

# LOIS DE PROPULSION

## 1) Introduction

Les vaisseaux destinés à sillonner le système solaire ou à effectuer des missions vers les étoiles voisines auront évidemment des capacités limitées en ce qui concerne les quantités d'ergol et de propergol qu'ils pourront emporter. Précisons que nous utilisons le terme "ergol" pour désigner la substance dont le vaisseau tire son énergie (deutérium, uranium, antimatière...) et le terme "propergol", pour désigner la substance dont l'éjection crée la poussée. Par ailleurs et quelle que soit la structure et l'agencement de la machinerie assurant la propulsion du vaisseau, l'ampleur des puissances mises en jeu, jointe au fait que la masse spécifique des propulseurs ne saurait être très réduite, exige une analyse sérieuse des possibilités d'optimisation des paramètres qui conditionnent le processus même d'accélération. L'existence de lois optimales résulte de ce que l'impulsion, donc la poussée créée par un moteur à réaction, est proportionnelle à la vitesse d'éjection et au débit de masse, tandis que la puissance mise en jeu par le propulseur est proportionnelle au débit de masse et au carré de la vitesse d'éjection.

L'objet de ce chapitre est de déterminer les lois de consommation du propergol en fonction du temps, pour une évolution connue de la puissance développée, impliquant, par conséquent, des lois d'évolution bien définies de la vitesse d'éjection, de la poussée et de l'accélération, permettant de réaliser, dans une durée minimum, les meilleures performances de vitesse ou de distance parcourue, cela pour des capacités données en ergol, propergol et puissances de propulsion. L'étude est effectuée dans le cas relativiste.

## 2) Dynamique du vol

Nous établirons les équations du vol propulsé dans le cas relativiste. Les équations, correspondant au cas non relativiste, s'en déduisent aisément en faisant tendre la vitesse de la lumière vers l'infini.

### 2.1) Rappel de notions de mécanique relativiste

La Théorie de la Relativité représente le déroulement des phénomènes dans un espace-temps à trois dimensions du genre espace,  $x, y, z$  et une du genre temps,  $t$ . L'espace-temps peut être repéré dans des référentiels galiléens qui sont représentés par des systèmes de coordonnées cartésiennes orthonormées ou dans des référentiels curvilignes. Un référentiel attaché à un corps en mouvement accéléré est nécessairement curviligne : les variétés spatiales  $t = \text{constante}$  sont des espaces à trois dimensions non euclidiens.

Les principaux êtres géométriques permettant d'élaborer et représenter des concepts physiques et, en particulier, de décrire le mouvement des corps, sont rappelés de façon détaillée dans [l'appendice 1](#)

Le mouvement d'un point matériel (ou d'un objet de dimensions suffisamment réduites par rapport aux corps qui l'entourent pour pouvoir être considéré comme un point) est représenté par sa ligne d'Univers, entièrement contenue dans le cône de la lumière en chacun de ses points. Le vecteur tangent à cette courbe en un point et dont le carré de la norme est égal à  $-1$ , avec la représentation classiquement adoptée pour le tenseur métrique, est la vitesse d'Univers. Les équations du mouvement peuvent s'écrire sous une forme covariante, la même pour tout système de coordonnées galiléen ou non, en utilisant l'opérateur de dérivation covariante défini à partir des composantes de la connexion affine relatives au repère utilisé.

### 2.2) Équations du mouvement

La propulsion d'un vaisseau dans le vide peut être obtenue par réaction, en éjectant, depuis le vaisseau, une masse animée d'une certaine vitesse. La conservation de l'impulsion entraîne l'application d'une poussée. On peut aussi, en principe, exercer une force sur le plasma interstellaire ou interplanétaire qui constitue, alors, un point d'appui. Les puissances mises en jeu ainsi que la poussée qui en résulte sont définies, à priori, dans un référentiel lié au vaisseau. En principe, la construction d'un référentiel de repos par rapport à un mobile en mouvement non uniforme suppose la recherche d'un champ de vecteurs, dérivant d'un potentiel, tangent à la trajectoire du mobile considéré et satisfaisant partout aux équations du mouvement : c'est un problème non trivial dont la solution est connue dans le cas d'un mouvement rectiligne uniformément accéléré. Cependant, les dimensions d'un vaisseau, même de grande taille, sont suffisamment réduites par rapport au rayon de sa trajectoire d'Univers, compte tenu des accélérations réalisées, pour que l'on puisse, sans grande erreur, le considérer comme un objet ponctuel. Dès lors, on peut se limiter à définir un référentiel local partout tangent à la ligne d'Univers décrite par le mobile et de même orientation que le repère galiléen lié aux étoiles, la correspondance entre les deux repères étant définie, seulement au voisinage de la ligne d'Univers considérée et seulement pour les composantes des vecteurs et des tenseurs, par une transformation de Lorentz purement locale. Dans un tel repère, le tenseur métrique conserve en tout point les valeurs galiléennes et toutes les composantes de la vitesse d'Univers sont nulles à l'exception de la composante temporelle égale à l'inverse de la vitesse de la lumière (avec la représentation classiquement adoptée pour le tenseur métrique).

## LOIS DE PROPULSION

Pour écrire les équations de la dynamique, nous aurons besoin d'un certain nombre de paramètres que nous définissons une fois pour toutes ci-dessous :

- Masse totale du vaisseau au départ :  $M_0$  (en kilogrammes)
- Masse consommée (propergol et ergol) :  $m(\tau)$  (en kilogrammes)
- Puissance du propulseur :  $w(\tau)$  (en watts)
- Débit de masse éjectée (en kilogrammes par seconde) :  
 $\dot{m}(\tau)$
- Masse d'appui extérieur :  $p(\tau)$  (en kilogrammes par seconde)
- Vitesse du vaisseau par rapport aux étoiles :  $v(\tau)$  (m/sec)
- Vitesse du propergol par rapport au vaisseau :  $V(\tau)$  (m/sec)
- Énergie spécifique de l'ergol :  $\kappa$  (en joule par kilogramme).
- Accroissement de vitesse de la masse d'appui externe :  $\upsilon$  (m/sec).
- Masse spécifique du propulseur :  $K$  (kilogramme par watt)
- Densité du propergol au cours de son éjection :  $\rho(\tau)$  (kilogrammes par mètre cube)
- Rapport entre la section de la tuyère et la masse du propulseur :  $\sigma$  (en mètres carrés par kilogramme).
- Fraction de la masse totale consacrée à la propulsion (propergol, ergol et propulseur) :  $\eta$
- Fraction de la masse totale constituée par l'ergol et le propergol :  $\alpha$
- Fraction de la masse totale constituée par l'ergol :  $\chi$
- Rendement du propulseur :  $\zeta$

