pour l'absorption dans les matériaux structurels et les fuites vers l'extérieur. La question ici n'est donc pas si la surrégénération est possible, mais principalement si on peut extraire simultanément assez de puissance d'un cœur rapide nécessairement très compact pour rendre son exploitation intéressante et également de développer des procédés rentables pour le traitement chimique répété du combustible. Ce sont donc plutôt des problèmes de technologie des matériaux qui caractérisent cette voie du développement. Actuellement, trois réacteurs rapides de ce type sont en construction, un en exploitation et plusieurs à l'étude. Les spécialistes de ce développement situent le temps de doublement actuellement possible avec ce cycle autour de dix-huit ans et s'accordent pour admettre qu'il sera possible d'ici 1980 d'envisager sur une base intéressante l'amorçage du cycle uranium-plutonium à partir de l'uranium-235.

Toute autre est la situation pour le cycle thorium-232 - uranium-233. La valeur de η de l'uranium-233 pour les neutrons rapides, environ 2,5, n'est pas suffisamment supérieure à la valeur pour les neutrons thermiques, environ 2,25, pour compenser certains désavantages des



η = nombre de neutrons rapides produits par neutron absorbé

η	neutrons thermiques	neutrons rapides
U^{235}	2,07±0,02	2,2-2,45
Pu^{239}	2,03±0,02	env. 2,9
U^{233}	2,18 ? 2,31	env. 2,5

Fig. 6. — Cycles de surrégénération.

réacteurs rapides. Ainsi on tirera au mieux profit de ce cycle dans un réacteur thermique homogène à eau lourde, pour permettre les meilleures conditions d'utilisation des neutrons. Mais cette voie n'a pour ainsi dire pas encore dépassé le stade du laboratoire.

En effet, la valeur thermique de η est encore mal assurée. Une douzaine de mesures exécutées par des chercheurs différents et au moyen de méthodes diverses au cours des dix dernières années conduisent à des résultats distribués entre 2,18 et 2,31 avec des erreurs qui excluent même la consistance entre les méthodes. L'absorption la plus favorable de neutrons dans le système critique à l'eau lourde étant environ 0,16 et les fuites vers l'extérieur se chiffrant à quelques pour-cent, il faudrait une valeur de η au moins supérieure à peut-être 2,20-2,25 pour pouvoir assurer confortablement la surrégénération dans ce cycle. L'incertitude des résultats des mesures de η provient de deux sources. Tout d'abord, la quantité d'uranium-233 disponible est encore faible, étant donné que cet isotope ne se présente pas dans la nature et doit être produit dans un réacteur par la conversion du thorium-232. Si ceci limite provisoirement les possibilités expérimentales, le temps permettra de remédier à cette carence. La seconde raison, plus sérieuse, est que les résultats de diverses méthodes sont inconsistants entre eux et mettent en cause directement la validité de certaines méthodes ; de plus, les résultats obtenus dans les laboratoires américains tombent dans la moitié supérieure de la marge, alors que les résultats issus des laboratoires de Russie et de Grande-Bretagne tombent dans la moitié inférieure de la marge. Il faut espérer que l'invention de nouvelles méthodes de mesure ou la découverte d'erreurs dans les méthodes actuelles, ou finalement la construction d'un grand réacteur, permettra de supprimer l'état de perplexité qui caractérise ce secteur de la recherche et que l'optimisme des chercheurs américains l'emportera définitivement.

Un autre problème important pour ce cycle dérive des exigences de la surrégénération. C'est en effet dans les conditions du réacteur homogène que l'utilisation la plus favorable des neutrons est obtenue. La première solution qui se présente et qui fait l'objet d'un essai expérimental est celle du réacteur homogène aqueux. Elle soulève de nombreux et délicats problèmes de corrosion, étant donné que le combustible est dissous sous forme d'un sel dans l'eau lourde. Un sérieux effort reste encore à accomplir sous ce rapport.

