L'énergie nucléaire face à l'alimentation en électricité des engins spatiaux

Autor(en): **Vermeille, François**

Objekttyp: **Article**

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

Band (Jahr): **91 (1965)**

Heft 6

PDF erstellt am: **24.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-67653

Nutzungsbedingungen

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

Haftungsausschluss

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

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

http://www.e-periodica.ch

91e année Lausanne, 20 mars 1965 N° 6

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, 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. 40.—	Etranger	Fr. 44.—
Sociétaires	»	» 33.—		
Prix du numéro	»	» 2.—	»	» 2.50

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. 385.—
1/2 »	» 200.—
1/4 »	» 102.—
1/8 »	» 52.—

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

SOMMAIRE

L'énergie nucléaire face à l'alimentation en électricité des engins spatiaux, par François Vermeille, ingénieur dipl. EPUL.
Bibliographie. — Les congrès. — Carnet des concours.
Documentation générale. — Documentation du bâtiment. — Nouveautés, informations diverses.

L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE FACE À L'ALIMENTATION EN ÉLECTRICITÉ DES ENGINS SPATIAUX

par FRANÇOIS VERMEILLE, ing. dipl. EPUL, collaborateur de Bonnard & Gardel, ingénieurs-conseil, Lausanne

Introduction

D'importantes recherches sont actuellement en cours pour mettre au point des générateurs d'électricité utilisant l'énergie nucléaire. Il en est qui bénéficient d'une aide exceptionnelle, alors qu'elles ne s'appliquent qu'à un domaine d'utilisation restreint. Certes, les buts poursuivis expliquent aisément l'ampleur de cette aide, quand on sait qu'il s'agit de réaliser des sources d'énergie destinées à alimenter les appareils équipant les satellites terrestres et, prochainement, les laboratoires spatiaux qui s'en iront explorer nos planètes. Toutefois, l'aspect des applications pacifiques auxquelles de telles sources peuvent également se prêter, n'échappera à personne. Les satellites sont aussi capables, on l'a vu, de relayer les télécommunications intercontinentales, alors que des sources de longue durée de vie sont les bienvenues pour desservir des stations météorologiques isolées ou des bouées maritimes, pour ne citer que deux exemples.

Nous nous proposons, dans cet article, de faire le point des recherches qui ont trait à la réalisation de sources produisant de l'électricité à partir de l'énergie nucléaire et destinées à l'alimentation des engins spatiaux. Il est évident qu'il n'y a pas que l'énergie nucléaire qui puisse satisfaire les besoins en électricité de ces engins et que d'autres formes d'énergie primaire sont également envisageables.

Cet article sera donc divisé en trois chapitres. Le premier examinera le problème général de l'alimentation en électricité des engins spatiaux et les divers moyens de le résoudre. Les mérites de l'énergie nucléaire étant alors clairement démontrés, le deuxième chapitre traitera des petits générateurs nucléaires d'électricité, alors que le troisième donnera quelques exemples de réalisations pratiques en se référant au programme américain de recherches, intitulé SNAP (Systems for Nuclear Auxiliary Power).

I. L'alimentation en électricité des engins spatiaux

1. *Puissances et durées de fonctionnement requises*

Pendant les premières années de l'ère spatiale, seules des puissances de quelques watts, disponibles pendant quelques jours ou semaines, furent requises pour alimenter des satellites tels que les Explorer, Vanguard, Pionier. Les projets suivants exigèrent déjà des sources de puissance supérieure, de l'ordre de cent watts, qui devaient être à même d'alimenter les appareils électroniques pendant une durée de quelques mois à une année. Ce fut le cas des projets Ranger, Surveyor, Prospector.

Actuellement, les satellites Tiros et Transit sont équipés d'appareils dont la puissance s'élève à un kilowatt environ et qu'il s'agit d'alimenter pendant une année au moins. Dans un avenir très proche, l'exploration planétaire va réclamer des puissances nettement plus élevées qui varieront entre cent kilowatts et dix mégawatts. Il s'agira en effet de subvenir aux besoins électriques des laboratoires entièrement télécommandés qui seront largués sur la lune puis, par la suite, des vaisseaux spatiaux habités.

On constate donc que l'on tend vers des puissances de plus en plus grandes devant être à disposition pendant des périodes de durée croissante. Cette tendance est due à deux raisons. La première est évidente : l'exploration spatiale s'applique à des objectifs toujours plus éloignés de la terre. La seconde est que, le lancement d'un satellite étant de loin l'opération la plus coûteuse, on préfère diminuer leur nombre et prolonger leur durée de vie, en augmentant simultanément le nombre d'observations qu'un même engin est en mesure de faire.

Enfin, il est prévu d'appliquer un jour l'électricité à la propulsion des fusées spatiales, de telle sorte que l'on se préoccupe déjà de trouver les sources d'énergie qui seront alors nécessaires.

2. *Exigences propres aux engins spatiaux*

Il en coûte de 10 000 à 30 000 dollars pour placer un kilo de matière sur une orbite terrestre. Ce chiffre suffit à justifier que les sources d'énergie équipant les satellites soient aussi légères que possible. Celles-ci doivent également présenter un volume restreint afin de libérer le maximum de place au profit des appareils d'observation.

Il est inutile d'insister sur la sécurité absolue que doit présenter le fonctionnement des sources d'énergie placées à bord d'engins spatiaux. Qu'on y parvienne est d'autant plus méritoire que de tels générateurs d'électricité démarrent généralement automatiquement sous pleine charge, lorsque le satellite a été placé avec succès sur son orbite. Ces générateurs doivent ensuite fonctionner de manière permanente sans possibilités d'entretien et délivrer exactement la puissance demandée. Cela oblige d'une part à éliminer autant que possible les risques d'incidents mécaniques en limitant le nombre de pièces mobiles et d'autre part à assurer un réglage initial soigné.

Il existe en outre trois conditions particulières aux satellites qui ne facilitent pas les choses : l'absence de pesanteur, l'apparition de fortes accélérations au moment du lancement, le déplacement dans le vide. Cette

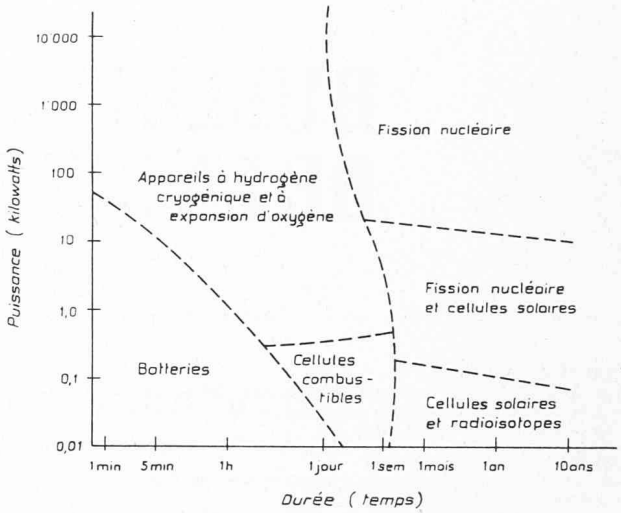

Fig. 1. — Domaines d'application de diverses sources d'énergie.

dernière condition a une influence directe sur le choix des températures du système. Tout système thermodynamique a besoin d'une source chaude et d'une source froide. Dans l'espace, celle-ci ne peut être que l'espace lui-même, de telle sorte que la chaleur devra être dissipée par radiation. Par conséquent, le système devra fonctionner à une température aussi élevée que le permet l'état actuel de la technique, afin de réduire le poids et les dimensions du radiateur.