Dans les expressions ci-dessus,  $\tau$  désigne le temps propre du vaisseau relié à la longueur,  $s$ , d'un arc de la ligne d'Univers par :

$$\tau = \frac{s}{c}$$

Les équations du mouvement, dans le référentiel lié au vaisseau, s'obtiennent en écrivant la conservation de l'énergie et de l'impulsion :

- masse matérielle éjectée par unité de temps :

$$\dot{m}(\tau) - \frac{w}{c^2}$$

- impulsion emportée par la masse éjectée :

$$\left(\dot{m}(\tau) - \frac{w}{c^2}\right) \frac{V(\tau)}{\sqrt{1 - \frac{V^2(\tau)}{c^2}}}$$

- énergie emportée par la masse éjectée :

$$\left(\dot{m}(\tau) - \frac{w}{c^2}\right) \frac{-c^2}{\sqrt{1 - \frac{V^2(\tau)}{c^2}}}$$

- impulsion emportée par la masse d'appui externe :

$$p \frac{(v+\upsilon)}{\sqrt{1 - \frac{(v+\upsilon)^2}{c^2}}} - p \frac{v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cong p \frac{\upsilon}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} + p \frac{\frac{v\upsilon}{c^2}}{(1 - \frac{v^2}{c^2})^{\frac{3}{2}}}$$

- énergie emportée par la masse d'appui externe

$$p \frac{-c^2}{\sqrt{1 - \frac{(v+\upsilon)^2}{c^2}}} + p \frac{c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cong -p \frac{v\upsilon}{(1 - \frac{v^2}{c^2})^{\frac{3}{2}}}$$

## LOIS DE PROPULSION

Comme la masse du vaisseau, à un instant donné, est égale à la masse initiale diminuée de la masse de propergol et d'ergol consommée, la conservation de l'impulsion et de l'énergie, dans le référentiel lié au vaisseau, s'écrit :

$$\begin{aligned} (\dot{m}(\tau) - \frac{w}{c^2}) \frac{V(\tau)}{\sqrt{1 - \frac{V^2(\tau)}{c^2}}} + p \frac{v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} + p \frac{\frac{vV}{c^2}}{(1 - \frac{v^2}{c^2})^{\frac{3}{2}}} &= (M_0 - m(\tau))\gamma \\ (\dot{m}(\tau) - \frac{w}{c^2}) \frac{-c^2}{\sqrt{1 - \frac{V^2(\tau)}{c^2}}} - p \frac{vV}{(1 - \frac{v^2}{c^2})^{\frac{3}{2}}} &= -\dot{m}(\tau)c^2 \end{aligned}$$

Calculons, à présent, de façon explicite, l'accélération,  $\gamma$ , du vaisseau. Dans le système galiléen lié aux étoiles, la variation d'impulsion du vaisseau s'écrit :

$$\dot{p}_x = \frac{d}{d\tau} \left( \frac{Mv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right) = \frac{M\dot{v} \frac{v^2}{c^2}}{(1 - \frac{v^2}{c^2})^{\frac{3}{2}}} + \frac{M\dot{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} + \frac{\dot{M}v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \dot{p}_t = \frac{d}{d\tau} \left( \frac{-Mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right) = \frac{-M\dot{v}v}{(1 - \frac{v^2}{c^2})^{\frac{3}{2}}} - \frac{\dot{M}c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

On en déduit l'expression explicite de l'accélération dans le système lié au vaisseau en opérant une transformation de Lorentz locale de covariance (car le vecteur d'impulsion est représenté en mode covariant) :

$$M\gamma = \frac{\dot{p}_x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} + \frac{\frac{v}{c^2} \dot{p}_t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{M\dot{v}}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

En fin de compte, la conservation de l'impulsion et de l'énergie, dans le référentiel lié au vaisseau, s'écrit :

$$\begin{aligned} (\dot{m}(\tau) - \frac{w}{c^2}) \frac{V}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} + p \frac{v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} + p \frac{\frac{vV}{c^2}}{\sqrt{(1 - \frac{v^2}{c^2})^3}} &= \frac{(M_0 - m(\tau))\dot{v}}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \\ (\dot{m}(\tau) - \frac{w}{c^2}) \frac{-c^2}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} - p \frac{vV}{\sqrt{(1 - \frac{v^2}{c^2})^3}} &= -\dot{m}(\tau)c^2 \end{aligned}$$

En fait, en raison de la très faible densité du gaz interstellaire, constitué principalement par de l'hydrogène en partie ionisé, la masse extérieure n'a de réelle importance que dans des circonstances bien particulières : lorsque la vitesse du vaisseau est très élevée et qu'il se trouve couplé au gaz par un champ magnétique très étendu. En désignant par  $S$  la section de la veine fluide couplée avec le champ, par  $v$ , le nombre de protons par mètre cube et, par  $\mu_0$ , la masse du proton, la masse de gaz couplée au vaisseau est donnée par :

$$P = v\mu_0 S v / (1 - v^2/c^2)$$

La présence du carré du facteur de Lorentz provient de ce que ce dernier augmente deux fois la densité : en réduisant le volume et en augmentant la masse.

En supposant que la surface  $S$  est un cercle de 2000 km de rayon, pour une densité  $v$  de 30000 protons par mètre cube et pour une vitesse de 297000 km/sec, on a :

$$P = 4\pi \cdot 10^{12} \cdot 30000 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 2,97 \cdot 10^8 \cdot 50 = 9,35 \text{ kg/sec}$$

En fait, il serait possible d'ioniser l'hydrogène en totalité, ce qui multiplierait ce débit par 30.