La motivation énergétique pour la réalisation des conditions de surrégénération a déjà été expliquée dans l'introduction : les possibilités actuelles de la fission devraient être presque centuplées. Il est important, avant de quitter ce secteur, de mentionner et souligner que si un cycle de surrégénération est réalisable et si les ingénieurs chimistes et métallurgistes sont assez adroits pour tenir les frais de combustible très bas (la potentialité est là, puisque la production proprement dite de noyaux fissiles nouveaux dans le réacteur ne coûte rien), l'économie ainsi réalisée pourrait être mise à profit pour permettre l'extraction de minerais considérés actuellement inexploitables parce que trop pauvres en uranium et thorium. Dans cette perspective, la limite théorique extrême des ressources de la fission approche le niveau des possibilités de la fusion nucléaire.

Energie de la fusion

Les physiciens ont réalisé depuis plusieurs décennies déjà que l'énergie nucléaire pouvait en principe être gagnée non seulement par le processus de fission de noyaux lourds, mais aussi par le processus de fusion de noyaux légers. Ils ont en fait reconnu très tôt que l'énorme énergie contenue dans le soleil provenait en dernière analyse de la fusion de noyaux légers, dans le cycle du carbone par exemple, et que le soleil était en quelque sorte un énorme laboratoire permanent de fusion de noyaux légers. Le problème très difficile de réaliser dans nos laboratoires les conditions régnant à l'intérieur du soleil, c'est-à-dire des températures de l'ordre de centaines de millions de degrés, n'a cependant été abordé timidement, vu l'énormité du but, que vers 1950 à Oxford par le physicien Thonemann. Depuis, la recherche dans ce secteur s'est intensifiée dans tous les pays développés et est devenue, avec la physique des hautes énergies, un des champs de recherche les plus dynamiques et les plus complexes de la physique moderne.

Les réactions de base sont la fusion de deux noyaux de deutérium ou d'un noyau de deutérium avec un noyau de tritium, ces réactions étant exoergiques avec des chaleurs de réaction de plusieurs MeV (fig. 7). La concentration d'énergie de la fusion s'élève à environ 100 000 kWh_{th} par gramme de substance, et est donc environ quatre fois supérieure à celle de la fission. Comme nous l'avons vu dans l'introduction, l'énergie libérée par le processus de la fusion est susceptible de servir de source d'énergie primaire pour l'humanité, à partir du deutérium contenu dans la mer, pendant de nombreux siècles. Il n'est en outre pas exclu que d'autres noyaux légers abondants, tel le lithium, puissent être amenés à fusion. La fusion nucléaire a d'autre part l'avantage technique énorme qu'elle ne produit pas de résidus radio-actifs, de cendres radio-actives, comme cela est le cas avec les produits de la fission.

Les réactions de fusion se produisent lorsque les noyaux ont suffisamment d'énergie cinétique pour surmonter la barrière de répulsion électrostatique due à leurs charges positives. Ces conditions sont réalisées lorsqu'on confère aux corpuscules une agitation thermique correspondant à de très hautes températures.

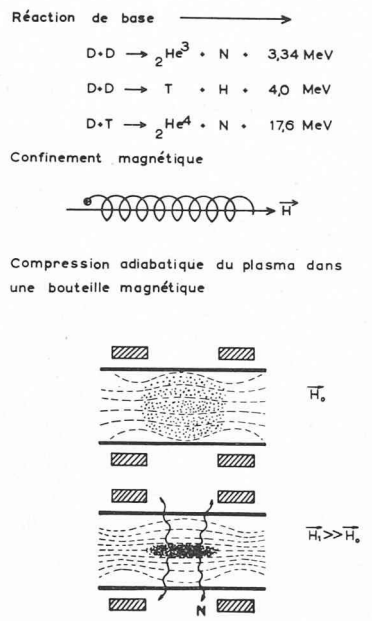


Fig. 7. — Fusion nucléaire.

On montre par le calcul que pour obtenir un processus auto-entretenu de fusion, il faut atteindre des températures allant de quelques dizaines de millions de degrés pour la réaction deutérium-tritium à quelques centaines de millions de degrés pour la réaction deutérium-deutérium. A ces températures, la matière est complètement ionisée et se trouve sous la forme d'un plasma de noyaux et d'électrons libres.

Ainsi, pour la réalisation d'une réaction thermonucléaire contrôlée, les problèmes de base consistent à :

— obtenir un plasma surchauffé de la substance fusible (cette opération s'appelle communément l'ignition ou l'allumage du plasma)

— et de contenir ce plasma suffisamment longtemps pour qu'une fusion appréciable puisse être obtenue (cette opération s'appelle le confinement du plasma).