Mentionnons enfin deux circonstances, l'une technique, l'autre politique, qui viennent aggraver les difficultés. La première est que tout dispositif destiné à fonctionner dans l'espace ne pourra jamais être essayé au sol dans ses véritables conditions de fonctionnement. La seconde est que les recherches spatiales se déroulent dans un climat de compétition où chaque année ou même chaque mois d'avance procurent un accroissement de prestige considérable. Il s'ensuit que, pour tout ce qui a trait aux satellites, il convient d'utiliser au maximum les moyens éprouvés dont on dispose déjà et d'exclure d'emblée toutes les solutions qui exigent des recherches de trop longue durée. Ou alors, si l'on s'arrête à de nouvelles solutions, elles ne pourront être expérimentées que pendant peu de temps et imparfaitement, le reste des essais s'effectuant avec le satellite lui-même.

3. *Sources d'énergie envisageables pour un satellite*

Le problème est donc clairement posé : construire une source d'électricité de puissance donnée susceptible de fonctionner continuellement pendant un temps fixé en offrant toutes les garanties mentionnées plus haut. Parmi les diverses sources d'énergie, quatre peuvent être retenues en vue d'une utilisation spatiale. Ce sont :

— les batteries électriques conventionnelles
— les cellules combustibles (fuel cells)
— les cellules solaires
— les systèmes nucléaires

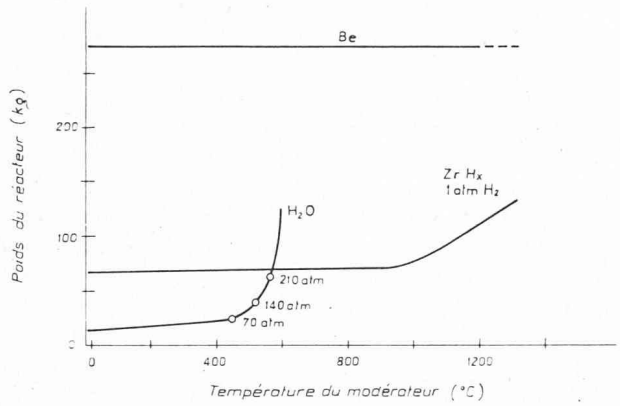

Fig. 2. — Comparaison quantitative de divers modérateurs en fonction de leur température, pour un réacteur dont la masse critique serait de 5 kg d'uranium 235.

Les domaines d'application respectifs de chacune de ces quatre sources ressortent de la figure 1 où l'on tient compte à la fois de la puissance et de la durée de fonctionnement. On y voit immédiatement pourquoi l'on s'en est tiré jusqu'à présent grâce aux moyens conventionnels et pourquoi, sous l'effet de l'accroissement de la puissance ou de la durée, ou même des deux simultanément, on sera obligé tôt ou tard de recourir à l'énergie nucléaire.

Revenons à la figure 1 ; le seul concurrent de l'énergie nucléaire est, dans certaines limites, l'énergie solaire. Or, l'intérêt de prime abord séduisant des cellules solaires se réduit considérablement si l'on rappelle deux faits :

— l'intensité de l'énergie solaire étant variable, il se pose des problèmes de conservation d'énergie. Cela exclut d'emblée les cellules solaires pour les laboratoires qui seront largués sur la lune et qui devront fonctionner sans interruption malgré des nuits de « 14 jours » ;

— la ceinture de radiation de Van Allen perturbe considérablement l'absorption d'énergie solaire par les cellules. On constate qu'une dose absorbée de $5 \cdot 10^{13}$ électrons/cm² amène une forte réduction de la puissance fournie par les cellules. Un satellite soumis pendant cinq ans à ces radiations absorberait environ 10^{15} électrons/cm² de telle sorte qu'il faudrait munir les cellules de filtres malheureusement très lourds. En outre, de tels filtres ont l'inconvénient de devenir opaques à la lumière ultraviolette et de diminuer par conséquent la puissance fournie par les cellules, alors qu'ils devraient précisément tendre à la conserver à sa valeur initiale. Ce problème n'est pas résolu pour l'instant.

Ces restrictions apportées à l'usage des cellules solaires laissent l'énergie nucléaire seule capable de résoudre le problème de l'alimentation en énergie électrique des prochains engins spatiaux. On a alors le choix, comme source de chaleur, entre la fission et la désintégration d'isotopes radioactifs. La conversion peut ensuite s'effectuer directement ou indirectement.

II. Les petits générateurs nucléaires d'électricité

1. *La fission en tant que source de chaleur*

Il s'agit tout simplement de réacteurs de petites dimensions, pour l'instant uniquement de réacteurs à neutrons thermiques, les réacteurs à neutrons rapides étant provisoirement écartés en raison de leur prix élevé et de leur technologie moins développée. Les dimensions de tels réacteurs diffèrent selon les types de modérateur et de combustible. Le combustible est généralement de l'uranium 235 mélangé de manière homogène avec le modérateur, cette disposition tendant à minimiser le poids.

Le réflecteur, s'il y en a un, est en béryllium, car celui-ci résiste bien aux températures élevées et a un bon pouvoir réfléchissant. Etant donné les petites dimensions des réacteurs destinés aux usages spatiaux, près de 40 % de tous les neutrons produits par la fission quittent le cœur à cause des fuites. Ainsi, des modifications dans l'efficacité du réflecteur influencent considérablement le bilan de neutrons, propriété mise à profit pour assurer le contrôle du réacteur par variation de l'épaisseur du réflecteur.

Le problème du réfrigérant est lié à celui de la conversion d'énergie et sera traité plus loin ; mais disons déjà que les métaux liquides sont les seuls réfrigérants compatibles avec les exigences de faible poids et haute température.

Les modérateurs les plus communément utilisés sont, dans l'ordre où ils entraînent une augmentation de taille du réacteur : l'eau légère, le béryllium, l'oxyde de béryllium, l'eau lourde et enfin le graphite. La modération avec l'eau donne les températures à l'intérieur du réacteur les plus faibles, mais au-dessus de 320 à 380°C, la pression nécessaire pour éviter l'ébullition rend la cuve pressurisée trop lourde. Des métaux hydrogénés peuvent fournir des densités comparables à celle de l'eau froide ($6{,}7 \cdot 10^{22}$ atomes d'hydrogène/cm³) et permettent ainsi de conserver pour le réacteur les mêmes dimensions que s'il était modéré avec de l'eau à température élevée, mais sans forte pression. Le zirconium hydrogéné, par exemple, est stable jusqu'à 650°C environ. La figure 2 montre que, pour un réacteur dont la masse critique serait formée de 5 kg d'uranium 235, un modérateur hydrogéné (de formule $Zr\,H_x$) donne le réacteur le plus léger au-dessus de 500°C.

2. *La désintégration de radio-isotopes en tant que source de chaleur*

Il existe de nombreux isotopes radioactifs susceptibles de servir de source de chaleur dans une petite source d'électricité. La plupart d'entre eux sont soit des produits de fission de l'uranium, soit des éléments obtenus en irradiant des matériaux convenablement choisis par des neutrons thermiques dans un réacteur nucléaire.