Le couplage du vaisseau avec le gaz interstellaire permet, le cas échéant, d'envisager un mode de propulsion par ondes d'Alphven mais ce dernier ne présente d'intérêt que lorsque la vitesse du vaisseau a déjà été portée à une valeur suffisante par des moyens conventionnels et il exige, en outre, le déploiement d'un champ magnétique étendu lequel nécessite des circuits supraconducteurs de grande dimension et d'un poids élevé. Ce couplage est, cependant, indispensable pour assurer le freinage, à grande distance du système solaire, d'un vaisseau dont la vitesse a atteint une fraction importante de celle de la lumière.

### 2.3) Loi d'accélération optimale

Classiquement, la loi d'accélération optimale, définie comme permettant d'atteindre la vitesse maximum pour une masse donnée de propergol, est la loi dite "synergique" qui consiste à réaliser une accélération aussi élevée que possible. Comme la fraction disponible de la charge utile doit être partagée entre le propergol, l'ergol et le propulseur, les conditions permettant de réaliser la loi synergique ne sont jamais satisfaites. Ainsi, on se trouve conduit à rechercher la loi d'accélération permettant de réaliser les meilleures performances en vitesse ou distance parcourue pour des valeurs fixées des masses respectives de propergol, d'ergol et de propulseur. Nous choisirons, comme critère, de parcourir une distance donnée dans le minimum de temps en utilisant la totalité de

## LOIS DE PROPULSION

l'ergol et du propergol disponibles. Nous distinguerons deux cas, suivant que le freinage doit être assuré par le propulseur du vaisseau ou par un autre moyen (tel que la réaction d'un champ magnétique sur le plasma interstellaire).

### 2.3.1) Équations du problème d'optimisation

Lorsque le trajet accompli est très long, la vitesse du vaisseau peut atteindre une fraction importante de celle de la lumière et il n'est plus possible de négliger les corrections relativistes. Il faut, donc, utiliser les équations complètes du mouvement telles qu'elles ont été établies au paragraphe 2.2, page 3. Ces deux équations, exprimant la conservation de l'impulsion et de l'énergie, s'écrivent, respectivement, lorsqu'il n'y a aucune action sur un point d'appui extérieur :

- conservation de l'impulsion :

$$\left(\dot{m}(\tau) - \frac{w}{c^2}\right) \frac{V}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} = \frac{(M_0 - m(\tau))\dot{v}}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

- conservation de l'énergie :

$$\left(\dot{m}(\tau) - \frac{w}{c^2}\right) \frac{-c^2}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} = -\dot{m}(\tau)c^2$$

Rappelons que, dans ces équations,  $w$  représente la puissance intrinsèque du propulseur.  $V$  est la vitesse d'éjection du propergol par rapport au vaisseau, tandis que  $v$  désigne la vitesse du vaisseau par rapport aux étoiles.  $M_0$  est la masse initiale du vaisseau et,  $m$ , la masse consommée à l'instant  $\tau$ , lequel désigne le temps propre du vaisseau relié au temps d'une horloge liée aux étoiles, par :

$$d\tau = dt \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

On notera que,  $M_0$  étant supérieur à  $m$  et le débit de masse étant supérieur à  $w/c^2$ ,  $V$  est du même signe que l'accélération.

On déduit immédiatement, des deux équations écrites ci-dessus :

$$\dot{m}(\tau)V = \frac{(M_0 - m(\tau))\dot{v}}{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{(M_0 - m(\tau))v'\dot{m}(\tau)}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

avec :

$$v' = \frac{dv}{dm} = \frac{dv}{dt} \frac{dt}{dm} = \frac{\dot{v}}{\dot{m}(\tau)}$$

par suite :

$$\frac{V}{M_0 - m(\tau)} = \frac{v'}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

d'où, en substituant dans la première équation (conservation de l'impulsion) :

$$\left(\dot{m}(\tau) - \frac{w}{c^2}\right) \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} = \dot{m}(\tau)$$

On notera que la dérivée, par rapport au temps, de la masse de propergol consommée, est nécessairement positive, de sorte que, la masse consommée étant supérieure à celle de l'énergie mise en jeu, le signe du radical doit aussi être positif.

En résolvant par rapport à  $dm/d\tau$ , on obtient :

$$\frac{dm}{d\tau} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}\right) = \frac{w}{c^2}$$

et :

$$d\tau = \frac{c^2}{w} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}\right) dm$$

En substituant, dans cette relation, l'expression trouvée ci-dessus pour  $V$ , on obtient :

$$d\tau = \frac{c^2}{w} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{(M_0 - m)^2 v'^2}{c^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^2}}\right) dm$$

Le signe propre du radical étant positif.

## LOIS DE PROPULSION

D'autre part, on peut écrire :

$$\frac{d}{dm} \left( \frac{v}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \right) = \frac{v' \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} + \frac{v v'}{c^2 \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}}{1-\frac{v^2}{c^2}} = \frac{v'}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} \left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)}$$

En posant :  $u = \frac{v}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ , on obtient :  $1-\frac{v^2}{c^2} = \frac{c^2}{c^2+u^2}$ .

