Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 64 (1973)

Heft: 19

Artikel: La centrale Hélio éléctrique orbitale : rêve ou solution d'avenir?

Autor: Gardiol, F.E.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915599

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: 09.07.2025

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

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

La centrale Hélio – électrique orbitale: rêve ou solution d'avenir?

Par *F. E. Gardiol*

621.311:523.72:523.14

Un projet particulièrement audacieux, qui prévoit de satisfaire aux besoins énergétiques de la population terrestre en allant capter le rayonnement solaire au-dessus de l'atmosphère a été récemment proposé par le Dr P. E. Glaser, de la firme américaine Arthur D. Little [1][1]). Un nombre restreint de stations orbitales permettrait d'alimenter la totalité du globe pour une période pratiquement illimitée. Cette solution ne présenterait pas les problèmes de pollution liés à l'exploitation des centrales thermiques et nucléaires actuelles. Les éléments essentiels du système proposé sont brièvement décrits, indiquant en particulier les principaux problèmes qui devraient encore être résolus. Malgré son gigantisme, un tel système pourrait être réalisé avec des moyens existants et certaines avances technologiques prévisibles dans un proche avenir.

Ein besonders kühner Plan, der vorsieht, die kraftspendenden Bedürfnisse der irdischen Bevölkerung mit dem Abfangen der Sonnenstrahlen ausserhalb des Luftraumes zu befriedigen, ist kürzlich von Dr. P. E. Glaser der amerikanischen Firma Arthur D. Little vorgeschlagen worden [1][1]). Eine beschränkte Zahl von Raumflugstationen erlaubt, die gesamte Erde für eine praktisch unbegrenzte Zeit mit elektrischer Energie zu versorgen. Diese Lösung weist keine Umweltverschmutzungsprobleme auf, die bei Atom- und Wärmekraftwerken auftreten könnten. Die wesentlichen Elemente des vorgeschlagenen Systems werden kurz beschrieben. Es wird im besondern auf die noch zu lösenden Probleme hingewiesen. Trotz seines gewaltigen Umfanges könnte ein solches System mit den schon bestehenden Mitteln und den technologischen Fortschritten, die in naher Zukunft vorauszusehen sind, verwirklicht werden.

1. Introduction

L'approvisionnement en énergie est l'un des problèmes les plus importants qui se posent de nos jours à l'humanité. Par suite de l'accroissement de la population d'une part et de celle – souvent artificielle – des besoins de chaque individu d'autre part, la consommation d'énergie augmente actuellement de façon pratiquement exponentielle. Il est clair qu'une telle croissance ne peut pas se prolonger indéfiniment sans tendre vers une catastrophe; il y aura donc saturation à une date qu'il n'est pas encore possible de fixer de manière scientifique, mais qui, pour l'instant, est loin d'être atteinte.

Les sources d'énergie sont fondamentalement de deux types: renouvelables et non-renouvelables. Il serait bien entendu souhaitable de ne faire appel qu'aux sources renouvelables, qui permettent un apport continu d'énergie pendant une durée pratiquement illimitée, telle l'énergie hydraulique, la seule de ces sources dont on ait fait usage jusqu'à présent. Dans notre pays, elle est pratiquement employée dans sa totalité. Les sources non-renouvelables comportent les combustibles chimiques (charbon, pétrole et gaz naturel), tous en voie de disparition plus ou moins rapide, et les combustibles nucléaires. Leur emploi provoque des pollutions de nature chimique, radioactive et thermique qui ne sont maintenues à un niveau tolérable que grâce à un grand nombre de précautions et à une vigilance de tous les instants. L'énergie nucléaire fait actuellement l'objet d'une controverse acharnée. Théoriquement, tous les problèmes scientifiques et techniques sont résolus; cependant les accidents, défauts de construction et difficultés de fonctionnement trop fréquents provoquent des craintes bien justifiées parmi le grand public. Les centrales nucléaires sont seules en mesure de faire face, dans un proche avenir, aux besoins croissants en énergie. Leur fonctionnement n'étant toutefois pas sans danger, elles ne représentent certainement pas la panacée universelle: il sera donc prudent de restreindre autant que possible leur extension, tout en cherchant des solutions plus satisfaisantes à longue échéance.

Un processus à première vue très prometteur, la fusion thermonucléaire, est à l'étude depuis plus de vingt ans. Les chercheurs se sont constamment heurtés jusqu'ici aux problèmes de confinement que présentent les plasmas très chauds nécessaires à l'obtention de la fusion contrôlée. Il semblerait qu'on s'approche peu à peu des conditions nécessaires pour ce processus, mais il paraît encore difficile de prévoir si et quand la fusion permettra effectivement de produire de l'énergie (peut-être demain, peut-être jamais?).

Si l'on ne dispose pas d'un réacteur à fusion fonctionnant sur le sol terrestre, il est cependant toujours possible d'utiliser l'énergie produite par le grand réacteur thermonucléaire qu'est notre soleil. Il s'agit là d'une source renouvelable, qui permet un approvisionnement continu en énergie. On constate avec une certaine surprise que cette source n'est pratiquement pas exploitée de nos jours, sauf dans certaines applications exceptionnelles d'usage limité. Ce manque d'interêt apparent est probablement dû, en partie tout au moins, à la nature fort aléatoire du rayonnement solaire perçu sous nos climats: une «station» alimentée par le rayonnement solaire ne produit d'énergie que pendant le jour; la puissance fournie dépend très fortement des conditions atmosphériques, devenant pratique-

[1]) Voir la bibliographie à la fin de l'article.

ment nulle par temps nuageux ou pluvieux. Une telle centrale devrait être complétée par un dispositif d'accumulation d'énergie par voie chimique ou hydraulique, comportant toutes deux passablement de pertes. Certains de ces inconvénients peuvent être évités en plaçant les stations de captage dans des climats secs, c'est-à-dire dans des régions désertiques. Le rendement de conversion du rayonnement solaire en énergie électrique reste d'autre part assez faible, que l'on fasse appel aux «serres chaudes» proposées par *Meinel* [2], ou qu'on utilise la transformation directe par effet photoélectrique [3]. Dans les deux cas, des surfaces considérables seraient nécessaires, les cellules photoélectriques présentant toutefois l'avantage de pouvoir facilement être placées sur le toit des maisons [3]. L'emploi du rayonnement solaire permettra d'obtenir une énergie d'appoint non négligeable et son utilisation deviendra intéressante lorsque les panneaux solaires pourront être manufacturés en très grandes quantités et à bas prix.

Le rayonnement solaire est déjà utilisé comme source d'énergie dans l'espace, alimentant nombre de sondes planétaires et de satellites de communications. La densité de rayonnement y est plus élevée (1,4 kW/m^2) qu'en dessous des couches filtrantes de l'atmosphère; elle est par ailleurs constante, ne dépendant pas des conditions atmosphériques et n'est interrompue que par de brèves éclipses. Pour ces différentes raisons, *Glaser* [1] a proposé de capter dans l'espace même cette énergie rayonnée, puis de la transmettre vers la terre par ondes électromagnétiques à travers la «fenêtre» qui existe dans la bande des hyperfréquences. Cette proposition a soulevé un très vif intérêt dans les milieux scientifiques concernés [4] et récemment la N.A.S.A. a chargé quatre firmes d'entreprendre une étude approfondie [5].