Les noyaux de ces corps qui sont instables, subissent des désintégrations spontanées au cours desquelles sont éjectées des particules α (noyaux d'hélium) ou des particules β (électrons) ; ces désintégrations s'accompagnent souvent de l'émission de rayons γ (rayonnement électromagnétique de haute fréquence). L'énergie cinétique des particules éjectées est dissipée dans le milieu absorbant et apparaît sous forme de chaleur.

La puissance rayonnée par un radio-élément décroît en fonction du temps selon une loi exponentielle. La figure 3 donne l'activité en curies [1] en fonction de la puissance, selon qu'il s'agit de désintégration α ou β.

[1] 1 curie = $3{,}7 \cdot 10^{10}$ désintégrations par seconde.

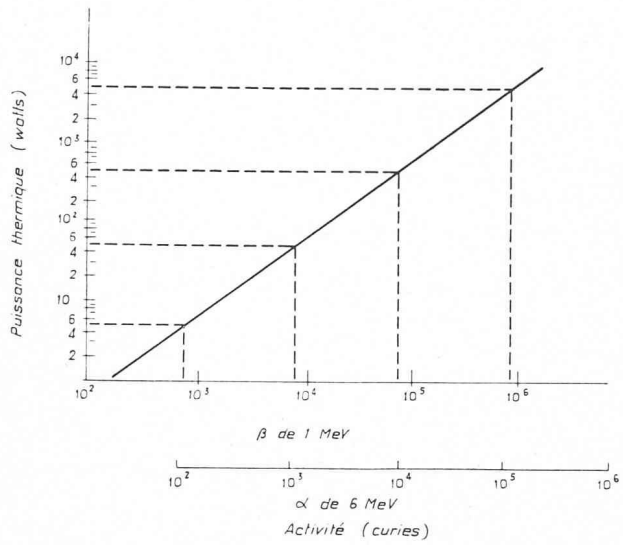

Fig. 3. — Activité en fonction de la puissance pour des rayonnements α de 6 MeV et β de 1 MeV.

La puissance fournie par une source utilisant la désintégration de radio-isotopes décroît également au cours du temps, alors que la puissance demandée par les appareils reste généralement constante. Il est donc nécessaire de prévoir un réglage tel que la puissance fournie à l'utilisateur reste constante.

Deux facteurs déterminent le choix des radio-éléments comme sources de chaleur : la puissance spécifique (watts par gramme) et la période de désintégration.

Les corps de très longue période apparaissent moins intéressants puisque leur puissance spécifique est trop faible. En général, un radio-isotope est utilisé sous forme de composé contenant une certaine proportion d'éléments stables, ce qui rend la puissance spécifique inférieure à celle correspondant au radio-isotope pur. Le tableau 1 donne la liste et les caractéristiques d'un certain nombre de corps radioactifs utilisables comme sources de chaleur.

On notera dans ce tableau les deux corps émetteurs de particules α qui possèdent une grande puissance spécifique : le polonium 210 et le curium 242. Le premier s'obtient en irradiant du bismuth dans un réacteur. Le curium 242, obtenu à partir de l'américium 241, présente l'avantage d'avoir une remarquable stabilité à haute température (jusqu'à 1000°C) ; de plus l'énergie relativement faible des γ permet de réduire le blindage. En raison de leur période, ces deux corps sont destinés à des missions de courte durée.

Tableau 1

Caractéristiques des radio-isotopes

Radio-isotope	Type de désintégration	Période de désintégration	Composés utilisés	Densité g/cm³	Puissance spécifique thermique watts/cm³	Radio-activité spécifique curies/watts
Po 210	α	138 jours	métal	9,3	1320	31,2
Cm_2 242	α	162 jours	$Cm_2\,0_2$	11,75	1169	27,2
Pu 238	α	86,4 ans	Pu C	12,5	6,9	30,3
Ce 144	β	285 jours	Ce 0_2	6,4	12,5	128
Pm 147	β	2,6 ans	$Pm_2\,0_3$	6,6	1,1	2700
Cs 137	β	33 ans	Cs Cl	3,9	1,27	320
Sr 90	β	28 ans	Sr Ti 0_3	4,8	0,54	153
Ru 106	β	1 an	métal	12,2	3,54	—

Les radio-isotopes émetteurs de particules β indiqués dans le tableau 1 ont une puissance spécifique beaucoup plus faible. Par contre, leur période est particulièrement longue et, compte tenu des considérations économiques actuelles relatives aux prix et aux facilités de fabrication, ils apparaissent pour l'instant plus avantageux.

En ce qui concerne la protection contre les radiations, le blindage est plus simple pour les particules α, bien que le problème soit malgré tout délicat à cause des réactions que produisent les neutrons dans certains matériaux à nombre atomique faible, tels que le bore, la fluorine ou l'azote. Quant au blindage contre les particules β, il dépend essentiellement des radiations de freinage (Bremsstrahlung).

Puisque l'on parle de sécurité, il est bien évident que les problèmes de confinement de la source radioactive sont examinés avec soin, eu égard notamment aux conditions spéciales qui caractérisent les satellites :

— risque d'échec de mise sur orbite
— corrosion
— pressions internes et externes
— retour dans l'atmosphère

Ces problèmes sont, pour la plupart des projets futurs, entièrement résolus.

3. *Conversion indirecte de l'énergie nucléaire en électricité*

La conversion indirecte de l'énergie nucléaire en électricité, à bord d'un satellite, ne pose pas de problèmes nouveaux, du point de vue des principes. Il s'agit principalement de miniaturiser l'équipement classique d'une centrale nucléaire ordinaire ; les difficultés sont d'ordre technologique.

Ainsi que nous l'avons déjà mentionné plus haut, il est judicieux de travailler avec des températures aussi élevées que possible afin de limiter le poids du radiateur. Celui-ci devient en effet, à partir de puissances d'un kilowatt, l'organe le plus lourd et le plus grand de tout le système de production d'électricité. La surface du radiateur est inversement proportionnelle à la quatrième puissance de la température de celui-ci. Or, pour une même température maximale du cycle, la surface du radiateur relative au cycle de Rankine (turbine à vapeur, changement de phase) est plus petite que celle résultant du cycle de Brayton [1] (turbine à gaz, sans changement de phase).

Il existe une seconde raison qui justifie l'emploi de radiateurs de petites dimensions. Leur protection contre les météorites introduit un accroissement de poids qui n'augmente pas proportionnellement avec leur surface mais beaucoup plus rapidement, à cause de la plus forte probabilité qu'a un grand radiateur d'être atteint par un météorite.

Dans ces conditions, le paramètre principal, d'après lequel il convient de choisir le réfrigérant, est la surface minimale de radiateur nécessaire pour rayonner l'unité de puissance. La figure 4 représente les valeurs de ce paramètre pour trois réfrigérants : l'eau légère, le mercure et le rubidium. Ces valeurs ont été calculées en admettant que le rendement pratique du cycle valait le 40 % de celui du cycle théorique de

[1] Aussi appelé cycle de Joule.

