

## Les véhicules spatiaux à source d'énergie solaire Le Projet Phaëtan (\*)

M. VERNET-LOZET

Ricento il 18 Maggio 1963

RESUMÉ. — Il est permis, a priori au moins, d'envisager un assez grand nombre de méthodes pour transformer l'énergie solaire en énergie utilisable pour la propulsion d'un véhicule spatial. Toutefois dans la mesure où l'on s'impose un certain nombre de conditions, entre autres celle de produire une poussée qui ne soit pas parfaitement négligeable devant le poids du véhicule, on constate que dans l'état actuel de nos connaissances et de nos possibilités technologiques, il n'est guère raisonnable de penser utiliser une autre méthode que celle, bien classique et sans doute démodée aux yeux de certains qui consiste à passer par l'intermédiaire d'une machine thermique.

Il apparaît clairement d'ailleurs que l'originalité d'un tel mode de propulsion ne réside pas dans le système de propulsion lui-même qui pourra être n'importe quel type de propulseur électrique, le choix pouvant être fait en fonction de la mission que l'on se propose d'effectuer et de la charge utile que l'on désire transporter, mais au contraire dans la conception de l'ensemble constitué par le miroir, la machine thermique et le condenseur.

Nous nous proposons sur la base du projet « Phaëton » actuellement en cours d'étude à la Société d'Etude de la Propulsion par Reaction, d'examiner un peu plus en détail qu'il ne l'a été fait jusqu'ici, quels impératifs régissent le dimensionnement d'une telle machine.

RIASSUNTO. — È lecito, almeno a priori, esaminare un assai grande numero di metodi per trasformare l'energia solare in energia utilizzabile per la propulsione di un veicolo spaziale. Tuttavia nella misura che viene imposta da un certo numero di condizioni, tra cui quella di produrre una spinta che non sia perfettamente trascurabile rispetto al peso del veicolo, si constata che allo stato attuale delle nostre conoscenze e delle nostre possibilità tecnologiche, non è affatto giusto pensare di utilizzare un altro metodo che non sia quello, classico e sicuro che consiste nel passare attraverso una macchina termica.

---

(\*) Nota presentata al 2° Congresso Internazionale Tecnico Scientifico dello Spazio. Roma, 19-23 Giugno 1962.

Apparira allora chiaro che, l'originalità di tale metodo di propulsione non sta tanto nel sistema di propulsione stesso che potrà essere non importa di quale tipo di propulsore elettrico, la scelta potrà essere fatta in funzione della missione che ci si propone di effettuare e del carico utile che ci proponiamo di trasportare, ma al contrario nella concezione dell'insieme costituito dallo specchio, dalla macchina termica e dal condensatore.

Ci proponiamo sulla base del progetto « Phaeton » attualmente in corso di studio alla Societe d'Etude de la Propulsion par Reaction, di esaminare un po' piu in dettaglio tutto cio che si è fatto finora, quali imperativi reggono il dimensionamento di una tale macchina.

SUMMARY. — On prove that between various methods to transforme sun energy into utilisable energy to move a spatial vehicle, the most convenient is that to make use of thermic engine. On examine, in all particulars on the ground of Phaeton project, this method.

Rappelons que le but du projet « Phaeton » est de permettre de effectuer un certain nombre de missions ayant elles-mêmes pour but aussi bien la résolution des nombreux problèmes qui ne manqueront pas de se poser à propos de la propulsion électrique d'un véhicule spatial que l'étude des techniques d'émissions et de réception de radio et de télévision.

Les vehicules de ce type ont été étudiés pour pouvoir être mis sur orbite par les versions évoluées, d'ores et déjà à l'étude, du lanceur Diamant.

On peut montrer que pour le poids total de l'ordre de 300 kg que ces lanceurs seront capables de mettre sur orbite, lequel constituerait le poids initial de « Phaeton » (y compris la charge utile), le compromis optimal en ce qui concerne la puissance électrique à fournir se situe aux environs de 2 à 3 Kw. Le projet dont la maquette est représentée sur la planche N° 1 a été calculé pour une puissance électrique de 2,25 Kw.