Le but de cet article est de présenter les grandes lignes de ce projet gigantesque, montrant en particulier les possibilités actuelles, les limites théoriques et les résultats qui pourront probablement être obtenus dans un proche avenir. Il est basé en grande partie sur les données publiées dans le «Journal of Microwave Power» [4].

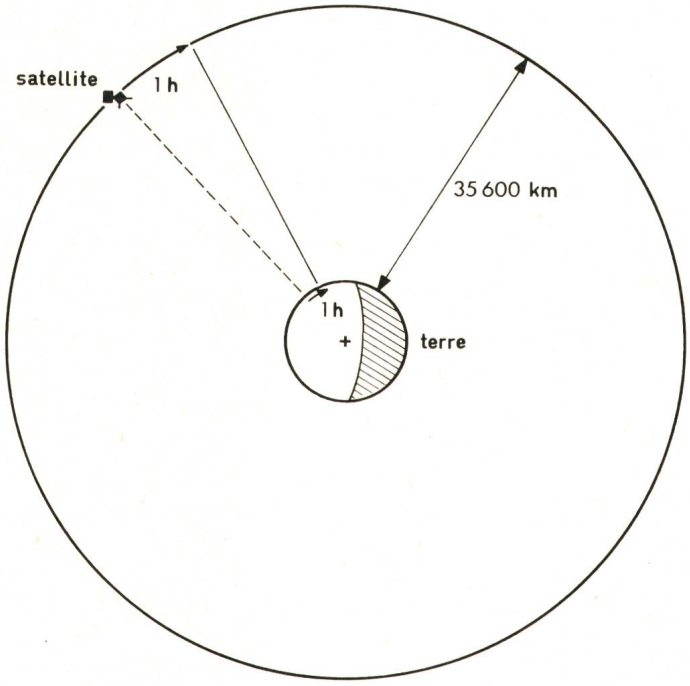


Fig. 1
Station orbitale géostationnaire
(le satellite n'est pas à l'échelle)

2. La station orbitale

Les auteurs d'ouvrages d'anticipation et de prospective ont depuis fort longtemps envisagé l'emploi de stations orbitales et de satellites automatiques pour remplir diverses fonctions, tant scientifiques qu'utilitaires. En 1945, *Clarke* [6] a proposé d'utiliser des satellites «géo-stationnaires» (une révolution en 24 h) pour faire face aux besoins croissants des télécommunications. Le satellite reste au zénith d'un point fixe au sol, situé à l'équateur, ce qui permet de réduire les problèmes de pointage des antennes. Les orbites géo-stationnaires sont assez éloignées de la terre, à environ 35 600 km d'altitude (fig. 1); les attractions solaire et lunaire y jouent un rôle non-négligeable, nécessitant un contrôle précis de l'orbite. C'est environ 12 ans plus tard que fut lancé le premier «Spoutnik» (4 octobre 1957); les satellites géo-stationnaires de télécommunications sont devenus une réalité avec «Early Bird» (Intelsat I) en 1965, rendant possible en particulier la retransmission immédiate de la télévision dans le monde entier.

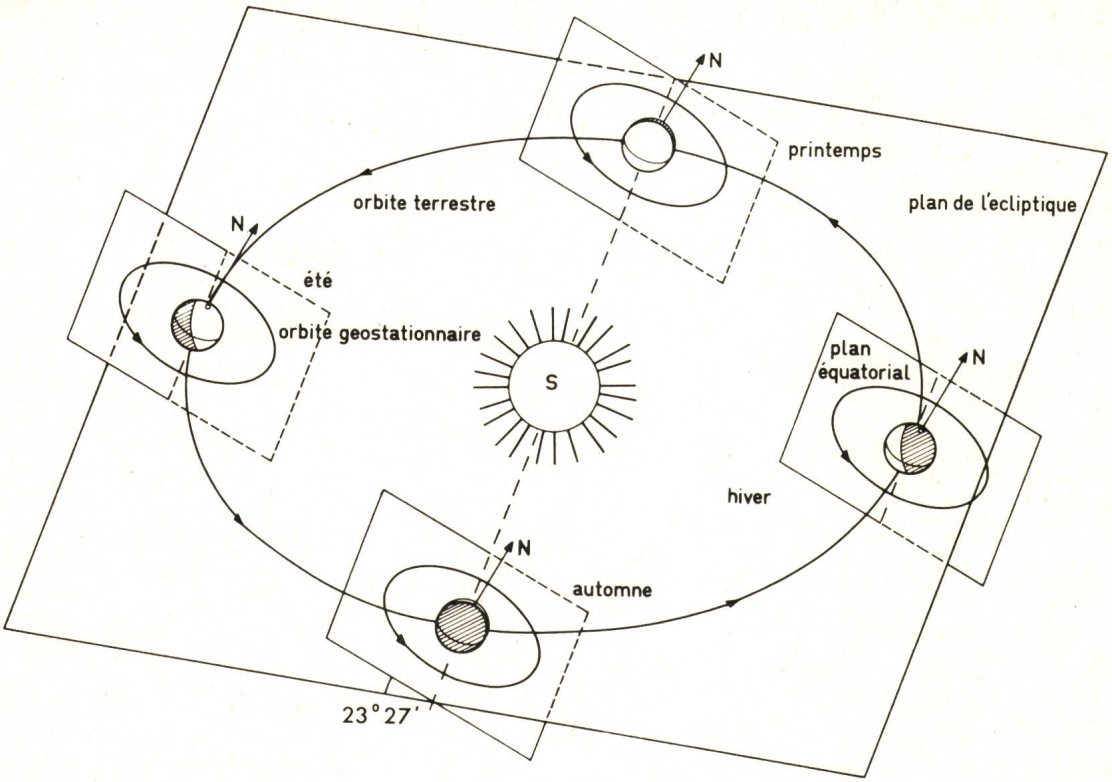
Certains auteurs ont envisagé aussi la possibilité de placer dans l'espace les centrales nucléaires, en vue d'en diminuer le danger et la pollution [7]: l'espace semble, à première vue tout au moins, être assez grand pour pouvoir absorber tous les déchets que l'homme pourrait bien y déverser. La N.A.S.A. étudie actuellement cette possibilité, qui pourrait ainsi sortir du domaine de la «Science-fiction» [8], à moins que l'emploi de l'énergie solaire ne lui soit en fait supérieur.