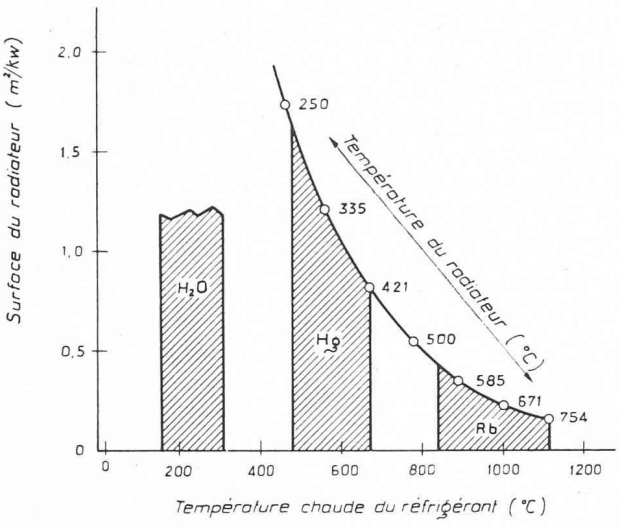

Fig. 4. — Surface de radiateur nécessaire pour dissiper 1 kilowatt en fonction de la température « chaude » du réfrigérant. Les hachures indiquent les domaines d'application des trois réfrigérants.

Carnot et que la plus petite surface de radiateur était obtenue avec une température froide du cycle égale aux $^3/_4$ de la température chaude.

Cette figure met en évidence l'importance que présentent les métaux liquides, ou même les métaux à l'état de vapeur, dès qu'il s'agit de températures de l'ordre de 1000°C. Malheureusement, on ne dispose que de peu d'information sur leurs propriétés thermodynamiques à de telles températures, notamment en ce qui concerne les phénomènes de condensation, d'ébullition, de transfert de chaleur et de corrosion. Et l'on possède encore moins d'indications sur l'évolution de ceux-ci en l'absence de pesanteur.

Le choix du réfrigérant étant accompli, les difficultés qui subsistent sont d'ordre constructif, mais ce ne sont pas les moindres. Pompes et turbines doivent présenter une sûreté de fonctionnement absolue, quand bien même elles travaillent à des températures très élevées et avec des fluides dont les propriétés sont mal connues. La réalisation du condenseur est particulièrement compliquée, du fait qu'il est intimement lié au radiateur et que celui-ci est partie intégrante de l'enveloppe du satellite.

4. *Conversion directe de l'énergie nucléaire en électricité*

La conversion directe de l'énergie nucléaire en électricité est une solution prometteuse pour l'alimentation des satellites. En supprimant l'intermédiaire mécanique, elle permet de gagner du poids et de diminuer les risques d'avarie. Elle élimine en outre les vibrations qui sont inévitablement liées à la présence de masses tournantes et agissent défavorablement sur la stabilité des satellites.

Parmi les divers procédés de conversion directe, deux paraissent pour l'instant se prêter assez bien à la production d'électricité à bord de satellites. Il s'agit des procédés utilisant l'effet thermo-électrique ou l'effet thermo-ionique.

La conversion directe par procédé thermo-électrique s'applique aussi bien aux sources de chaleur utilisant la fission (réacteur) qu'à celles qui emploient la désintégration (radio-isotopes). Le problème du rendement de transfert de la chaleur dans un réacteur est de la première importance. Il est préférable d'utiliser un fluide de grande capacité calorifique pour véhiculer la chaleur jusqu'au dispositif de conversion thermo-électrique. Pour diminuer le poids et l'encombrement de l'ensemble réacteur — convertisseur, on peut utiliser le mode de transfert de la chaleur par rayonnement. Dans ce cas, il est indiqué d'adopter la configuration sphérique du système. Le réacteur serait situé au centre et fournirait des quantités égales d'énergie aux jonctions chaudes des thermo-éléments recouvrant le collecteur sphérique ; les jonctions froides seraient en contact thermique avec le radiateur, également de forme sphérique.

On peut par contre concevoir un autre système où la chaleur développée dans le réacteur est transportée au système échangeur-convertisseur par un fluide de grande capacité calorifique (sodium surchauffé). L'énergie non convertie est transmise à un fluide de refroidissement et évacuée dans l'espace par le radiateur. Le système échangeur-convertisseur est constitué par un ensemble de tubes concentriques équipés de thermo-éléments. La figure 5 représente une unité échangeur-convertisseur composée de matériaux thermoélectriques interposés entre deux tubes concentriques. Le tube interne, en bon contact avec les jonctions chaudes, reçoit la chaleur à partir du fluide primaire dont le mouvement est commandé par une pompe électromagnétique. La chaleur non convertie est rejetée aux jonctions froides en contact thermique avec le tube externe. Sur ce tube sont branchés des tuyaux dans lesquels circule un fluide de refroidissement qui évacue les calories dans l'espace par l'intermédiaire du radiateur revêtu d'une couche de matériau de grand pouvoir émissif.

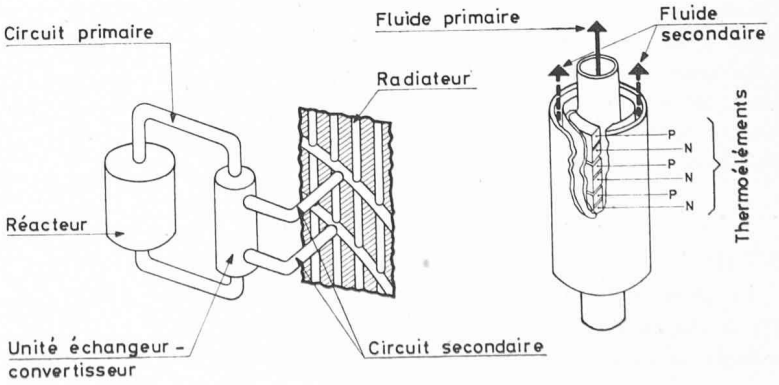

Fig. 5. — A gauche : réacteur avec une unité échangeur-convertisseur raccordée au radiateur.
A droite : détail de l'unité échangeur-convertisseur.

S'il s'agit d'une source de chaleur utilisant la désintégration, la meilleure utilisation de l'énergie est obtenue en prévoyant une surface faible pour la source et en la recouvrant de très nombreux thermo-éléments ; on réduit ainsi les pertes par isolation thermique. Deux configurations de la source sont alors à considérer : formes cylindrique ou sphérique. Les thermo-éléments couvrant la surface de la source seront disposés radialement ; ils seront taillés de façon que la section de la jonction chaude soit inférieure à celle de la jonction froide. Pour une puissance spécifique donnée, la configuration sphérique apparaît plus avantageuse, parce qu'elle donne une surface minimale de la source, ce qui permet d'obtenir une densité maximale de calories. La perte par isolation thermique est proportionnelle à la surface moyenne de matériau isolant et, dans le cas d'une source sphérique, elle croît linéairement avec le carré du rayon de la source.

Parmi les matériaux thermo-électriques envisageables, les composés intermétalliques de plomb, de mercure, de bismuth et de thallium, qui sont des éléments de poids atomique élevé, donnent des possibilités intéressantes. A l'heure actuelle, les meilleurs thermo-éléments sont le tellurure de bismuth et le tellurure de plomb. Des solutions solides telles que Pb Te + Pb Se, ou à base de tellurure de bismuth comme Bi_2 Te_3 + Sb_2 Te_3 méritent également d'être prises en considération.