Il est essentiellement constitué par:

- un miroir parabolique dépliant de diamètre égal à 4,9 m,
- d'une chaudière en forme de cavité, l'ouverture de celle-ci étant placée dans le plan focal du miroir, le diamètre de cette ouverture étant égal à 0,18 m,
- d'une machine de transformation laquelle dans le projet actuel est un moteur alternatif, le fluide moteur étant du mercure. Cette machine entraînant deux alternateurs,
- d'un radiateur rayonnant sur les 2 faces, la surface totale radiante étant égale à 2,85 m<sup>2</sup>.

Le miroir est supposé être pointé de façon permanente vers le soleil à l'aide d'un dispositif approprié, l'erreur moyenne sur le pointage étant supposée être égale à 3/4 de degré.

La chaudière contient une réserve d'hydrure de lithium formant volant thermique afin de pouvoir fonctionner de façon permanente y compris pendant les passages dans les zones non éclairées. Le diamètre

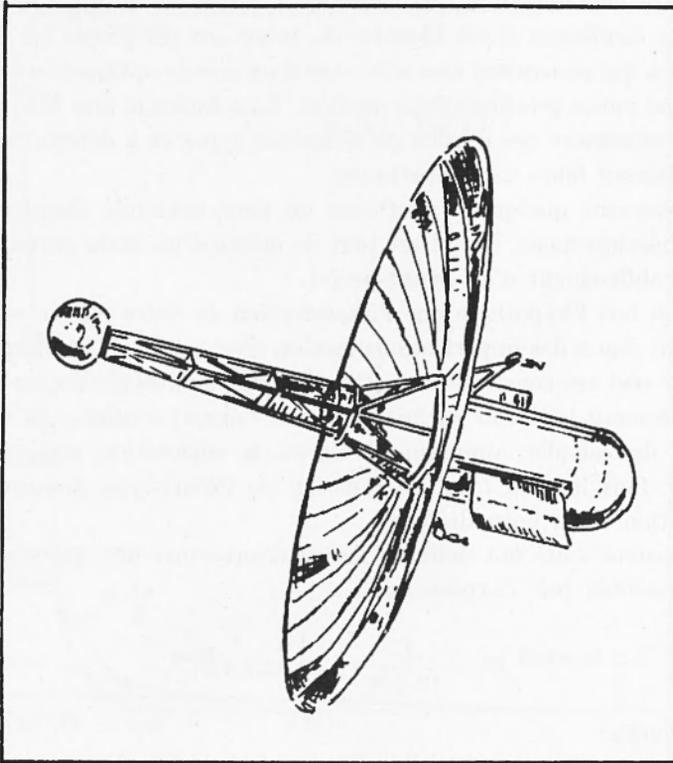


Fig. 1 - Véhicule spatiale à propulsion électrique « PHAETON ».

du miroir est prévu de façon telle que pendant les passages dans les zones éclairées l'énergie collectée soit suffisante pour alimenter la machine thermique et le stockage d'énergie.

#### L'ENSEMBLE MIROIR-CHAUDIÈRE.

On sait que pour un miroir parfait, les rayons lumineux en provenance du soleil définissent après réflexion une tache lumineuse située dans le plan focal à l'intérieur de laquelle, pour des valeurs de l'ouverture suffisamment faibles, est concentrée la quasi totalité de l'énergie mise en jeu. On sait aussi qu'en étudiant de très près la qualité optique du

miroir et la précision de son pointage vers le soleil on peut réaliser des températures très élevées de l'ordre de 4.000 °K voire supérieures. On ne peut espérer pour un miroir qui sera nécessairement léger et qui devra être dépliant une qualité même voisine de la qualité optique. Dans ces conditions il est illusoire de baser sur un projet sur les performances qui pourraient être attendue d'un miroir optiquement parfait, ou tout au moins proche de la perfection. La solution la plus sûre consiste certes à construire des miroirs de différents types et à déterminer expérimentalement leurs caractéristiques.