Il est intéressant de constater ici que le programme spatial américain, après les remarquables succès remportés lors de l'exploration lunaire, est actuellement en train de s'orienter vers l'étude de stations orbitales. C'est un domaine de recherche moins spectaculaire, certes, dont les applications peuvent par contre présenter un interêt plus immédiat. La recherche spatiale n'est pas limitée à des expériences de nature scientifique fondamentale, comme on pourrait parfois le croire. Elle peut très bien donner lieu à des réalisations utiles pour la vie de tous les jours, comme c'est déjà le cas pour les télécommunications. Il est important de déterminer dans quelle mesure l'emploi de l'espace permet de résoudre certains des problèmes bien réels qui se posent à notre époque. En particulier, la suppression des sources de pollution liées à la production d'énergie serait un résultat hautement souhaitable, tout projet pouvant aller dans ce sens méritant un examen approfondi.

Une station destinée au captage ou à la production d'énergie devrait normalement être placée en orbite géo-stationnaire, comme les stations de télécommunications. En effet, une station en orbite plus proche de la terre tournerait autour de celle-ci, entraînant des problèmes d'antennes mobiles et un emploi intermittent. Ces inconvénients n'existent pas en orbite géo-stationnaire; par contre, la distance que doit parcourir le faisceau est plus longue. La station est constamment éclairée par le soleil, en dehors de la période des équinoxes (fig. 2) où, par suite de l'alignement soleil-terre-station, celle-ci subirait des éclipses, dont la durée maximale serait de 1 h et 12 min. Cette période se situerait entre 25 jours avant et 25 jours après les équinoxes. Pour la station de réception, ces éclipses auront toujours lieu au milieu de la nuit, lorsque les besoins en énergie sont faibles.

Le système complet est décrit schématiquement en Fig. 3. Il se compose tout d'abord d'un gigantesque panneau de cellules solaires, dont le but est de convertir le rayonnement du soleil en énergie électrique. Cette énergie est ensuite transmise

Fig. 2
Orientation de l'orbite géostationnaire par rapport au plan de l'écliptique
(saisons indiquées pour l'hémisphère nord)



vers la terre par un faisceau électromagnétique. Pour diminuer autant que possible les pertes, la fréquence d'opération doit se trouver dans le domaine des hyperfréquences, en bande S (2...3 GHz): des fréquences plus basses provoqueraient une absorption importante dans la ionosphère, tandis que les couches atmosphériques risqueraient de bloquer des signaux de fréquences plus élevées. Comme les panneaux doivent être dirigés vers le soleil et l'antenne d'émission vers la terre, il faut pouvoir manœuvrer de façon plus ou moins indépendante ces deux éléments: la solution préconisée consiste à les placer aux deux extrémités d'une ligne à haute tension.

Finalement, la station de réception au sol recueille le faisceau et produit de l'énergie électrique continue ou à basse fréquence, qui est envoyée sur le réseau de distribution (la densité de puissance du faisceau au sol doit être suffisamment faible pour ne pas mettre en danger la vie animale).

Les différents constituants de la chaîne sont repris dans le schéma-bloc de la Fig. 4. On constate que l'énergie électromagnétique doit être convertie à 3 reprises pour permettre le fonctionnement désiré en tenant compte des propriétés des éléments et des milieux à traverser. Chacune des conversions est accompagnée d'une déperdition d'énergie, qui provoque un échauffement. Il s'agira donc d'augmenter, autant que faire se peut, les rendements de chacun des éléments convertisseurs.

Le projet décrit dans [1] propose pour la phase finale des stations produisant chacune 10^{10} W (soit 10 Gigawatt, 10 mille Mégawatt ou 10 millions de kW). Les dimensions indiquées dans les sections suivantes sont basées sur cette valeur. La construction préalable de stations pilotes, de dimensions plus modestes, permettrait de mettre au point les éléments du système et leur fonctionnement dans l'espace.

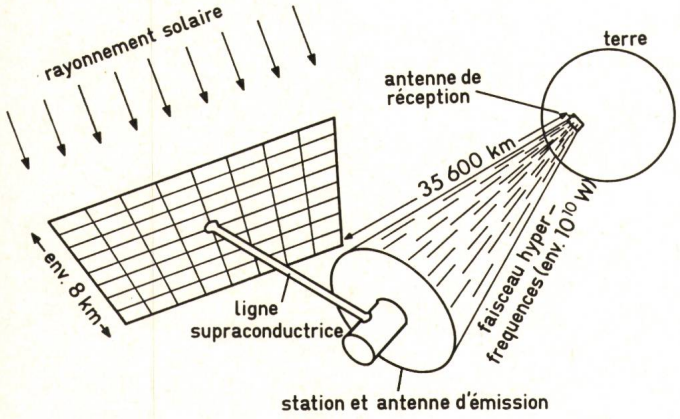


Fig. 3
Diagramme d'une station orbitale destinée à capter, transformer et transmettre l'énergie solaire

3. Les panneaux solaires

Pour convertir l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique, on prévoit d'utiliser des cellules photoélectriques faisant usage de semiconducteurs comme le silicium ou encore de couches minces comme dans les cellules au sulfure de cadmium (CdS).

De nombreuses expériences spatiales utilisent déjà des cellules solaires au silicium pour fournir l'énergie nécessaire à des sondes planétaires, des satellites de communications, de navigation et de météorologie. Les cellules à jonction p-n à semiconducteurs possèdent une bonne résistance aux radiations rencontrées dans l'espace. Comme les besoins en énergie des stations orbitales augmentent, des panneaux solaires de centaines de m² fournissant plusieurs dizaines de kW ont déjà été réalisés. On prévoit que des panneaux de dimensions encore plus grandes pourront être fabriqués dans un proche avenir par de nouvelles techniques actuellement à l'étude comme l'extrusion de rubans ou la croissance dendritique de réseaux.

Les cellules au CdS sont pour l'instant relativement instables et n'ont qu'un faible rendement de conversion (environ 5%). Par contre, leur poids plus réduit et leur moindre coût seraient très favorables pour des applications spatiales, si les inconvénients mentionnés ci-dessus pouvaient être surmontés.

Pour l'application particulière considérée ici, le principal paramètre caractérisant les cellules photoélectriques est leur taux de conversion du rayonnement en énergie électrique. En effet, pour une puissance électrique donnée, la surface des panneaux est inversément proportionnelle à leur rendement. Pour des cellules au silicium à une transition, ce taux de conversion ne peut dépasser une limite théorique de 25 %, et des valeurs expérimentales de 10 % ont été obtenues. Des rendements de l'ordre de 20 % seront probablement réalisables, si la recherche porte ses efforts de ce côté.

En admettant ici un rendement relativement modeste de 11 %, on constate que pour fournir une puissance électrique de 10^{10} W, les cellules doivent en fait capter $9 \cdot 10^{10}$ W de rayonnement solaire. Dans l'espace entourant la terre, la valeur moyenne de la densité de rayonnement est de 1,4 kW/m², il en résulte que le panneau solaire devrait mesurer 8 km × 8 km pour fournir toute la puissance désirée. Un tel panneau devrait être monté dans l'espace et serait plus facile à assembler si les cellules de base étaient déjà assez grandes. Il est d'ailleurs possible que de tels panneaux soient construits entièrement dans l'espace: l'étude de la croissance de cristaux en état d'apesanteur est en effet un des projets prévus dans le programme post-Apollo [10]. La surface nécessaire au panneau pourrait être réduite dans une certaine mesure en concentrant localement le rayonnement solaire par un dispositif optique (lentilles, miroirs).