On en déduit :

$$d\tau = \frac{c^2}{w} \left( 1 - \sqrt{1 - (M_0 - m)^2 \left( \frac{du}{dm} \right)^2 \frac{1}{c^2 + u^2}} \right) dm \quad (\text{le signe du radical est bien positif})$$

Il faut choisir  $u$  en fonction de  $m$  de manière à rendre minimum le temps nécessaire pour effectuer un parcours donné. La distance parcourue est donnée par :

$$D = \int v dt = \int \frac{v}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} d\tau = \int u d\tau$$

de sorte que le problème d'extremum s'écrit :

$$\delta \int \left[ \frac{c^2}{w} \left( 1 - \sqrt{1 - (M_0 - m)^2 \left( \frac{du}{dm} \right)^2 \frac{1}{c^2 + u^2}} \right) \right] dm = 0$$

Dans le cas d'un propulseur non consommable, que nous examinons ci-dessous, en premier lieu,  $w$  est constant. L'équation des variations s'écrit :

$$\delta \tau = \frac{c^2}{w} \int \left\{ \frac{(M_0 - m)^2 \left( \frac{du}{dm} \right)^2 \frac{2u}{(c^2 + u^2)^2}}{2 \sqrt{1 - (M_0 - m)^2 \left( \frac{du}{dm} \right)^2 \frac{1}{c^2 + u^2}}} \delta u + \frac{(M_0 - m)^2 2 \frac{du}{dm} \frac{1}{c^2 + u^2}}{2 \sqrt{1 - (M_0 - m)^2 \left( \frac{du}{dm} \right)^2 \frac{1}{c^2 + u^2}}} \delta u' \right\} dm$$

Classiquement, on se débarrasse du terme en  $u'$  au moyen d'une intégration par partie portant sur le second terme, ce qui donne :

$$\delta \tau = \frac{c^2}{w} \int \left\{ \frac{(M_0 - m)^2 \left( \frac{du}{dm} \right)^2 \frac{2u}{(c^2 + u^2)^2}}{2 \sqrt{1 - (M_0 - m)^2 \left( \frac{du}{dm} \right)^2 \frac{1}{c^2 + u^2}}} - \frac{d}{dm} \left[ \frac{(M_0 - m)^2 2 \frac{du}{dm} \frac{1}{c^2 + u^2}}{2 \sqrt{1 - (M_0 - m)^2 \left( \frac{du}{dm} \right)^2 \frac{1}{c^2 + u^2}}} \right] \right\} \delta u dm$$

La condition d'extremum s'obtient en annulant identiquement le terme sous le signe intégral, ce qui conduit à l'équation d'Euler, soit :

$$\frac{(M_0 - m)^2 \left( \frac{du}{dm} \right)^2 \frac{2u}{(c^2 + u^2)^2}}{2 \sqrt{1 - (M_0 - m)^2 \left( \frac{du}{dm} \right)^2 \frac{1}{c^2 + u^2}}} + \frac{d}{dm} \left[ \frac{(M_0 - m)^2 2 \frac{du}{dm} \frac{1}{c^2 + u^2}}{2 \sqrt{1 - (M_0 - m)^2 \left( \frac{du}{dm} \right)^2 \frac{1}{c^2 + u^2}}} \right] = 0$$

### 2.3.2) Solution du problème d'optimisation

#### 2.3.2.1) Parcours sans phase de freinage

L'équation ci-dessus peut encore s'écrire :

$$\frac{du}{dm} \frac{1}{c^2 + u^2} + \frac{\frac{d}{dm} \left[ \frac{(M_0 - m)^2 \frac{du}{dm} \frac{1}{c^2 + u^2}}{\sqrt{1 - (M_0 - m)^2 \left( \frac{du}{dm} \right)^2 \frac{1}{c^2 + u^2}}} \right]}{(M_0 - m)^2 \frac{du}{dm} \frac{u}{c^2 + u^2}} = 0$$

d'où l'on tire, successivement, par une intégration immédiate et des calculs élémentaires :

$$\frac{\sqrt{c^2 + u^2} (M_0 - m)^2 \frac{du}{dm} \frac{u}{c^2 + u^2}}{\sqrt{1 - (M_0 - m)^2 \left( \frac{du}{dm} \right)^2 \frac{1}{c^2 + u^2}}} = a$$

## LOIS DE PROPULSION

a est une constante qui doit être déterminée par les conditions à l'origine ou à la fin du mouvement. Il importe de noter que, le propergol étant constamment consommé au cours du temps, la constante a doit avoir le même signe que l'accélération. On en tire, immédiatement, après avoir chassé le dénominateur et élevé les deux membres au carré :

$$(M_0 - m)^4 \left(\frac{du}{dm}\right)^2 = a^2 (c^2 + u^2 - (M_0 - m)^2 \left(\frac{du}{dm}\right)^2)$$

soit, encore :

$$((M_0 - m)^4 + a^2 (M_0 - m)^2) \left(\frac{du}{dm}\right)^2 = a^2 (c^2 + u^2)$$

d'où :

$$\left(\frac{du}{dm}\right)^2 \frac{1}{c^2 + u^2} = \frac{a^2}{(M_0 - m)^4 + a^2 (M_0 - m)^2} = \frac{1}{(M_0 - m)^2} \frac{1}{(M_0 - m)^2 + a^2}$$

Rappelons la relation entre la différentielle du temps propre,  $d\tau$  et la masse ainsi que la vitesse d'univers, établie au début de la page 5 :

$$d\tau = \frac{c^2}{w} \left(1 - \sqrt{1 - (M_0 - m)^2 \left(\frac{du}{dm}\right)^2 \frac{1}{c^2 + u^2}}\right) dm$$

on en tire, compte tenu de l'expression trouvée, ci-dessus, pour le dernier terme sous le radical :

$$\left(1 - \frac{w}{c^2} \frac{d\tau}{dm}\right)^2 = 1 - (M_0 - m)^2 \left(\frac{du}{dm}\right)^2 \frac{1}{c^2 + u^2} = \frac{(M_0 - m)^2}{(M_0 - m)^2 + a^2}$$

d'où résulte :

$$\frac{w}{c^2} \frac{d\tau}{dm} = 1 - \frac{(M_0 - m)}{\sqrt{(M_0 - m)^2 + a^2}}$$

Notons que, d'après l'expression de  $d\tau/dm$  rappelée ci-dessus, la dérivée du temps propre doit être inférieure à  $c^2/w$ , de sorte que le signe du radical, sous la dernière expression, doit bien être le signe plus. On en tire, par une intégration élémentaire :

$$\frac{w}{c^2} \tau = m + \sqrt{(M_0 - m)^2 + a^2} - \sqrt{M_0^2 + a^2}$$

La valeur de la constante d'intégration étant obtenue immédiatement du fait que le propergol consommé est nul pour  $\tau = 0$ . Notons que la loi de consommation du propergol, en fonction du temps propre, n'est pas encore complètement définie puisqu'elle contient la constante a : celle-ci doit être définie, en fonction de la vitesse d'éjection finale maximum du propergol, laquelle est déterminée pour optimiser le temps de parcours, compte tenu du fait que la valeur maximum de la vitesse d'éjection est limitée par la puissance spécifique de l'ergol utilisé.