Moyennant quelques hypothèses on peut toutefois aborder le problème théoriquement, ce qui est tout de même d'un assez grand secours dans l'établissement d'un avant-projet.

Si on fait l'hypothèse que l'imperfection de notre miroir est essentiellement due à des imperfections locales, c'est-à-dire si l'on suppose que le miroir réel est constitué de petits éléments tous situés sur les paraboloïde que serait le miroir parfait mais non tangent à celui-ci, il est alors possible de calculer approximativement la répartition statistique de l'énergie dans le plan focal en fonction de l'écart-type des erreurs sur l'orientation de la normale locale.

Le calcul a été fait pour un miroir d'ouverture 60°. La répartition est représentée par l'expression:

$$E' = \frac{E}{12,5\Delta^2} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{r}{2,5\Delta R} \right)^2}$$

dans laquelle:

$\Delta$  = est l'écart-type sur la normale.

$E$  = est égal à 1,36 Kw/m<sup>2</sup> au voisinage de la Terre.

$r$  = est la distance à l'axe d'un point du plan focal.

$R$  = est la distance à l'axe du point d'ouverture angulaire maximale.

On a représenté sur la planche II la valeur de  $E'$  en fonction de  $r/R$  pour différentes valeurs de  $\Delta$ . On peut voir immédiatement que pour un écart-type relativement faible — de 1/4° par exemple — on a encore une concentration d'énergie extrêmement important dans la zone centrale et il est encore possible avec une cible de dimensions faibles de récupérer une fraction appréciable de l'énergie incidente.

Si on suppose que le rendement de reflexion du miroir est égal à 1, c'est-à-dire que son pouvoir émissif est nul on peut ainsi définir un ren-

dement d'interception  $\eta$  pour une cible de rayon  $r$  placée au centre d'un miroir donné dont l'écart-type sur la normale est connu. La variation de  $\eta$  en fonction de  $r/R$  et de  $\Delta$  est donnée sur la planche III,

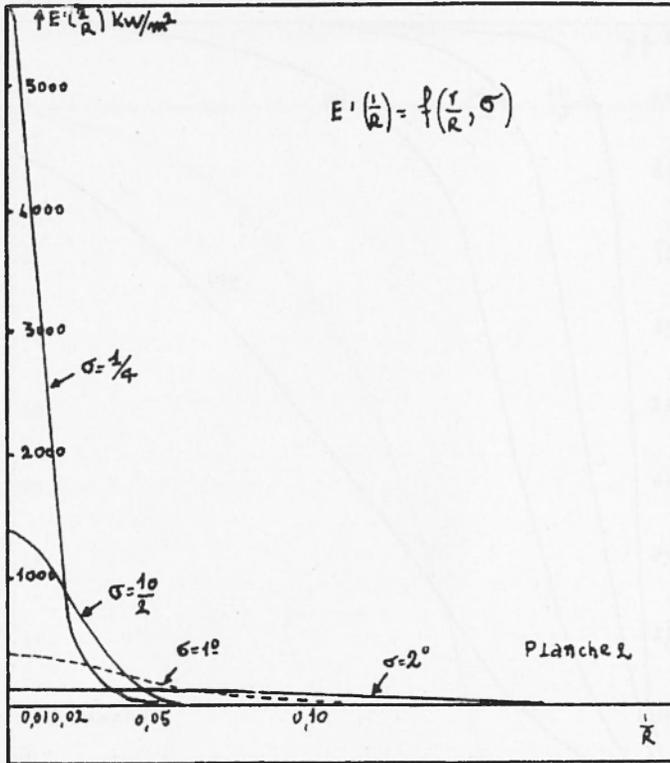


Fig. 2 - Eclairage énergétique dans le plan focal en fonction de  $\sigma$  et de  $r/R$  (écart de pointage).

on peut constater que dans la mesure où l'écart-type n'excède pas  $1/2^\circ$  à la rigueur  $1^\circ$  on peut avec une cible de dimension faible récupérer une fraction importante de l'énergie incidente, par contre pour  $\Delta = 2^\circ$  par exemple il faut une cible de diamètre égal à 10% de celui du miroir pour ne récupérer que 50% de l'énergie incidente, valeur qui sera encore abaissée si l'on tient compte:

- du fait que le rendement de reflexion n'est certainement pas égal à 1,
- de l'imprécision sur le pointage du miroir.