C'est dans la bande des hyperfréquences (1...10 GHz) que le transfert d'énergie de l'espace vers la terre est le plus efficace (minimum d'absorption). Une station émettrice convertira la puissance captée par les cellules photoélectriques et enverra un faisceau d'hyperfréquences en direction d'une antenne réceptrice à la surface terrestre. Comme d'autre part le panneau solaire doit toujours faire face au soleil, il faudra que ces deux éléments puissent être orientés de façon plus ou moins indépendante, en vue d'assurer un bon fonctionnement dans toutes les situations possibles. Ils devront donc être séparés par une certaine distance et reliés électriquement par une ligne de transmission pour très fortes puissances, probablement supraconductrice (l'obtention de basses températures pose moins de problèmes dans l'espace que sur terre). La construction de joints tournants aux extrémités de cette ligne présente toutefois certains problèmes inédits qui devront encore être résolus.

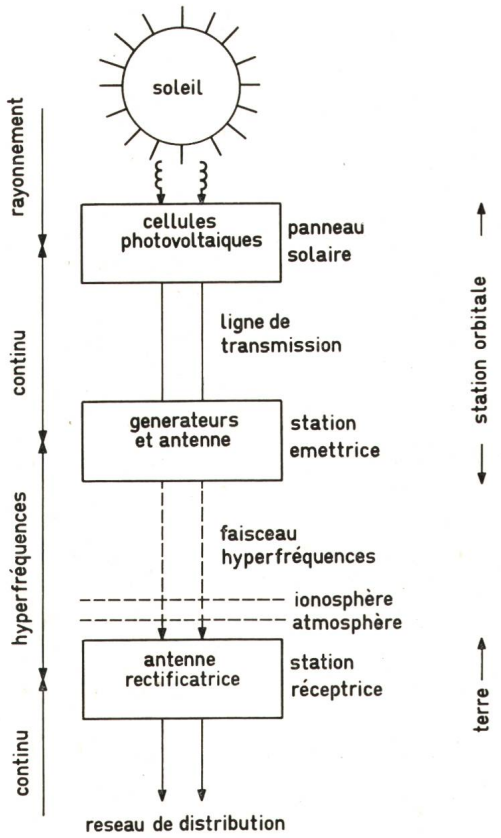


Fig. 4
Schéma-bloc du système

4. La station émettrice

La puissance que l'on envisage de transmettre dépasse de plusieurs ordres de grandeur celle que peuvent fournir à l'heure actuelle les tubes générateurs d'hyperfréquences (à de tels niveaux, on ne parle pas encore de semiconducteurs). Des tubes à champs croisés du type Amplitron ont fourni 400 kW en régime permanent [11]; il faudrait 25000 tubes de ce type par station orbitale. On ne doit pas s'attendre à la réalisation prochaine d'un tube qui soit capable de fournir à lui seul toute la puissance prévue. En fait, même si elle était réalisable, une telle solution présenterait un grand nombre d'inconvénients, du point de vue de la fiabilité, de l'échauffement et pour le réglage du système. Un réseau d'antennes alimentées chacune par un tube, du type couramment utilisé dans les radars modernes de détection de missiles (phased array), offrirait une solution beaucoup plus satisfaisante à ce problème.

Un tel réseau est constitué par l'assemblage d'une multitude de «petites» antennes, chacune alimentée par un tube amplificateur de puissance, lui-même alimenté à partir d'une source centrale de signal hyperfréquences de haute stabilité. La phase du signal fourni par chacun des amplificateurs peut être contrôlée électroniquement à l'aide de déphaseurs fonctionnant à bas niveau de signal, placés entre le générateur central et les tubes de puissance [12]. Un tel contrôle électronique permet de former correctement le faisceau et de le pointer de façon extrêmement précise; ce pointage fin serait contrôlé et constamment corrigé depuis la station de réception au sol, il compléterait un pointage mécanique plus grossier maintenant l'antenne d'émission constamment dirigée en direction de la terre. Un système ne comportant qu'une seule source de puissance nécessiterait une antenne unique d'extrêmement grandes dimensions et ne permettrait pas une flexibilité semblable, à moins de diviser le signal et d'adopter une solution en réseau du type ci-dessus. L'utilisation d'un grand nombre de tubes n'est pas un inconvénient, puisqu'il permet de répartir la puissance de la façon la plus favorable et de réduire les pertes. Il permettra également de répartir la chaleur qui doit être dissipée.

Les tubes hyperfréquences fonctionneront dans des conditions très différentes de celles rencontrées sur terre, par suite du vide spatial et de l'apesanteur. Les tubes hyperfréquences actuellement utilisés sont des assemblages impressionnants et généralement très lourds de métal et de céramique. Cette dernière matière assure l'isolation électrique entre électrodes nécessaire au fonctionnement sous haute tension. Pour obtenir un vide poussé à l'intérieur, des joints étanches métal-céramique doivent être réalisés. Cet assemblage doit être soutenu de façon adéquate pour assurer une bonne stabilité mécanique.

La chaleur provoquée par le bombardement d'électrons sur les électrodes peut être évacuée par conduction ou par convection, le rayonnement ne jouant qu'un rôle mineur.

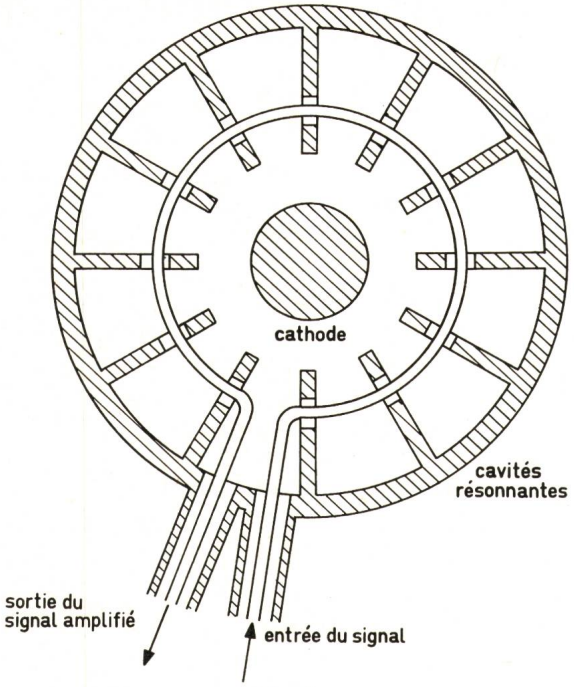


Fig. 5
Schéma de principe (coupe) d'un amplificateur à champs croisés du type amplitron
(champ d'aimantation statique perpendiculaire à la figure)