Nous poserons, dans ce qui suit :

$$T = \frac{w}{c^2} \tau + \sqrt{a^2 + M_0^2} - M_0$$

T est donc une variable auxiliaire qui a la dimension d'une masse.  
de sorte que :

$$(T + (M_0 - m))^2 = T^2 + 2T(M_0 - m) + (M_0 - m)^2 = a^2 + (M_0 - m)^2$$

d'où :

$$M_0 - m = \frac{a^2 - T^2}{2T} \quad \text{et} \quad \dot{m}(\tau) = \left[ \frac{-2T \frac{w}{c^2} 2T - 2(a^2 - T^2) \frac{w}{c^2}}{4T^2} \right] = \frac{w}{c^2} \left[ \frac{a^2 + T^2}{2T^2} \right]$$

le facteur  $w/c^2$  n'étant autre que la dérivée, par rapport au temps propre, de la variable T nouvellement introduite. Pour ce qui suit, nous remplaçons la constante a, encore non déterminée, par une autre constante, A, qui lui est reliée par :

$$a = A M_0 \quad \text{et} \quad \text{de même} : T = \Theta M_0$$

$\Theta$  et A sont donc des variables auxiliaires sans dimension.

En exprimant w au moyen des paramètres de structure du vaisseau ceci permet d'écrire des expressions totalement homogènes ne faisant intervenir que des variables sans dimension, soit :

$$1 - \frac{m}{M_0} = \frac{A^2 - \Theta^2}{2\Theta} \quad \text{et} \quad \frac{\dot{m}(\tau)}{M_0} = \frac{(\eta - \alpha)}{K c^2} \left[ \frac{A^2 + \Theta^2}{2\Theta^2} \right]$$

En reprenant l'expression de  $d\tau$  en fonction de dm donnée au début de la page, soit :

$$d\tau = \frac{c^2}{w} \left(1 - \sqrt{1 - (M_0 - m)^2 \left(\frac{du}{dm}\right)^2 \frac{1}{c^2 + u^2}}\right) dm$$

## LOIS DE PROPULSION

et en y substituant les expressions trouvées ci-dessus pour  $dm/d\tau$  et pour  $m$ , on obtient, compte tenu de ce que :

$$\left(\frac{du}{dm}\right)^2 \frac{1}{c^2+u^2} = \frac{v^2 c^2}{(c^2-v^2)^2} = \frac{\dot{v}^2 c^2}{(c^2-v^2)^2} \frac{1}{\dot{m}} \quad (\text{page 4 et début de page 5})$$

$$\frac{a^2+T^2}{2T^2} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{(a^2-T^2)^2 c^4}{4T^2 w^2 (a^2+T^2)^2 (c^2-v^2)^2}} \right] = 1$$

des manipulations élémentaires permettent d'obtenir, successivement :

$$\frac{a^2+T^2}{2T^2} \sqrt{\frac{(a^2+T^2)^2}{4T^4} - \frac{(a^2-T^2)^2 c^4}{4T^2 w^2 (c^2-v^2)^2}} = 1 \quad \frac{a^2-T^2}{2T^2} = \sqrt{\frac{(a^2+T^2)^2}{4T^4} - \frac{(a^2-T^2)^2 c^4}{4T^2 w^2 (c^2-v^2)^2}}$$

$$\frac{(a^2-T^2)^2}{4T^4} = \frac{(a^2+T^2)^2}{4T^4} - \frac{(a^2-T^2)^2 c^4}{4T^2 w^2 (c^2-v^2)^2} \quad \frac{(a^2-T^2)^2 c^4}{4T^2 w^2 (c^2-v^2)^2} = \frac{(a^2+T^2)^2 - (a^2-T^2)^2}{4T^4} = \frac{a^2}{T^2}$$

et, finalement :

$$\frac{\dot{v}c}{c^2-v^2} = \frac{w}{c^2} \frac{2a}{(a^2-T^2)} = \frac{(\eta-\alpha)}{Kc^2} \frac{2A}{(A^2-\Theta^2)} \quad (\text{Bien évidemment, } A \text{ est du signe de l'accélération.})$$

Compte tenu de ce que :  $\dot{\Theta} = \frac{\eta-\alpha}{Kc^2}$ , on peut encore écrire, en décomposant les fractions en éléments simples :

$$\frac{\dot{v}}{c+v} + \frac{\dot{v}}{c-v} = 2 \left( \frac{\dot{\Theta}}{A+\Theta} + \frac{\dot{\Theta}}{A-\Theta} \right)$$

Une intégration élémentaire permet d'écrire immédiatement :

$$\frac{c+v}{c-v} = B \left[ \frac{A+\Theta}{A-\Theta} \right]^2$$

où B est une constante dont la valeur est déterminée par la vitesse initiale  $v_0$ . En résolvant par rapport à v, on obtient :

$$v = c \left[ \frac{B(A+\Theta)^2 - (A-\Theta)^2}{B(A+\Theta)^2 + (A-\Theta)^2} \right]$$

Pour  $\tau = 0$ ,  $\Theta_0 = (A^2+1)^{1/2} - 1$ . De sorte que :

$$B = \frac{c+v_0}{c-v_0} \left[ \frac{A - \sqrt{A^2+1} + 1}{A + \sqrt{A^2+1} - 1} \right]^2$$

La constante A est déterminée par la valeur de la vitesse d'éjection du propergol à la fin de la phase propulsée : en effet, c'est à cet instant que la vitesse en question prend sa valeur la plus élevée, laquelle ne peut pas dépasser la valeur maximum autorisée par le propulseur et l'ergol utilisé. La fin de la phase propulsée est marquée par l'exhaustion du propergol. D'après l'expression obtenue pour le temps  $\tau$  au début de la page 6, on a :

$$\tau_{\text{Fin}} = \frac{Kc^2}{(\eta-\alpha)} \left[ \alpha + \sqrt{(1-\alpha)^2 + A^2} - \sqrt{1+A^2} \right]$$