En général, les matériaux thermo-électriques sont de nature fragile, résistent peu à la traction mais sont par contre doués d'une grande résistance à la compression. Il faut tenir compte de ce fait pour compenser les forces de dilatation thermique par des forces de compression. Le vide permet de réduire les pertes par isolation thermique ; par contre, aux hautes températures, il pourrait présenter l'inconvénient d'augmenter la tension en vapeur des matériaux.

III. Les réalisations pratiques : les SNAP

On a donc le choix, lors de la construction d'un générateur nucléaire d'électricité, entre quatre combinaisons :

a) désintégration — conversion indirecte
b) désintégration — conversion directe
c) fission — conversion indirecte
d) fission — conversion directe

Chaque combinaison a été expérimentée dans le programme américain SNAP, dont l'exécution a débuté en 1955. Les SNAP utilisant la désintégration y sont désignés par des nombres impairs, tandis que ceux qui recourent à la fission le sont par des nombres pairs. Comme on s'en rendra compte, le nombre des réalisations n'est pas égal dans les deux cas. En outre, la numérotation n'est pas toujours faite dans un ordre suivi, ne serait-ce que parce que certains projets intéressent la défense nationale et que leur existence n'est pas dévoilée au public.

1. *SNAP à désintégration*

SNAP 1

Le premier de la série des SNAP à désintégration a été étudié en 1957 et, à ce moment-là, l'état de la technologie n'autorisait qu'une conversion indirecte de l'énergie nucléaire en électricité, par l'emploi d'une turbine et d'un alternateur. Le SNAP 1 utilise la désintégration du cérium 144 qui est contenu dans un cylindre de 30 cm de hauteur et 10 cm de diamètre. Le réfrigérant est du mercure liquide qui transmet sa chaleur à un circuit secondaire par l'intermédiaire d'un échangeur. Aucun système auxiliaire n'a été prévu pour pomper le fluide de réfrigération ou pour lubrifier les paliers, ceux-ci l'étant par le mercure lui-même. La puissance électrique de SNAP 1 est de 500 watts et sa durée de vie de 60 jours.

SNAP 3

Le SNAP 3 est le premier de la combinaison d'une source radioactive et de thermo-éléments. Expérimenté en janvier 1959, son cœur est constitué d'un container métallique cylindrique en molybdène contenant du polonium 210, d'une activité initiale de 3000 curies. Des thermocouples au nombre de 27, connectés en série, sont en contact thermique avec le container, et disposés radialement suivant six rangées (fig. 6). Les jonctions froides sont en contact avec une enveloppe en aluminium de grande surface destinée à rayonner la chaleur dans l'espace.

Le matériau thermo-électrique utilisé est du tellurure de plomb. Les éléments de type P sont uniformément dopés de radium, tandis que ceux du type N, dopés de bismuth, possèdent deux régions de concentration électronique différente. Compte tenu des limitations géométriques et mécaniques, la surface extérieure de la source nucléaire est couverte de thermo-éléments à 26 % seulement. Les jonctions chaudes sont isolées électriquement du container par des feuilles de mica ; un revêtement d'une couche d'alumine sur la surface intérieure de l'enveloppe d'aluminium permet d'assurer un isolement électrique par rapport aux jonctions froides. La température atteint 590°C au maximum pour les jonctions chaudes et 200°C pour les jonctions froides.

Il est significatif de noter que le rendement de conversion du SNAP 3 reste sensiblement constant pendant une durée qui est de l'ordre d'une période de désintégration du radio-élément. Cela s'explique par le fait que le facteur de mérite des thermo-éléments utilisés augmente quand la température diminue et que cet accroissement est à peu près compensé par la décroissance du rendement de Carnot.

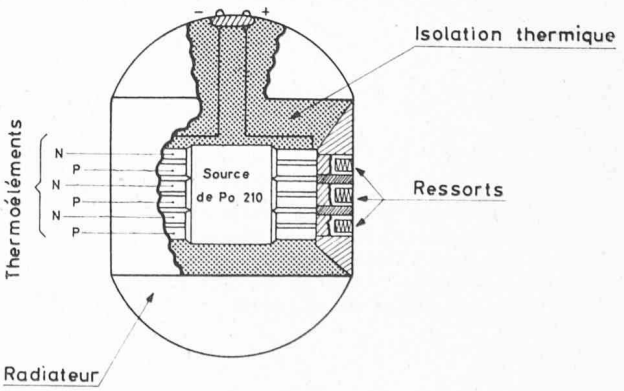

Fig. 6. — Coupe schématique du SNAP 3.

Le SNAP 3 a été soumis à une série impressionnante d'essais. Pendant près de 2600 heures de fonctionnement, diverses conditions d'exploitation ont été simulées : vibrations, chocs répétés, accélérations dans les trois plans, températures élevées (jusqu'à 3300°C), surpressions, etc.

Les résultats de ces multiples essais ayant prouvé que le SNAP 3 pouvait être affecté en toute sûreté à des missions spatiales, une version légèrement différente a été mise au point pour servir de source d'énergie à bord des satellites TRANSIT 4A et TRANSIT 4B, lancés respectivement les 29 juin et 15 novembre 1961. Ces deux premiers générateurs nucléaires de l'espace avaient la forme d'un sphéroïde allongé. A l'encontre de leur prototype SNAP 3, leur combustible était du plutonium 238, dont la période de désintégration a l'avantage d'être supérieure à celle du polonium 210. La surface extérieure du sphéroïde était recouverte d'une couche de céramique blanche, afin de réfléchir les rayons solaires et d'améliorer les qualités du radiateur.

SNAP 1A

Le succès du SNAP 3 a incité les constructeurs du SNAP 1 à reprendre leur projet en y remplaçant le système de conversion indirecte par celui qui avait été éprouvé dans le SNAP 3. Le SNAP 1A utilise, comme le SNAP 1, du cérium 144 dont l'activité initiale est de 800 000 curies. La chaleur est transmise aux jonctions chaudes des thermo-éléments à l'aide de vapeur de mercure.

Le SNAP 1A est un cylindre avec des extrémités en hémisphères. Le combustible est contenu dans un cylindre entouré d'un blindage de mercure liquide de deux tonnes qui est évacué par gravité, juste avant le lancement du satellite. Le rendement du système thermo-électrique est de 6,75 %, alors que le rendement total du générateur est de 4,7 %. La température maximale est de 843°C pour la jonction chaude et 168°C pour la jonction froide.

SNAP 7

On citera pour mémoire la série des SNAP 7, qui a été conçue pour des applications terrestres et dont on dit qu'ils sont pour les SNAP ce qu'a été le modèle T pour la production des automobiles Ford. Les objectifs étant évidemment différents, il s'agit d'appareils beaucoup plus lourds, pesant entre 3,6 et 9,2 tonnes. Plusieurs unités, repérées à l'aide des lettres A à E, équipent actuellement des bouées maritimes ou des stations météorologiques situées dans des régions d'accès difficile. Leur puissance est de 7,5 watts (E), 10 watts (A et C) ou 60 watts (B et D). Toutes ces unités utilisent du strontium 90 comme source radioactive et leur rendement est de 5 % pour l'ensemble de l'appareil. Les prix d'un SNAP de 60 W et d'un SNAP de 10 W sont respectivement de 475 000 fr. et 325 000 fr. non compris le coût du combustible. Pour celui-ci, il faut compter entre 950 000 fr. et 1 500 000 fr. pour 60 W, et entre 170 000 fr. et 260 000 fr. pour 10 W, mais on peut s'attendre à une baisse de 90 % dès que l'usine de fabrication isotopique de Hanford sera mise en service.