Dans l'espace, les problèmes sont tout différents: le vide poussé indispensable est fourni gratuitement, l'isolation entre électrodes n'est pas nécessaire, et l'absence de pesanteur permet une construction beaucoup plus légère et plus facile à réaliser (absence de joints étanches), même en tenant compte des faibles mouvements nécessaires pour assurer le pointage correct du faisceau. Le problème le plus important devient ici l'évacuation de la chaleur, qui ne peut se faire que par rayonnement dans l'espace. En fait, la chaleur sera transmise par conduction (heat pipes) du tube jusqu'à la surface de la station opposée à l'antenne, d'où elle sera rayonnée. Les tubes devront néanmoins fonctionner à des températures bien plus élevées que celles qui sont habituelles pour leur fonctionnement terrestre. Pour que l'échauffement soit aussi faible que possible, il importe de réduire au maximum les pertes à l'intérieur du tube générateur; il est bien clair que le tube qui transformera la plus grande partie possible de la puissance continue en puissance hyperfréquences chauffera le moins. Le rendement, plus même que la puissance fournie, jouera le rôle primordial dans le choix de l'élément amplificateur utilisé. A l'heure actuelle, deux types ont été proposés, chacun des deux présentant certains avantages et certains inconvénients.

Les tubes à champs croisés sont représentés par l'Amplitron, tube amplificateur dérivé du magnétron (fig. 5). Un rendement de conversion de 90% a été obtenu sur un modèle expérimental [11]. Théoriquement, ce rendement peut encore être amélioré en appliquant un champ magnétique plus intense. Ce champ est généralement fourni par des aimants permanents, dont le poids assez important devient un inconvénient majeur pour une application spatiale. L'emploi de nouveaux alliages magnétiques terres rares-Cobalt, qui présentent un produit BH maximum beaucoup plus élevé que les alliages de type Alnico couramment utilisés à présent permettrait de réduire considérablement le poids des aimants [13]. Il est d'ailleurs possible que, dans l'espace, la meilleure manière d'obtenir le champ magnétique intense souhaité soit l'utilisation d'un solénoïde supraconducteur [14]. Il sera également utile de déterminer dans quelle mesure l'emploi de supraconducteurs pour les guides d'ondes et les antennes permettrait de réduire les pertes au niveau du signal hyperfréquences.

Parmi les tubes à modulation de vitesse, un klystron amplificateur à cavités multiples (fig. 6) a atteint un rendement de 70%; des valeurs de 80% et plus sont théoriquement réalisables [15]. Même si le rendement reste plus faible que celui des Amplitrons, cet inconvénient est compensé en partie par le fait que la dissipation de chaleur dans un tel tube est localisée sur les collecteurs, électrodes situées à l'extrémité du tube, et non pas répartie comme c'est le cas pour l'Amplitron. La partie hyperfréquences du klystron resterait donc plus froide en fonctionnement. Par ailleurs, la focalisation du faisceau peut être effectuée de façon électrostatique, il ne serait donc pas nécessaire de fournir un champ magnétique, ce qui représente un avantage de poids.

On constate donc que des tubes amplificateurs de grande puissance pouvant être utilisés dans la station orbitale sont déjà disponibles à l'heure actuelle. Il serait toutefois souhaitable d'en améliorer le rendement en vue de réduire les problèmes cruciaux d'évacuation de chaleur. D'autre part, une

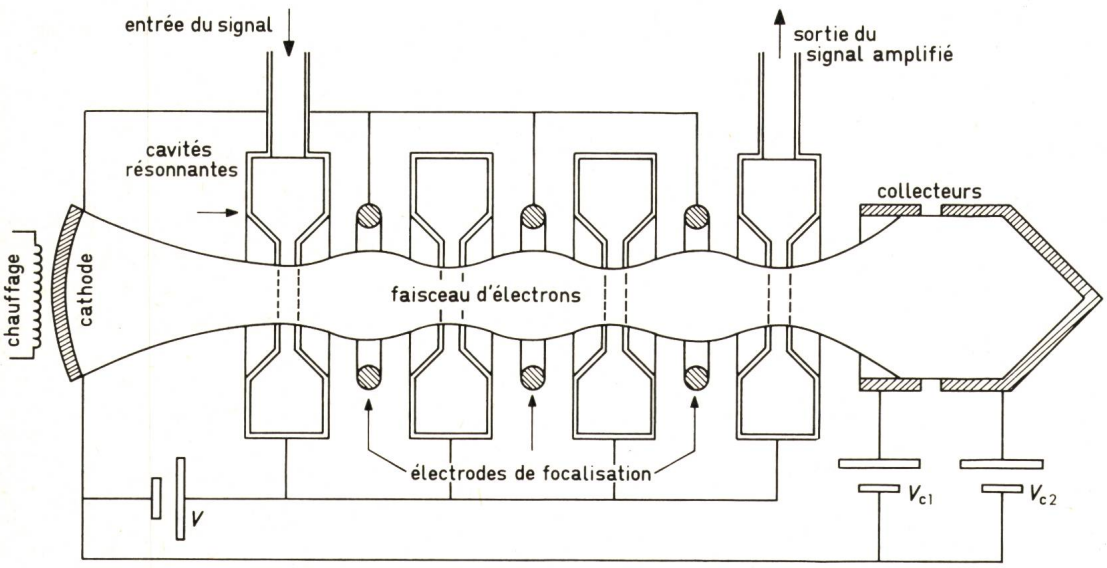


Fig. 6
Schéma de principe (coupe) d'un amplificateur à modulation de vitesse: klystron à cavités multiples à focalisation électrostatique

augmentation de la puissance maximale fournie par chaque tube permettrait de réduire leur nombre et par conséquent la complexité du système.

5. Le faisceau

L'énergie transmise par la station orbitale doit atteindre la terre et, plus précisément, le site de réception prévu. Elle doit donc être transmise sous forme d'un faisceau suffisamment étroit pour que l'antenne réceptrice n'ait pas de dimensions prohibitives. De plus la densité de puissance au sol doit toujours rester en dessous des limites tolérées par les êtres vivants: il serait inadmissible qu'une erreur de pointage puisse donner lieu à un accident majeur. Finalement, le faisceau ne doit pas être absorbé, ni par la ionosphère, ni par l'atmosphère, ce qui limite les bandes de fréquence utilisables.

La transmission de puissance par ondes électromagnétiques a tout d'abord été proposée par *Tesla* [16]; toutefois, les expériences effectuées à cette époque n'ont pas été concluantes, les fréquences utilisées étant trop basses. Depuis lors la transmission de puissance par hyperfréquences est devenue une réalité expérimentale. Elle a permis de maintenir en l'air un hélicoptère [17] et a été proposée pour l'alimentation de véhicules électriques à très grande vitesse (sans contacts métalliques) [18].