La quantité de chaleur qui, ainsi intercepté, peut être transmise au cycle est fonction de la température de la cible, c'est-à-dire de la tempé-

rature de source chaude du cycle thermodynamique. La densité d'énergie dans la surface delimitée par la cible correspond pour un corps noir à une certaine température d'équilibre (lorsque l'on augmente la diamètre

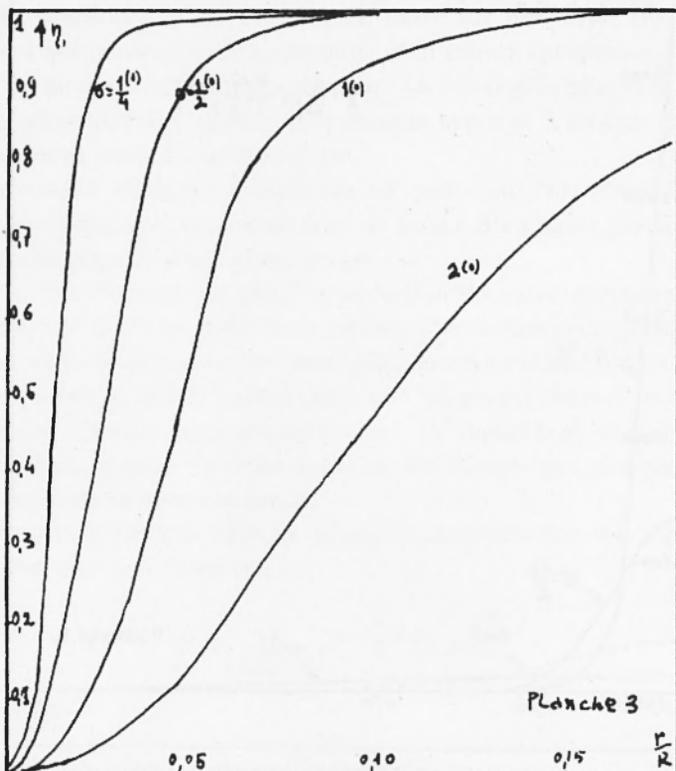


Fig. 3 - Rendement d'interception en fonction de la dimension de la cible et de  $\sigma$  (Reflectivité du miroir = 1)

de la cible d'ailleurs en vue d'améliorer le rendement d'interception on diminue cette température d'équilibre). Si notre cible est un corps-noir parfait elle va absorber de l'énergie selon la puissance quatrième de cette température et en rayonner pour la même surface selon la puissance quatrième de la température de source chaude du cycle. La différence entre ces deux quantités sera effectivement transmise au cycle.

On a représenté sur la planche IV la variation du rendement de captation global du système miroir-cible en fonction de la température de celle-ci (supposée être un corps noir parfait) pour une valeur de l'écart-type égale à  $1/2^\circ$ .

On peut constater que, dans la mesure où l'on désire conserver une valeur acceptable du rendement il n'est pas raisonnable d'envisager des températures de source chaude au delà de 1.000 ou à la rigueur 1.200 °K, tout au moins pour le niveau de puissance que nous nous sommes imposé, en raison de l'accroissement considérable de la taille du miroir.