Rappelons que  $\alpha$  représente la fraction de la masse du vaisseau constituée par le propergol et l'ergol, tandis que  $\eta$  représente la fraction de la masse constituée par l'ensemble propulseur, propergol et ergol. La valeur du débit de masse du propergol, à la fin de la phase de propulsion, s'écrit corrélativement, d'après l'expression obtenue ci-dessus, page 6 :

$$\dot{m}(\tau_{\text{Fin}}) = \frac{(\eta-\alpha)}{Kc^2} \left[ \frac{A^2 + \Theta_{\text{Fin}}^2}{2\Theta_{\text{Fin}}^2} \right] M_0$$

En substituant dans l'équation, obtenue page 4 et reliant le débit de propergol à la vitesse d'éjection, soit :

$$\dot{m}(\tau) \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}} \right) = \frac{w}{c^2}$$

cela donne :

$$\left( 1 - \sqrt{1 - \frac{V_{\text{Fin}}^2}{c^2}} \right) \frac{A^2 + \Theta_{\text{Fin}}^2}{2\Theta_{\text{Fin}}^2} = 1$$

On a, par ailleurs, d'après l'expression de  $\Theta$  en fonction de  $\tau$ , telle qu'elle résulte des relations écrites page 6 :

$$\Theta = \frac{1}{M_0} \left[ \frac{(\eta-\alpha)M_0}{Kc^2} \tau + \sqrt{A^2 M_0^2 + M_0^2} - M_0 \right] = \frac{(\eta-\alpha)}{Kc^2} \tau + \sqrt{A^2 + 1} - 1$$

$$\Theta_{\text{Fin}} = \sqrt{(1-\alpha)^2 + A^2} - (1-\alpha)$$

## LOIS DE PROPULSION

En portant dans l'équation ci-dessus, reliant la durée totale de la phase de propulsion à la vitesse d'éjection finale, on obtient, successivement :

$$1 - \sqrt{1 - \frac{V_{Fin}^2}{c^2}} = \frac{2(\sqrt{(1-\alpha)^2 + A^2} - (1-\alpha))^2}{(\sqrt{(1-\alpha)^2 + A^2} - (1-\alpha))^2 + A^2} \qquad 1 - \frac{2(\sqrt{(1-\alpha)^2 + A^2} - (1-\alpha))^2}{(\sqrt{(1-\alpha)^2 + A^2} - (1-\alpha))^2 + A^2} = \sqrt{1 - \frac{V_{Fin}^2}{c^2}}$$

$$\frac{A^2 - (\sqrt{(1-\alpha)^2 + A^2} - (1-\alpha))^2}{(\sqrt{(1-\alpha)^2 + A^2} - (1-\alpha))^2 + A^2} = \sqrt{1 - \frac{V_{Fin}^2}{c^2}} \qquad \frac{2(1-\alpha)\sqrt{(1-\alpha)^2 + A^2} - 2(1-\alpha)^2}{2A^2 - 2(1-\alpha)\sqrt{(1-\alpha)^2 + A^2} + 2(1-\alpha)^2} = \sqrt{1 - \frac{V_{Fin}^2}{c^2}}$$

$$\frac{(1-\alpha)\sqrt{(1-\alpha)^2 + A^2} - (1-\alpha)^2}{A^2 - (1-\alpha)\sqrt{(1-\alpha)^2 + A^2} + (1-\alpha)^2} = \sqrt{1 - \frac{V_{Fin}^2}{c^2}} \qquad \frac{(1-\alpha)(\sqrt{(1-\alpha)^2 + A^2} - (1-\alpha))}{\sqrt{(1-\alpha)^2 + A^2}(\sqrt{(1-\alpha)^2 + A^2} - (1-\alpha))} = \sqrt{1 - \frac{V_{Fin}^2}{c^2}}$$

soit, enfin :

$$\sqrt{1 - \frac{V_{Fin}^2}{c^2}} = \frac{1-\alpha}{\sqrt{(1-\alpha)^2 + A^2}}$$

On en déduit immédiatement la valeur de la constante A, soit :

$$A = (1-\alpha) \frac{V_{Fin}}{\pm \sqrt{c^2 - V_{Fin}^2}}$$

On notera que la valeur fixée pour la vitesse d'éjection finale du propergol, à l'exhaustion, détermine globalement le rythme de la consommation du propergol et, donc, la valeur de l'accélération, compte tenu des valeurs des paramètres de structure du vaisseau. Comme nous l'avons signalé ci-dessus (page 5), A doit être de même signe que l'accélération, ce qui détermine le signe du radical.

### 2.3.2.2) Parcours avec phase de freinage

Dans le cas où la deuxième partie du parcours consiste en une phase de freinage, les équations du problème restent évidemment identiques mais les conditions aux limites, pour la phase de freinage, sont différentes : en prenant, comme origine des temps, l'instant initial du freinage, la vitesse initiale est, maintenant, celle qui a été acquise à la fin de la phase d'accélération, ce qui fixe, comme ci-dessus, la constante B. La deuxième condition étant, à présent, que la vitesse, à la fin du freinage, soit égale à la vitesse initiale. En fait, cette vitesse est généralement nulle ou, du moins, petite par rapport à la vitesse atteinte le long du trajet. En outre, la distance totale parcourue, au cours des deux phases, doit être égale à une valeur fixée. Enfin, les fractions  $\alpha_a$  et  $\alpha_f$  de propergol utilisées, respectivement, pour l'accélération et le freinage, doivent être telles que :  $\alpha_a + \alpha_f = \alpha$ . Si l'on désigne, respectivement, par  $\eta'$  et  $\alpha'$  les valeurs des paramètres de structure réalisées à la suite de la consommation de la fraction  $\alpha_a$  du propergol, au cours de la phase d'accélération, on a les relations suivantes :