Le rapport entre la puissance transmise et la puissance reçue dépend de façon critique du facteur $\tau = \sqrt{A_t A_r}/\lambda D$, où A_t et A_r sont respectivement les surfaces efficaces des antennes d'émission et de réception, λ est la longueur d'onde et D la distance parcourue par le faisceau [19]. Pour des antennes quadratiques, si $\tau = 1{,}3$, la puissance reçue est le 80% de la puissance transmise, tandis qu'un rapport de 90% est obtenu lorsque $\tau = 1{,}65$. La densité de puissance au bord de l'antenne ne doit en tous cas pas dépasser 10 mW/cm², qui est la limite autorisée aux U.S.A. pour une exposition indéfinie [20]; d'autre part, la densité maximale au centre de l'antenne devrait rester suffisamment faible pour ne pas causer de dommage aux oiseaux migrateurs qui pourraient la survoler; une densité de 25 mW/cm² est considérée comme un maximum tolérable. Pour un rendement de transfert élevé, la distribution de puissance dans le faisceau est approximativement Gaussienne, c'est-à-dire de la forme $P/P_{max} = e^{-(r/r_0)^2}$ (fig. 7) (r_0 étant le rayon du cercle entourant le 63% de la puissance). Pour un transfert de 90% de la puissance et tenant compte des restrictions et hypothèses mentionnées ci-dessus, la surface de réception au sol serait un carré de 11,5 km × 11,5 km, l'antenne de transmission de la station orbitale devant dans ce cas avoir les dimensions de 520 m × 520 m, la longueur d'onde valant 10 cm ($f = 3$ GHz).

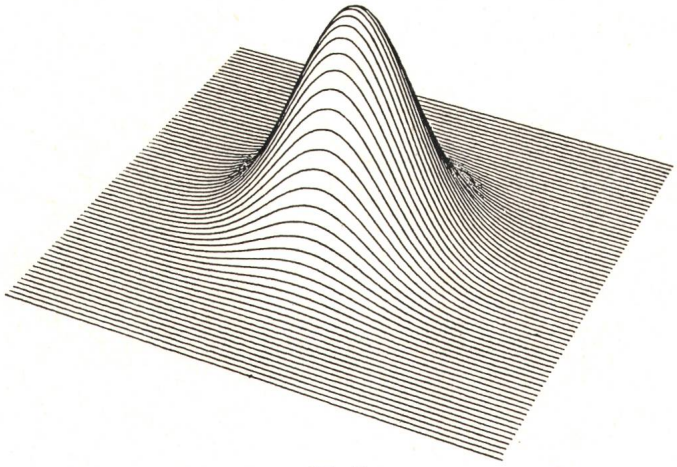


Fig. 7
Distribution de la densité de puissance dans un faisceau à répartition Gaussienne
[exp $-(r/r_0)^2$]

Le faisceau doit encore pouvoir traverser les couches ionosphériques et atmosphériques qui protègent la terre sans être dévié ou absorbé de façon trop importante [21].

Dans la ionosphère, le faisceau sera dévié par suite de la variation de l'indice de réfraction: pour une longueur d'onde de 10 cm environ, la déviation au sol est nettement inférieure au mètre, donc pratiquement négligeable. L'absorption dans la ionosphère est non-linéaire et décroit avec la fréquence: pour des niveaux de puissance faible, la ionosphère est pratiquement transparente aux hyperfréquences; elle devient progressivement opaque lorsque la puissance augmente et que la fréquence baisse. Pour la fréquence de 3 GHz environ considérée ici, les niveaux de puissance de 10...20 mW/cm² représentent approximativement la limite de la zone de transparence.

D'autre part, la polarisation du faisceau subit une rotation, par suite de l'effet du champ magnétique terrestre et du plasma de la ionosphère (rotation de Faraday). A 3 GHz, la rotation maximale serait de l'ordre de 6°. Si l'on ajuste l'antenne au sol pour une rotation moyenne de 3°, la perte en puissance ne dépassera pas 0,25%.

L'absorption provoquée par l'atmosphère comporte trois composantes, qui toutes trois augmentent avec la fréquence. Une composante toujours présente, due aux gaz normalement contenus dans l'atmosphère, provoque une perte de puissance d'environ 1...2% à une latitude de 45° et une fréquence de 3 GHz. Les nuages contribuent à une perte du même ordre de grandeur; il en va de même pour une pluie modérée (env. 10 mm/h). Une pluie torrentielle, par contre, pourrait absorber une partie relativement importante de la puissance (7% pour 100 mm/h à 3 GHz). Les pertes par absorption deviennent beaucoup plus grandes lorsque la longueur d'onde diminue.

Le choix de la fréquence du signal dépend d'un compromis entre plusieurs paramètres: elle doit être suffisamment élevée pour que le rendement du faisceau (qui dépend du facteur τ) soit élevé et pour que les effets ionosphériques soient faibles; d'autre part, elle doit rester suffisamment basse pour que le signal ne soit pas absorbé par l'eau contenue dans l'atmosphère (nuages, pluie). Il en résulte une fréquence de l'ordre de 2...3 GHz. Il faut remarquer ici que ce sont exactement les mêmes considérations qui ont dicté le choix des fréquences utilisées en télécommunications spatiales, et qu'il faudra bien entendu éviter de provoquer des interférences. Il serait par exemple logique d'utiliser pour la transmission de puissance la bande de 2450 ± 50 MHz, qui a déjà été réservée pour les applications industrielles, scientifiques et médicales (I.S.M.) des hyperfréquences [20].

En conclusion, on constate que la traversée des couches atmosphériques par le faisceau ne provoque pas de pertes exagérées, sauf lors d'averses torrentielles. On pourrait encore améliorer le rendement en plaçant des stations de réception dans des zones où le climat est sec la plupart du temps (déserts); il serait dans ce cas nécessaire d'installer des lignes de transmission pour grandes distances, leurs pertes compensant alors largement cette légère amélioration.

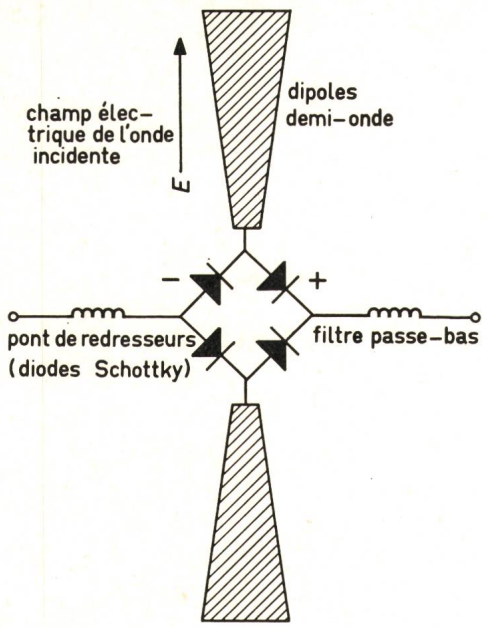


Fig. 8
Schéma de principe d'un élément d'antenne rectificatrice (rectenna)

6. La station réceptrice

Après avoir parcouru presque 35 600 km dans l'espace, puis traversé la ionosphère et l'atmosphère, le faisceau atteint enfin le sol terrestre, où son énergie est récoltée et convertie en vue de la distribution. On utilisera dans ce but très probablement du courant continu ou de fréquence industrielle (50 ou 60 Hz suivant les continents). La densité de puissance au sol devant être faible pour les motifs de sécurité mentionnés dans la section précédente, l'antenne réceptrice devra avoir de très grandes dimensions. De même que l'antenne d'émission, elle devra être formée d'un assemblage de cellules: une antenne d'une dizaine de km de diamètre serait irréalisable en une pièce. Les pertes de conduction métallique peuvent être réduites en effectuant la conversion hyperfréquences – continu aussi près que possible de la réception.