Parmi les nombreuses méthodes expérimentales essayées pour obtenir un plasma surchauffé, mentionnons celle de la compression adiabatique du plasma dans une bouteille magnétique, qui a déjà permis de substantiels progrès dans l'étude fondamentale de la physique du plasma.

Avec l'étude du plasma, le chercheur a ouvert une discipline de recherche entièrement nouvelle. Les phénomènes qui accompagnent ce nouvel état de la matière se situent bien au-delà de la frontière de nos connaissances actuelles. D'une part les difficultés fondamentales rencontrées dans ce domaine appellent le développement de théories inédites pour la description des propriétés de cet état, théories qui sont désormais groupées dans une nouvelle branche de la physique théorique : la magnétohydrodynamique. Sur le plan expérimental également, un problème clé est celui du diagnostic : il s'agit d'élaborer des techniques et des instruments capables d'analyser, dans des conditions expérimentales inédites, les caractéristiques de ces phénomènes d'une manière qui en rende possible l'interprétation. Par exemple, la mesure de températures très élevées, de la densité du plasma, du courant électrique et du champ magnétique à l'intérieur du plasma sont des problèmes entièrement nouveaux.

Même si le but final de la fusion thermonucléaire n'a pas encore été atteint, on peut dire que les travaux exécutés depuis dix ans ont permis d'accroître substantiellement nos connaissances générales sur la physique des plasmas et la magnétohydrodynamique. Des températures de plusieurs millions de degrés ont été obtenues et des bouffées de neutrons issus des réactions de fusion ont été enregistrées. Il reste cependant un très long effort de recherche à accomplir dans le laboratoire avant que le chercheur puisse donner à l'ingénieur les éléments fondamentaux indispensables pour développer un prototype de réacteur à fusion avec récupération de l'énergie. Plusieurs décennies peuvent encore s'écouler avant que nous ayons la certitude que l'immense source d'énergie de la fusion pourra être mise au service de l'humanité.

Conclusion

La croissance rapide de la recherche fondamentale, génératrice de la recherche appliquée et du progrès industriel, est une caractéristique essentiellement nouvelle et propre au siècle dans lequel nous vivons. Dans le domaine de la découverte et du captage de nouvelles sources d'énergie, elle a ouvert des horizons insoupçonnés et laisse entrevoir que l'homme va prendre, le siècle prochain, possession intégrale des moyens naturels du globe, en parvenant à brûler le roc par la fission nucléaire, la mer par la fusion nucléaire et en asservissant l'énergie solaire. La maîtrise de ces sources d'énergie n'est pas un but en soi, mais un moyen indispensable au développement industriel, soit la condition du processus d'industrialisation qui est la source du confort matériel de l'humanité. Par ce fait même, la maîtrise des sources d'énergie définit aussi les limites de ce développement industriel et du confort matériel. Force est de constater sous ce rapport que le processus d'expansion qui a débuté il y a quelques milliers d'années et qui s'est accéléré il y a quelques siècles avec la naissance de l'industrialisation, ira culminer un de ces prochains siècles en la possession complète des possibilités de notre support terrestre.

BIBLIOGRAPHIE

L'électronique dans les appareils de contrôle nucléaire, par *Georges Nicolo*, docteur de l'Université de Paris, ingénieur au Commissariat à l'énergie atomique. Les Editions Eyrolles, Paris. — Un volume 16 × 25 cm, 526 pages, 433 figures, nombreux tableaux. Prix : relié, 112 fr. 30.

L'emploi de l'électronique dans la production et le contrôle de l'énergie nucléaire est d'une telle importance qu'il a paru nécessaire de mettre à la disposition des ingénieurs et chercheurs intéressés un ouvrage traitant du fonctionnement des circuits de contrôles des réacteurs nucléaires. Le rôle de ces circuits est, en effet, déterminant pour assurer la continuité d'un programme de recherche.

Le premier chapitre de cet ouvrage est constitué par un rappel des notions de physique nucléaire qui sont nécessaires pour la compréhension des phénomènes dont l'électronique permet de mesurer certaines caractéristiques.