SNAP 9A

A la suite de l'excellent comportement des SNAP équipant les satellites TRANSIT 4A et 4B, une unité environ dix fois plus puissante a été mise au point pour l'alimentation des satellites TRANSIT 5A et 5B mis sur orbite au cours de 1963. Il est intéressant de relever que la chaleur produite par la désintégration du plutonium 238 ne sert pas seulement à la production d'électricité mais qu'une partie en est utilisée pour chauffer l'intérieur du satellite et maintenir les équipements dans une atmosphère de 20°C environ.

SNAP 11

Aussi désigné sous le nom de « Soft Lunar Landing Generator » (SLLG), le SNAP 11 est conçu pour alimenter un laboratoire qui serait envoyé sur la lune, d'où des informations seraient retransmises automatiquement. Il utilisera un alliage or-curium à raison de 5 parts d'or pour 1 de curium, en poids. Bien que le combustible soit chargé trente jours avant le lancement, le générateur ne se mettra en marche qu'après celui-ci et fonctionnera alors pendant trois mois. L'alliage or-curium a été choisi parce qu'il se fabrique facilement et permet d'atteindre une puissance spécifique élevée. Un réservoir est aménagé à l'intérieur du générateur pour que l'hélium dégagé par la désintégration α du combustible puisse s'y accumuler. L'équipement thermo-électrique consistera en 30 paires d'éléments en tellurure de plomb donnant une tension de 3 volts. Le projet est basé sur des puissances thermiques de 752 watts au moment du chargement de combustible, de 655 watts au moment du lancement et de 475 watts à la fin de la vie du générateur.

Le SNAP 11 fournira une puissance électrique de 21 watts ; toutefois, pendant les quatorze jours de nuit lunaire où la température externe tombera à —150°C, la puissance s'élèvera automatiquement à 25 watts, à cause de l'augmentation de la différence de température.

Un prototype chauffé électriquement a été essayé durant 1964 et il n'est pas exclu qu'un SNAP 11 équipe un satellite Surveyor qui serait lancé à destination de la lune dans le courant de cette année.

SNAP 13 et suivants

Le SNAP 13 est un générateur dont le but est d'expérimenter les possibilités d'application de la conversion directe par effet thermo-ionique. L'énergie sera produite par désintégration du curium 242.

Le SNAP 15 n'est pas destiné aux applications spatiales. Il s'agit d'une unité de très faible puissance (1 milliwatt), qui devra fonctionner de manière extrêmement sûre pendant au moins cinq ans, tout en étant d'un poids restreint au minimum. Son usage sera réservé aux engins de guerre terrestres.

Avec le SNAP 17, on revient dans le domaine spatial, puisque cette désignation s'applique à un générateur d'une trentaine de watts qui alimentera des satellites faisant partie du réseau de retransmission terrestre.

Il en est de même avec le SNAP 19, qui était primitivement conçu pour équiper des satellites dont la mission principale aurait été d'étudier les champs magnétiques et autres qu'une fusée se rendant sur la lune serait susceptible de rencontrer. Mais il est apparu que ce type de SNAP était mieux approprié à l'alimentation de satellites météorologiques et c'est dans

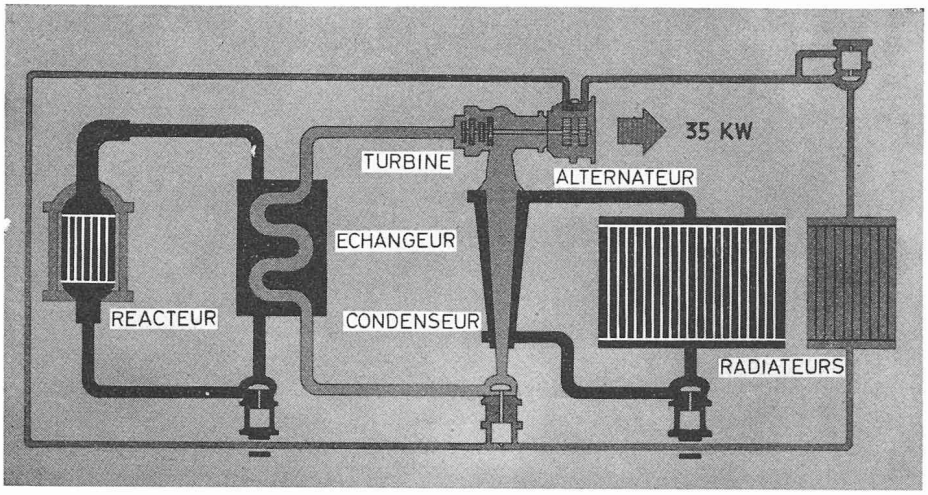

Fig. 7. — Schéma thermique du SNAP 8.

ce but qu'il est maintenant développé. Il est prévu de lancer dans un proche avenir un satellite NIMBUS équipé d'un tel SNAP.

Enfin, dernier de la liste actuelle des SNAP, le numéro 21 est à l'étude dans le but de fournir l'énergie à bord de balises maritimes. L'appareil est cependant conçu de manière assez originale, puisque la conversion de la chaleur en électricité n'aura plus lieu. La chaleur produite par la désintégration du strontium 90 servira à faire bouillir l'eau et la vapeur ainsi obtenue s'échappera à travers un transducteur hydro-acoustique. Tout intermédiaire mécanique ou électrique étant ainsi exclu, on obtiendra une balise simple, qui pourra être logée dans un volume d'environ 30 dm³ et dont un fonctionnement sûr pourra être garanti sans entretien pendant une dizaine d'années.

Résumé des caractéristiques des SNAP à désintégration

Le tableau 2 donne quelques caractéristiques des SNAP à désintégration. Le SNAP 1 n'y est pas mentionné, car il est le seul à utiliser la conversion indirecte et, de ce fait, diffère passablement.