Cette exigence est satisfaite par le concept de «l'antenne rectificatrice» ou «rectenna» [22], formée de dipôles demi-onde montés chacun dans un pont de redresseurs (fig. 8). Le rendement de conversion obtenu avec des diodes à pointe est d'environ 60%; les diodes à barrière de Schottky, fabriquées par des techniques planar épitaxial permettent des rendements de 75 à 80%. Ces valeurs correspondent à des diodes de production standard qui n'ont pas été fabriquées en vue d'un transfert de puissance optimal. On peut s'attendre à des rendements supérieurs lorsque les diodes seront développées dans ce but. Les éléments de «rectenna» sont alors interconnectés en réseau, les connections en série et en parallèle permettant de fournir les courants et tensions correspondant à l'utilisation prévue.

Ce type d'antenne, formée de dipôles, fonctionne en polarisation linéaire: la puissance captée sera maximum lorsque le champ électrique est parallèle aux dipôles (fig. 8); elle devient pratiquement nulle pour une polarisation perpendiculaire. La polarisation du faisceau est modifiée par la rotation de Faraday dans la ionosphère; on a vu toutefois dans la section précédente que les pertes résultantes sont négligeables.

L'implantation d'un tel réseau posera des problèmes de taille au niveau de l'aménagement du territoire et de la protection de l'environnement. Une antenne de 10 km × 10 km ne saurait passer inaperçue et ne peut bien entendu pas être placée n'importe où. Le problème n'est en fait pas aussi difficile à résoudre qu'il pourrait paraître au premier abord: le réseau de «rectennas» peut se présenter sous la forme d'un treillis à mailles relativement lâches, pratiquement transparent pour le rayonnement lumineux. Il pourrait être placé au-dessus de zones industrielles, surfaces déjà utilisées, fournissant directement l'énergie au lieu de consommation. Il serait aussi possible de couvrir – à une certaine hauteur – des zones agricoles; les légères pertes calorifiques dans les redresseurs pourraient alors être bénéfiques, plus particulièrement en période de gel.

Il faudra encore veiller à ce que le site de réception ne soit pas trop rapproché de stations de télécommunications ou de centres de recherche importants, pour éviter autant que possible de créer des interférences.

7. Construction

Le problème majeur qui reste à traiter est l'assemblage et le placement de la station en orbite géo-stationnaire à 35 600 km d'altitude. On évalue le poids de la station orbitale à environ 200 000 t si l'on utilise la technologie actuelle [23]. Ce poids pourra toutefois être réduit considérablement à l'avenir, en faisant appel à de nouvelles méthodes de fabrication, entre autres en tenant compte des contraintes mécaniques moindres dans l'espace: un auteur avance le chiffre de 2500 t seulement [1]. A l'heure actuelle, la fusée américaine la plus puissante, Saturne V, permet de placer 120 t sur une orbite basse, alors que la navette spatiale (réutilisable) à l'étude à la N.A.S.A. pourrait transporter 20 t par voyage. Quelques centaines, ou même quelques milliers de vols seraient donc requis pour porter dans l'espace tout le matériel nécessaire pour l'assemblage d'une station, qui serait alors effectué sur une orbite proche de la terre. L'énergie captée par les panneaux solaires servirait alors à alimenter des propulseurs ioniques, assurant le placement de la station sur orbite stationnaire après un voyage d'environ 3 mois [23].

Une évaluation sommaire du coût probable de construction, tenant compte entre autres de la réduction prévisible du coût d'insertion en orbite par suite de l'emploi d'une navette spatiale, indique un prix de revient total d'environ 2000 francs par kilowatt. L'élément le plus important du point de vue coût et du point de vue poids est le panneau solaire.

Dans toutes les applications spatiales, la phase la plus délicate et la plus coûteuse est la sortie de l'atmosphère terrestre. On a en effet besoin d'une puissance de propulsion considérable pour s'arracher aux forces de gravitation terrestre et de frottement atmosphérique. Cette puissance a été fournie jusqu'à présent par des fusées à propulsion chimique, qui provoquent une pollution considérable de l'atmosphère; l'envoi en orbite du matériel nécessaire pour assembler 1, 10 ou 100 stations orbitales ne provoquerait-il pas un danger excessif pour l'environnement?

Une autre méthode, qui permettrait de réduire ces problèmes, mériterait d'être étudiée sérieusement: elle consiste à construire les stations orbitales à partir de la lune. Comme l'attraction lunaire est 6 fois plus faible que celle de la terre, il est bien plus facile s'en échapper, fait qui a été amplement démontré lors des missions Apollo. Comme par ailleurs l'atmosphère lunaire est beaucoup plus ténue que l'atmosphère terrestre, des vitesses au sol beaucoup plus grandes peuvent

être atteintes. Une catapulte électrique (moteur linéaire) permettrait de placer les éléments constitutifs de la station directement sur orbite lunaire [24]. C'est là que s'effectuerait l'assemblage, puis des propulseurs ioniques sortiraient la station de la zone d'attraction lunaire et l'amèneraient en orbite géostationnaire autour de la terre. La distance parcourue serait certes beaucoup plus grande, mais l'énergie dépensée bien moindre et provenant en grande partie du rayonnement solaire. Cette solution suppose tout d'abord que les matériaux nécessaires à la construction de la station soient disponibles sur la lune. Elle suppose aussi l'existence de bases lunaires permettant l'extraction et le traitement de métaux et de semiconducteurs, possédant des sources d'énergie importantes (peut-être aussi de provenance solaire?). Bien que plus futuriste que la première, cette seconde solution est probablement plus rentable à longue échéance, les stations orbitales de toutes sortes étant certainement appelées à jouer un rôle de plus en plus important à l'avenir [25].

8. Conclusion [2])

Les éléments nécessaires à la construction de la station orbitale sont pratiquement tous disponibles actuellement; leur grand nombre nécessiterait cependant la mise sur pied de procédés de fabrication en conséquence. L'envoi de matériaux dans l'espace et leur assemblage en orbite sont également réalisables en principe. Il en résulte que la construction d'une station orbitale appartient au domaine du possible; par contre, sa rentabilité est problématique, les méthodes utilisées jusqu'à présent pour l'insertion en orbite étant d'un coût extrêmement élevé. L'introduction de véhicules réutilisables, du type «navette spatiale» (space shuttle) que la N.A.S.A. développe actuellement [10] permettra de réduire considérablement ces dépenses. Avant de pouvoir construire une station économiquement rentable, il faudra donc mettre au point des lanceurs à prix de revient convenable.