$$\text{Masse du vaisseau} = M_0(1-\alpha_a)$$

$$\text{Masse du propulseur/masse du vaisseau} = (\eta-\alpha)/(1-\alpha_a)$$

$$\eta' - \alpha' = \frac{\eta - \alpha}{1 - \alpha_a}$$

d'où résulte :

$$\alpha' = \frac{\alpha_f}{1 - \alpha_a}$$

et, donc :

$$\eta' = \frac{\eta - \alpha + \alpha_f}{1 - \alpha_a}$$

D'après les relations obtenues ci-dessus, au paragraphe 2.3.2.1, les conditions aux limites indiquées conduisent aux relations suivantes :

$$A_a = (1-\alpha_a) \frac{V_{Fina}}{\sqrt{c^2 - V_{Fina}^2}} \qquad B_a = \frac{c+v_0}{c-v_0} \left[ \frac{A_a - \sqrt{A_a^2 + 1 + 1}}{A_a + \sqrt{A_a^2 + 1 - 1}} \right]^2$$

$$\tau_{Fina} = \frac{Kc^2}{(\eta-\alpha)} \left[ \alpha_a + \sqrt{A_a^2 + (1-\alpha_a)^2} - \sqrt{1 + A_a^2} \right] \qquad \Theta_{Fina} = \sqrt{A_a^2 + (1-\alpha_a)^2} - (1-\alpha_a)$$

$$v_{Fina} = c \left[ \frac{B_a(A_a + \Theta_{Fina})^2 - (A_a - \Theta_{Fina})^2}{B_a(A_a + \Theta_{Fina})^2 + (A_a - \Theta_{Fina})^2} \right] \qquad B_f = \frac{c+v_{Fina}}{c-v_{Fina}} \left[ \frac{A_f - \sqrt{A_f^2 + 1 + 1}}{A_f + \sqrt{A_f^2 + 1 - 1}} \right]^2 \qquad \Theta_{Finf} = \sqrt{A_f^2 + (1-\alpha')^2} - (1-\alpha')$$

$$v_0 = c \left[ \frac{B_f(A_f + \Theta_{Finf})^2 - (A_f - \Theta_{Finf})^2}{B_f(A_f + \Theta_{Finf})^2 + (A_f - \Theta_{Finf})^2} \right] \qquad \frac{V_{Finf}}{\sqrt{c^2 - V_{Finf}^2}} = \frac{A_f}{1-\alpha'}$$

Les deux dernières équations permettent de calculer  $V_{Finf}$  et  $B_f$  lorsque l'on connaît  $A_f$  et  $v_0$ .

Les paramètres  $\alpha_a$ ,  $\alpha_f$  et  $V_{Finf}$  doivent être déterminés pour réaliser le temps de parcours minimum.



## LOIS DE PROPULSION

Remarquons que l'expression donnée, ci-dessus, pour  $v_{\text{Fina}}$ , peut s'écrire, en remplaçant  $\Theta_{\text{Fina}}$  par sa valeur :

$$B_a = \frac{c+v_{\text{Fina}}}{c-v_{\text{Fina}}} \left[ \frac{A_a - \sqrt{A_a^2 + (1-\alpha_a)^2} + (1-\alpha_a)}{A_a + \sqrt{A_a^2 + (1-\alpha_a)^2} - (1-\alpha_a)} \right]^2$$

par ailleurs, comme nous l'avons indiqué ci-dessus, page 8, la constante  $A_f$  doit être négative lors de la phase de freinage. Or ce changement de signe a, pour effet, d'inverser le rapport entre crochets et de changer son signe, cette dernière modification n'ayant aucune incidence puisque le rapport en litige est élevé au carré. En fin de compte, l'équation déterminant la valeur de  $A_f$  pourra s'écrire :

$$\frac{c+v_0}{c-v_0} \left[ \frac{A_f - \sqrt{A_f^2 + 1} + 1}{A_f + \sqrt{A_f^2 + 1} - 1} \right]^2 = \frac{c+v_{\text{Fina}}}{c-v_{\text{Fina}}} \left[ \frac{A_f - \sqrt{A_f^2 + (1-\alpha')^2} + (1-\alpha')}{A_f + \sqrt{A_f^2 + (1-\alpha')^2} - (1-\alpha')} \right]^2$$

D'autre part, la fonction :

$$F(A, \beta) = \left[ \frac{A - \sqrt{A^2 + \beta^2} + \beta}{A + \sqrt{A^2 + \beta^2} - \beta} \right]$$

tend vers 1 quand  $A$  tend vers 0 et, vers 0, quand  $A$  tend vers l'infini. De plus, pour toute valeur de  $A$ , sa valeur est d'autant plus proche de 1 que  $\beta$  est plus grand. Comme  $v_{\text{Fina}}$  est plus grand que  $v_0$ , il est nécessaire que le crochet de droite ait une valeur inférieure à celui de gauche, ce qui a obligatoirement lieu en vertu de la remarque formulée ci-dessus, puisque  $1-\alpha_a$  est inférieur à 1. On pourra donc résoudre l'équation donnant la valeur de  $A_a$ , par approximations successives, en faisant croître cette constante à partir de 0.

Nous pouvons, à présent, calculer numériquement les valeurs de la vitesse et de la distance parcourue en fonction du temps propre,  $\tau$ . **L'appendice 2** rassemble les expressions des différentes grandeurs et constantes caractérisant la loi optimale pour des vitesses de déplacement ou d'éjection du propergol nettement inférieures à celle de la lumière. On peut voir qu'il s'agit d'un mouvement uniformément accéléré, ce qui n'est pas le cas dans le domaine relativiste, comme on peut le constater en se reportant à [l'appendice 1](#).