TABLEAU 2

Caractéristiques des SNAP à désintégration

Numéro	Puissance (watts)	Durée de de vie	Combustible	Poids kg	Longueur cm	Diamètre cm
1A	125	1 an	Ce 144	100	85	60
3	3	90 jours	Po 210	2,5	12,3	11,9
7A, C	10	2 ans	Sr 90	3600	55	50
7B, D, F	60	2 ans	Sr 90	9200	85	55
7E	7,5	2 ans	Sr 90	3600	55	50
TRANSIT 4A-B	2,7	5 ans	Pu 238	2	14	12,7
9A	25	5 ans	Pu 238	12	23	50
11	21-25	90 jours	Cm 242	8,5	21	16,7
13	12,5	90 jours	Cm 242	—	—	—
15	0,001	5 ans	Pu 238	—	—	—
17	30	3-5 ans	Sr 90	—	—	—
19	20	5 ans	Pu 238	—	—	—
21	10	5 ans	Sr 90	—	—	—

2. *SNAP à fission*

SNAP 2

Premier projet de SNAP à réacteur, le SNAP 2 comporte un réacteur de 60 kilowatts thermiques, utilisant du NaK comme réfrigérant primaire. Celui-ci transmet sa chaleur à un circuit secondaire contenant du mercure liquide. Ce circuit secondaire fonctionne d'après le cycle de Rankine et alimente un groupe turbo-alternateur de 3 kW similaire à celui qui fut développé pour le SNAP 1. Une pompe électromagnétique est prévue dans le circuit primaire pour faire circuler le NaK. L'usage d'un métal liquide comme réfrigérant, en combinaison avec des éléments de combustibles uranium - zirconium hautement hydrogénés, a permis d'obtenir un cœur de très petit volume (environ 9 dm³). Le réacteur pèse 100 kg ; le contrôle est effectué par rotation de certaines des pièces de béryllium qui constituent le réflecteur. Il n'y a donc aucune barre de contrôle traversant le cœur. L'ensemble complet (réacteur + turbo-alternateur) pèse environ 600 kg. Un contrôle thermomécanique régularise la production d'énergie en cours de fonctionnement.

La durée de vie est prévue pour une année. Les températures du réfrigérant sont de 650°C à la sortie et 537°C à l'entrée du réacteur.

SNAP 4

Le projet SNAP 4 a pour but de réaliser un générateur de très grande puissance (1000 à 4000 kilowatts). La partie nucléaire sera identique, dans ses principes, à celle du SNAP 2. Par contre le turbogénérateur, qui devra être de construction très compacte, nécessitera de longues études. Celles-ci, qui ont débuté en 1959, subissent actuellement un ralentissement, étant donné qu'il n'existe pas à court terme de projets spatiaux impliquant l'usage de générateurs d'électricité aussi puissants.

SNAP 8

Le SNAP 8 est développé en collaboration avec la NASA (National Aeronautics and Space Administration), qui se propose d'en faire un générateur alimentant des moteurs de propulsion. C'est une version à grande échelle du SNAP 2, dans laquelle le principe de la conversion indirecte est conservé. Le SNAP 8 utilise le cycle de Rankine (voir figure 7) avec des températures légèrement plus élevées que le SNAP 2 : 705°C à la sortie du réacteur et 593°C à l'entrée. La figure 7 représente les trois circuits de refroidissement ainsi que le circuit de refrigération des paliers et de l'alternateur. Le réacteur, d'une puissance thermique de 300 à 600 kilowatts, alimente ainsi un alternateur de 35 kilowatts. La figure 8 montre un modèle de SNAP 8 où l'on voit la surface imposante du radiateur (140 m²).

Deux SNAP 8 pourraient alimenter une base d'exploration lunaire habitée par cinq ou six hommes. Des études ont en effet montré que l'on pourrait les inclure

Fig. 8. — Modèle d'un SNAP 8.

dans le chargement qu'une fusée SATURNE C-5 emmènerait sur la lune. Il faudrait cependant concevoir les générateurs de manière à pouvoir les enterrer dans le sol lunaire, ce qui permettrait ainsi de supprimer leur blindage et le poids mort que celui-ci représente durant le trajet.

Pour l'instant, un SNAP 8 a accumulé déjà plus de 200 heures de fonctionnement au cours d'un essai au sol, soit environ la moitié du temps pendant lequel il devra fonctionner lors de ses missions spatiales.

SNAP 10

Des études menées en 1959 montrèrent qu'il était possible de construire un SNAP à réacteur utilisant le principe de la conversion directe par thermo-éléments tel qu'il était prévu pour le SNAP 3. Une telle unité produira 300 à 500 watts de puissance électrique sans une seule partie mobile, la puissance thermique du réacteur étant de 25 kilowatts. Le réfrigérant est du NaK qui chauffe à 450°C les jonctions chaudes de thermo-éléments au tellurure de plomb. Les jonctions froides sont à 310°C, tandis que le radiateur atteint une température de 304°C. Sans blindage, le réacteur pèse 175 kg. L'important coefficient négatif de température suffira à assurer automatiquement le contrôle pendant la durée de vie, qui est prévue pour un à trois ans.

Il est prévu d'essayer en vol un SNAP 10 au cours de l'année 1965. Pour l'instant, des essais au sol ont déjà été accomplis avec succès. Un essai particulièrement intéressant a eu lieu à la station d'essais d'Idaho, au cours duquel on a simulé une brusque plongée d'un SNAP 10 dans de l'eau, tel que cela pourrait se produire en cas d'échec de lancement de la fusée. On a constaté, comme on s'y attendait, qu'une brusque excursion de puissance provoquait un démantèlement complet du réacteur et une rupture des éléments de combustibles et que de cette manière le réacteur ne pouvait continuer de fonctionner dans l'eau sans possibilité de contrôle.

SNAP 50

A la différence des prototypes précédents, le SNAP 50 est équipé d'un réacteur à neutrons rapides. Avec une puissance de 300 kilowatts, il vient logiquement se placer après les SNAP 8 et 4, dans la gamme des puissances comprises entre 100 et 1000 kilowatts. La possibilité d'obtenir des températures de combustible plus élevées dans le cœur du réacteur a incité les constructeurs à abandonner le NaK comme réfrigérant primaire au profit du lithium. Cela a naturellement posé de sérieux problèmes pour trouver un métal qui confère au circuit primaire une bonne résistance à la corrosion. La solution a, semble-t-il, été trouvée avec un circuit réalisé en columbium comportant 1 % de zirconium. Par ailleurs, le schéma des circuits thermiques a été simplifié par rapport à celui du SNAP 8 ; le circuit secondaire, contenant du potassium, ne comporte plus de condenseur, le fluide étant condensé directement par passage à travers le radiateur. Le circuit spécial de réfrigération des paliers et de l'alternateur est également supprimé et ces organes sont directement refroidis par du potassium dérivé du circuit secondaire.

Des essais d'irradiation de combustible (carbure d'uranium) sont actuellement en cours. Un modèle comprenant un échangeur et deux boucles parcourues l'une par du lithium à 950°C et l'autre par du potassium à 650°C a prouvé, après un fonctionnement de 10 000 heures, que les délicats problèmes de corrosion et de fuites sont maintenant résolus. Les recherches vont porter désormais sur le reste de l'équipement, en particulier le radiateur, les pompes et la turbine à vapeur de potassium.

Résumé des caractéristiques des SNAP à fission

Le tableau 3 résume les caractéristiques des SNAP à fission. Le SNAP 4 n'y est pas mentionné, ses caractéristiques n'étant pas encore déterminées avec précision.

TABLEAU 3

Caractéristique des SNAP à fission

	N° 10A	N° 2	N° 8	N° 50
Type de réacteur	thermique	thermique	thermique	rapide
Puissance thermique (kW)	33,5	60	300-600	*
Puissance électrique (kW)	0,5	3	35	300
Durée de vie	1 an	1 an	10 000 h	10 000 h
Nature du combustible	U-ZrH	U-ZrH	U-ZrH	UC
Densité de puissance du combustible (W/cm³)	12,7	21,8	75-150	*
Nature du refrigérant primaire	NaK	NaK	NaK	Li
Température à l'entrée du réacteur (°C)	480	537	593	*
Température à la sortie du réacteur (°C)	545	650	705	env. 950
Nature du réfrigérant secondaire	NaK	Hg	Hg	K
Matériau du radiateur	Ac. inox.-Al	Ac. inox.-Cu	Ac. inox.-Al	*
Surface du radiateur (m²)	5,9	12	140	*
Poids total du SNAP (kg)	430	660	env. 2700	env. 2700
Poids spécifique (kg/kW)	860	220	env. 77	env. 9

* Caractéristiques encore non définies ou maintenues secrètes.