Cette période d'attente sera d'ailleurs utile pour approfondir l'étude de tous les éléments et du système dans son ensemble. En particulier, les pertes à tous les niveaux doivent être réduites. Au sol, la puissance non transformée par les «rectennas» provoque une pollution thermique indésirable, même si elle est considérablement plus faible et répartie sur une plus grande surface que celle produite par les centrales nucléaires. Dans l'espace, l'énergie perdue donne lieu à un échauffement de la station, lui aussi fort peu souhaitable. Plus généralement, toutes les pertes font augmenter la surface des panneaux solaires nécessaires pour fournir la puissance désirée au sol.

Le contrôle de l'orbite et le pointage de l'antenne sont des problèmes qui ont déjà été résolus avec succès pour les satellites de télécommunications. Cependant, le problème est ici plus complexe du fait de l'immense surface du panneau solaire et de la grande précision nécessaire pour l'orientation du faisceau; des moyens plus importants devront donc être mis en œuvre. L'emploi de déphaseurs à contrôle électronique sera indispensable pour maintenir le transfert maximum d'énergie au site de réception.

La sécurité du système en fonctionnement doit également être étudiée en détail. Il s'agira en particulier de déterminer de façon plus satisfaisante la limite biologique acceptable pour la densité de puissance atteignant le sol [20].

Le projet de station énergétique orbitale est en bonne voie: à première vue, il ne semble pas présenter de problèmes techniques insurmontables. Toutefois, sa réalisation nécéssitera un certain temps, on ne doit donc pas s'attendre à voir résoudre du jour au lendemain les problèmes de pollution par cette méthode. Il faudra toutefois se rappeler qu'à long terme, des alternatives à l'énergie nucléaire sont possibles.

Sur un tout autre plan, il vaut la peine de noter ici que la «prophétie de Saint Malachie», écrit obscur que l'on croit dater du 16e siècle, a attribué l'épithète «de Labore Solis» au successeur du pape actuel [26]. Ceux qui prennent ces «prédictions» au sérieux s'attendent donc à voir le soleil et son énergie jouer un rôle important dans un avenir assez proche. On pourrait toutefois regretter que, à cause probablement des connaissances fort restreintes de cette lointaine époque, la prévision ne soit pas plus claire: s'agit-il de fusion thermonucléaire, d'énergie solaire recueillie au sol, ou dans l'espace? Cette importante question trouvera assurément sa réponse dans le courant des prochaines années.

[2]) Depuis la rédaction de cet article, la revue «Spectrum» a publié un rapport détaillé faisant le point sur ce projet [9]. Il donne en particulier une estimation financière basée sur une extrapolation des techniques actuellement disponibles, selon laquelle les coûts d'installation se situeraient entre 4500 et 8000 frs/kW, c'est-à-dire seraient nettement supérieurs à ceux mentionnés ici (valeurs provenant de [1]). Il n'en reste pas moins que la centrale orbitale sera une alternative fort attrayante au point de vue pollution, et qu'elle doit être sérieusement considérée en vue de l'approvisionnement en énergie à l'avenir.

Bibliographie

[1] *P. E. Glaser:* Power without pollution. J. Microwave Power 5(1970)4, p. 210...222
[2] *J. B. Schroeder:* Satisfying power demands. IEEE Spectrum 8(1971)12, p. 14.
[3] *J. A. Strother:* New power sources. IEEE Spectrum 9(1972)5, p. 12.
[4] Special issue on satellite solar station and microwave transmission to earth. J. Microwave Power 5(1970)4.
[5] Über ein Satellitensolarkraftwerk. Bull. SEV 64(1973)1, S. 56.
[6] *A. C. Clarke:* Extraterrestrial relays. Can rocket stations give worldwide radio coverage. Wirel. Wld. 51(1945)10, p. 305...308.
[7] *R. Heinlein:* The man who sold the moon. Third edition. Signet-books. New York, New Amercan Library, 1950.
[8] *J. J. Andover:* Space shuttle: spirit of '76. IEEE Spectrum 9(1972)8, p. 61...62.
[9] *W. C. Brown:* Satellite power stations: a news source of energy? IEEE Spectrum 10(1973)3, p. 38...47.
[10] *W. von Braun:* The reusable space transport. American Scientist 60(1972)6, p. 730...738.
[11] *W. C. Brown:* High power microwave generators of the crossed-field type. J. Microwave Power 5(1970)4, p. 245...259.
[12] *W. J. Ince* and *D. H. Temme:* Phasers and time delay elements. In: Advances in Microwaves. Edited by L. Young. Vol. 4. New York, Academic Press, 1969, p. 1...189.
[13] *K. Bachmann:* Recoma - nouveau matériau pour la fabrication d'aimants permanents de haute qualité. Revue Brown Boveri 59(1972)9, p. 464 ...468.
[14] *T. Van Duzer* and *C. W. Turner:* Superconductivity: new roles for an old discovery. IEEE Spectrum 9(1972)12, p. 53...63.
[15] *P. Guénard:* High power linear beam tube devices. J. Microwave Power 5(1970)4, p. 261...267.
[16] *G. D. Friedlander:* Tesla: eccentric genius. IEEE Spectrum 9(1972)6, p. 26...29.
[17] *W. C. Brown:* Experiments involving a microwave beam to power and position a helicopter. Trans. IEEE AES 5(1969)5, p. 692...702.
[18] *R. G. Bosisio* and *A. Foggia:* Microwave Power for a clean rapid ground transport system. J. Microwave Power 7(1972)3, p. 169...179.
[19] *G. Goubau:* Microwave power transmission from an orbiting solar power station. J. Microwave Power 5(1970)4, p. 223...231.
[20] Special issue on biological effects of microwaves. Trans. IEEE MTT 19(1971)2.
[21] *V. J. Falcone:* Atmospheric attenuation of microwave power. J. Microwave Power 5(1970)4, p. 269...278.
[22] *W. C. Brown:* Receiving antenna and microwave power rectification. J. Microwave Power 5(1970)4, p. 279...292.
[23] *E. Stuhlinger:* Power without pollution: a dream that must come true. J. Microwave Power 5(1970)4, p. 207...209.
[24] *A. C. Clarke:* Islands in the Sky. Philadelphia, Winston, 1956.
[25] *A. C. Clarke:* The exploration of space. New York, Harper and Brothers, 1959.
[26] *J. Sendy:* Les cahiers de cours de Moïse. Paris, Juillard, 1963.

Adresse de l'auteur:
Prof. *F. Gardiol,* Chaire d'électromagnétisme et d'hyperfréquences de l'EPFL, 16, ch. de Bellerive, 1007 Lausanne.