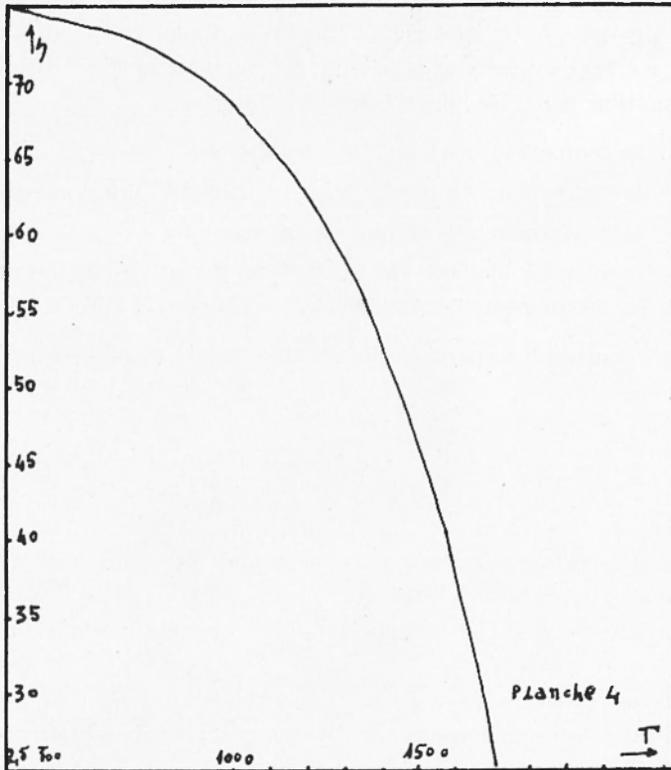


Fig. 4 - Rendement de captation de l'ensemble (miroir + cavité)  $\sigma = \frac{1}{2}$ , écart de pointage  $\frac{3}{4}$ .

La température de fusion de l'hydrure de lithium utilisée comme volant thermique étant égale à 950 °K nous avons adopté cette valeur comme température de la source chaude.

Par ailleurs le corps noir parfait n'existant pas il a été prévu que la chaudière serait une cavité laquelle si elle est bien dessinée peut avoir des caractéristiques voisines de celles du corps noir.

EVACUATION PAR RAYONNEMENT DE L'ENERGIE NON UTILISEE DANS LE CYCLE.

La température de la source froide ne peut pas être non plus choisie arbitrairement, en fait dans le mesure où l'on est capable de se fixer des valeurs pour les poids par unité de surface de miroir et de radiateur il est possible de mettre en évidence l'existence d'une valeur optimale du rapport de température, c'est-à-dire du rendement de Carnot de la transformation pour des valeurs données de:

- la température de source chaude ( $T_0$ )
- le rendement de captation de l'ensemble miroir-cavité ( $\eta_c$ )
- le rendement mécanique de la machine ( $\eta_t$ )
- le pouvoir émissif de la surface du radiateur (lequel peut d'ailleurs en première approximation être pris égal à 1).

On obtient pour le poids de l'ensemble miroir + radiateur l'expression ci-dessus:

$$P = \frac{0,7 \lambda W}{\eta_c \eta_t (1 - T_1/T_0)} + \frac{1}{2} \frac{\mu W}{\Delta \eta_t} \frac{1 - \mu_t (1 - T_1/T_0)}{T_1^4 (1 - T_1/T_0)}$$

$\lambda$  et  $\mu$  étant respectivement les poids spécifiques de miroir et de radiateur.  $\Delta$  étant la constante de Stefan.

En dérivant  $P/W$  par rapport à  $T_1/T_0$  on peut trouver la valeur optimale de ce rapport.