Conclusions

Le programme expérimental américain relatif aux générateurs nucléaires d'électricité a, jusqu'à présent, donné des résultats positifs. Certes, toutes les difficultés ne sont pas vaincues. Il reste à définir la combinaison du type de source d'énergie (fission ou désintégration) et du mode de conversion (directe ou indirecte) qui donnera la puissance spécifique du système la plus élevée. Pour l'instant, la fission associée à la conversion indirecte donne les résultats les plus favorables dans le domaine des grandes puissances, alors que la désintégration alliée à la conversion directe est particulièrement bien appropriée pour de faibles puissances (jusqu'à 100 watts). Toutefois, cette situation ne doit en rien préjuger de l'avenir et notamment pas des progrès qui ne manqueront pas de survenir dans le domaine de la conversion directe et qui tendront à accroître la sûreté de fonctionnement.

Le développement des SNAP à désintégration conduit actuellement d'une part à une diversification des applications et d'autre part à une tentative de commercialisation en vue d'usages terrestres. Cela tendrait à prouver que les problèmes fondamentaux sont maintenant en grande partie résolus. Cela n'est pas encore le cas pour les SNAP à fission, mais les résultats obtenus avec les essais relatifs au SNAP 50 sont prometteurs et c'est d'ailleurs sur ce prototype que l'Agence atomique américaine concentre actuellement ses efforts.

BIBLIOGRAPHIE

Electrotechnique. — Tome 3: Machines à courant continu. Transformateurs, par *François Cahen*, ancien élève de l'Ecole polytechnique, ingénieur civil des Mines, directeur honoraire des études et recherches d'Electricité de France. Paris, Gauthier-Villars, 1964. — Un volume 16×24 cm, 358 pages, 232 figures. Prix : broché, 40 F.

Ce volume constitue le tome 3 de l'ouvrage *Electrotechnique*, correspondant au cours professé par l'auteur à l'Ecole supérieure d'électricité. Il comprend les chapitres suivants :

5e Partie : Machines à courant continu : 1. Le circuit magnétique. — 2. Génératrices à courant continu (dynamos). Propriétés générales. — 3. Modes d'excitation et caractéristiques des génératrices à courant continu. — 4. Régimes transitoires dans les machines à courant continu. — 5. Couplage des génératrices entre elles. — 6. Moteurs à courant continu. — 7. Génératrices à courant continu utilisant le flux de réaction d'induit. — 8. Machines acycliques. — 9. Machines électrostatiques.

6e Partie : Machines statiques à courant continu : 1. Bobines à noyau de fer. — 2. Transformateurs monophasés à deux enroulements. — 3. Transformateurs triphasés à deux enroulements. — 4. Régimes transitoires dans les transformateurs. — 5. Transformateurs spéciaux.

Cours d'électronique. Tome I : tubes, semi-conducteurs et circuits, par *L. Bouchet*, professeur, et *A. Martin*, professeur. Gauthier-Villars, Paris, 1964.

Cet ouvrage est destiné particulièrement aux élèves préparant les examens du BTE et du BTSE. La première partie du tome I comprend la description détaillée des tubes électroniques à vide et à gaz ainsi qu'une brève description des semi-conducteurs et du fonctionnement des transistors. La seconde partie est consacrée à l'étude élémentaire de circuits électriques : étude en régime libre de circuits simples, suivie de celle de leur comportement en régime forcé. D'autres ouvrages sont prévus pour compléter ce premier tome.

Si l'on peut féliciter les auteurs d'avoir illustré leur ouvrage de planches montrant en détail la constitution de tubes électroniques modernes, on regrettera par contre le manque de rigueur du texte de cette première partie. Le travail du débutant n'est certes pas facilité par l'omission de définitions claires relatives aux équations développées, équations imprimées par ailleurs souvent de manière fantaisiste.

La deuxième partie du livre est d'une qualité bien supérieure. Elle constitue une excellente introduction à l'étude élémentaire des circuits électriques. Une étude des phénomènes physiques entrant en jeu dans le comportement de divers circuits électriques précède systématiquement leur étude mathématique, ce qui en facilite la compréhension.

On aurait souhaité que les auteurs adoptent les symboles utilisés internationalement pour désigner les admittances complexes (on lit dans cet ouvrage : $\overline{A} = G + jY$ au lieu de $\overline{Y} = G + jB$).

R. Dessoulavy.

Einführung in die Kraft- und Wärmewirtschaft, par *W. Pauer*. 2e édition. Verlag von Theodor Steinkopff, Leipzig, 1964. — Un volume 15×22 cm, 308 pages et 103 figures. Prix : relié toile, DM 15.90.

Cet ouvrage s'inscrit comme numéro 14 d'une grande collection intitulée « Wärmelehre und Wärmewirtschaft in Einzeldarstellungen » et dirigée par W. Pauer, professeur à l'Ecole polytechnique de Dresche. Il présente les qualités propres aux ouvrages allemands : clarté, systématique, excellente typographie et mise en pages.

Quant au fond même, il faut se féliciter de disposer d'un livre qui attache une telle importance aux aspects économiques des installations de chauffage et de force.

Chaque chapitre important débute par une courte bibliographie et traite d'exemples numériques. De plus, le champ choisi étant très vaste, cet ouvrage pourra constituer une source de renseignements très riche pour tous ceux qui ont à s'occuper d'installations de chaleur et de force, ainsi que, bien entendu, pour les enseignants et les étudiants.

Sommaire :

Principes fondamentaux de l'économie énergétique ; formation des coûts ; mesures pour obtenir de meilleures conditions d'exploitation ; économie du double vitrage, de l'isolation des façades et de l'isolation des tuyauteries ; dimensions économiques des échangeurs de chaleur ; chaleur solaire ; énergie éolienne ; chaleur de la terre et des océans ; considérations sur les installations hydro-électriques ; analyse des différents combustibles (solides, liquides et gazeux) ; utilisation des déchets ; énergie nucléaire ; considérations sur les centrales à vapeur ; récupérations possibles de chaleur ; stockages énergétiques de diverse nature.

Exercices et problèmes de recherche opérationnelle, par *G. Desbazeille*. Dunod, éditeur, Paris, 1964. — Un volume de 362 pages, ill. Prix : broché, 48 F.

Il s'agit ici à la fois d'un précis sur certaines grandes questions de recherche opérationnelle et d'une collection fort riche d'exercices et de problèmes. Sans doute les développements théoriques fort condensés exigeront normalement des lectures parallèles ; il n'en reste pas moins que cet ouvrage peut être vivement recommandé à toute personne (déjà suffisamment habituée au maniement des symboles mathématiques) qui voudra mieux connaître, et surtout pratiquer, la programmation linéaire, la théorie des graphes, la programmation dynamique, la théorie des phénomènes d'attente ou de gestion de stocks.

C. B.