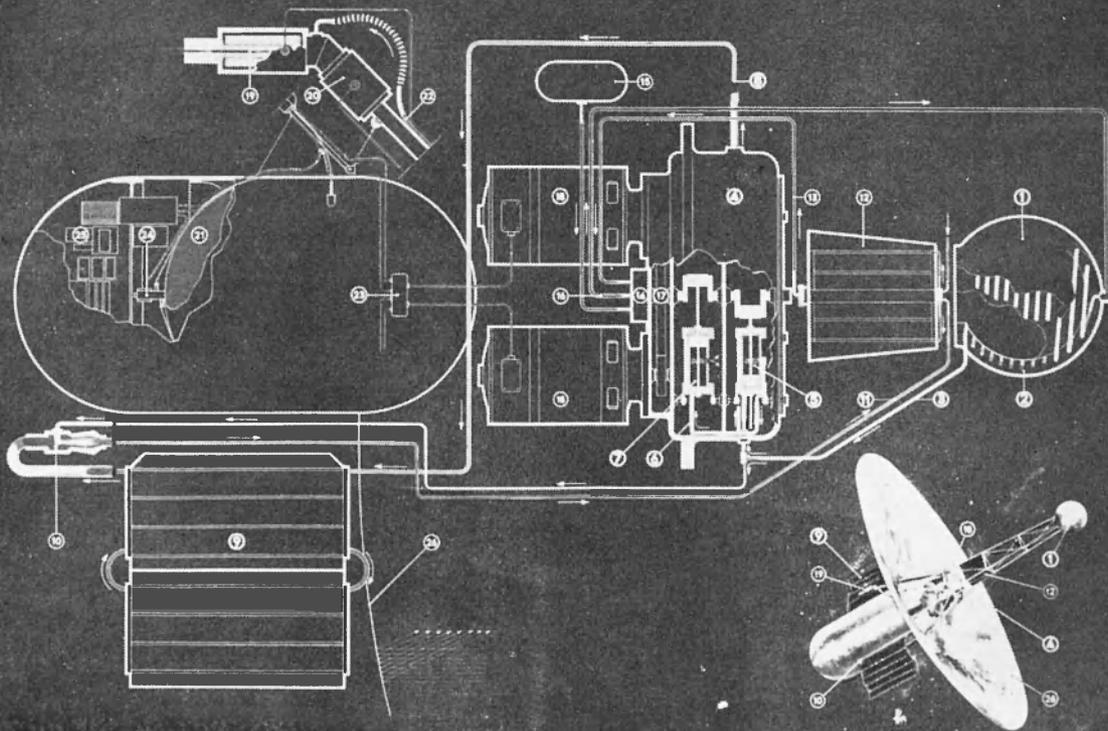
Pour les procédés de construction auxquels on peut actuellement penser il est raisonnable de prendre  $\lambda = \mu$ , dans ces conditions pour des valeurs raisonnables des rendements  $\eta_c$  et  $\eta_t$  et pour la température de source chaude précisée plus haut, on peut montrer que  $T_1$  doit être de l'ordre de 500 °K, correspondant à un rendement de Carnot de 47%.

LE CYCLE DE TRANSFORMATION.

Entre ces deux températures on peut envisager un certain nombre de cycles utilisant différents fluides moteurs, dans la mesure où l'on désire faire seulement un seul cycle il semble que ce soit le mercure qui soit le mieux adapté.

# VEHICULE SPATIAL A PROPULSION ELECTRIQUE

"PHAETON" — REALISATION SEPR —



VERNET-LOZET

Fig. 5

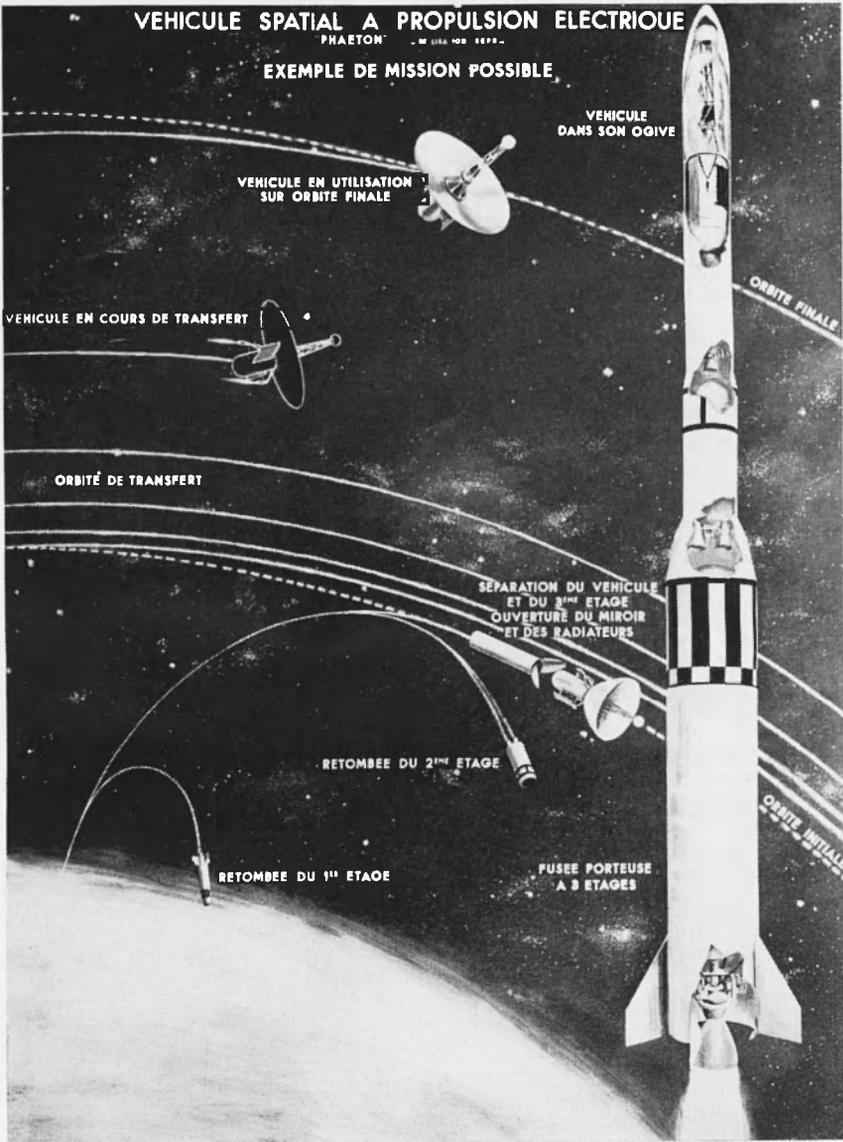


Fig. 6

Nous avons choisi, au moins dans la première version, une machine alternative, essentiellement pour deux raisons:

— il nous a semblé extrêmement probable qu'en raison du très faible débit le rendement d'une turbine serait mauvais (au moins pour une turbine du type conventionnel);

— le fonctionnement selon un cycle de Rankinepur, sans surchauffe, qui présente l'avantage de simplifier de façon assez sensible la machine, impose au cours de la détente une fraction croissante de phase condensée qui à priori n'est guère compatible avec le bon fonctionnement d'une turbine.

Les études en cours montreront en fait si ces hypothèses sont justifiées

Pour les conditions de fonctionnement qui viennent d'être énoncées le poids total de la source d'énergie comprenant l'ensemble miroir-cavité, la machine et le radiateur est égal à 84 kg se décomposant comme suit:

— Miroir	28 kg
— Chaudière	5 kg
— Hydrure de lithium	20 kg
— Moteur + pompe + alternateur	19 kg
— Radiateur	7 kg
— Mercure	5 kg

Le poids d'hydrure de lithium et la surface du miroir ont été prévus pour une mission consistant en un transfert continu depuis une orbite basse jusqu'à une orbite équatoriale synchrone. Nous avons la certitude que pour cette puissance l'usage ou tout autre mode de conversion direct ou indirect de l'énergie solaire en électricité conduirait à un poids considérablement plus élevé tout au moins sur la base des possibilités actuelles. Le développement de l'étude montrera peut être que les hypothèses que nous avons faites sur la qualité du miroir sont pessimistes et qu'il est possible d'obtenir des températures de sources chaudes plus élevées avec un rendement de captation acceptable, dans le but de préparer un véhicule prêt à fonctionner dans les 5 qui années viennent, il nous a semblé toutefois qu'elles étaient raisonnables.

---