### 2.3.3) Calcul de la durée optimale

#### 2.3.3.1) Parcours sans phase de freinage

La durée, mesurée aux horloges fixes par rapport aux étoiles, nécessaire pour parcourir une distance déterminée  $D$ , au cours de la phase accélérée, suivie d'un éventuel trajet à vitesse uniforme, est donnée par :

$$t = \frac{D}{v_{\text{Fin}}} + \int_0^{\tau_{\text{Fin}}} \frac{d\tau}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

En posant :

$$t_{\text{unif}} = \frac{D}{v_{\text{Fin}}}$$

la durée du parcours, mesurée aux horloges du vaisseau, s'écrit :

$$\tau_{\text{total}} = t_{\text{unif}} \sqrt{1 - \frac{v_{\text{Fin}}^2}{c^2}} + \tau_{\text{Fin}}$$

Bien entendu, ce temps ne diffère notablement de celui indiqué par les horloges au repos que si la vitesse du vaisseau atteint une fraction significative de la vitesse de la lumière.

Il importe de noter que l'accélération initiale, qui est, en fait, la valeur maximum de l'accélération et la valeur finale de la vitesse d'éjection du propergol imposent deux contraintes unilatérales à la loi d'accélération optimale :

- dans le cas d'un vaisseau avec équipage, la valeur initiale de l'accélération doit être, au plus, égale à  $1g$ .
- la valeur finale de la vitesse d'éjection du propergol ne doit pas dépasser la valeur maximum autorisée par le type de propulseur considéré.

Cette valeur maximum est donnée par l'expression :

$$V_{\text{max}} = \sqrt{2\zeta\kappa}$$

où  $\zeta$  désigne le rendement du propulseur et,  $\kappa$ , l'énergie spécifique de l'ergol considéré.

## LOIS DE PROPULSION

Rappelons, à ce propos, les valeurs respectives des énergies spécifiques des ergols nucléaires “disponibles” :

- fission de l'uranium :  $7,5 \cdot 10^{13}$  J/kg
- fusion deutérium-tritium :  $34 \cdot 10^{13}$  J/kg
- fusion deutérium-deutérium:  $17,3 \cdot 10^{13}$  J/kg
- fusion de l'hydrogène (cycle CNO):  $57,3 \cdot 10^{13}$  J/kg
- annihilation matière/anti-matière :  $8 \cdot 10^{16}$  J/kg

En admettant un rendement de 0,5, ce qui semble très conservateur, on obtient les valeurs suivantes pour les différentes vitesses maxima correspondant aux divers ergols :

- fission de l'uranium :  $8,66 \cdot 10^6$  m/sec
- fusion deutérium-tritium :  $1,844 \cdot 10^7$  m/sec
- fusion deutérium-deutérium:  $1,315 \cdot 10^7$  m/sec
- fusion de l'hydrogène (cycle CNO):  $2,394 \cdot 10^7$  m/sec
- annihilation matière/anti-matière :  $2,828 \cdot 10^8$  m/sec

Il va de soi que ces vitesses sont données à titre indicatif (surtout en ce qui concerne la fusion de l'hydrogène et l'antimatière !) et que la valeur exacte devrait être calculée plus précisément à partir de la structure et des caractéristiques des propulseurs concernés.

D'après ce qui a été établi page 3, paragraphe 2.2, L'accélération initiale du vaisseau par rapport aux étoiles est donnée par :

$$\frac{\dot{v}_0 c^2}{c^2 - v_0^2} = \frac{(\eta - \alpha)}{Kc} \frac{2A}{(A^2 - \Theta_0^2)}$$

de sorte que l'accélération, dans le système du vaisseau, a pour valeur :

$$\dot{v}_0 = \frac{(\eta - \alpha)}{Kc} \frac{2A}{(A^2 - \Theta_0^2)} \frac{(c^2 - v_0^2)}{c^2}$$

tandis que, d'après les résultats obtenus pages 6 et 7, paragraphe 2.3.2, on a :

$$A = \frac{(1 - \alpha) V_{Fin}}{\sqrt{c^2 - V_{Fin}^2}} \quad \text{et} \quad \Theta_0 = \sqrt{A^2 + 1} - 1$$

Dans le domaine de la construction aéronautique, le paramètre  $\eta$ , incluant la cellule et la motorisation, prend généralement la valeur 0,5, la moitié du poids total étant répartie entre le carburant et le fret. Cependant, un engin spatial n'est pas soumis aux contraintes de résistance des matériaux auxquelles les normes de la construction aéronautique ont du s'adapter : on peut donc alléger la structure et réserver une part plus grande au propergol et à la motorisation. Le fret peut également être beaucoup plus réduit du fait que la contrainte la plus sévère concerne, ici, la durée de la mission. Enfin, il convient de garder à l'esprit le fait que le propergol peut être considéré comme faisant partie intégrante de la structure. Nous pourrions donc être amenés à donner, à  $\eta$ , des valeurs allant jusqu'à 0,9, voire 0,95. Nous évaluerons les performances pour les valeurs  $K = 5 \cdot 10^{-4}$ ,  $10^{-5}$  et  $10^{-7}$  kg/W, lesquels correspondent, respectivement, à des propulseurs utilisant des réacteurs nucléaires standards, des réacteurs à faisceaux de protons particulièrement étudiés pour être allégés et, enfin, des micro explosions nucléaires (rappelons quelques valeurs usuelles du paramètres K : moteurs de “ formule1 ”  $K = 5 \cdot 10^{-4}$  kg/w ; réacteur d'avion  $K = 10^{-5}$  kg/w ; moteur de fusée  $K = 10^{-7}$  à  $10^{-6}$  kg/w ). Nous supposons que la vitesse du vaisseau est nulle à l'origine, étant donné que les vaisseaux engagés dans une mission vers un but lointain partiront toujours depuis une orbite le long de laquelle leur vitesse ne sera qu'une fraction négligeable de celle qu'ils atteindront par la suite.



Les tableaux suivants résument les performances réalisées pour certains parcours-types, cela pour les trois propulseurs et les trois ergols envisagés.

- terre-Lune

| Propulseur | Uranium       |             |             | Deutérium-tritium |             |             | Antimatière   |             |             |
|------------|---------------|-------------|-------------|-------------------|-------------|-------------|---------------|-------------|-------------|
|            | $K=5.10^{-4}$ | $K=10^{-5}$ | $K=10^{-7}$ | $K=5.10^{-4}$     | $K=10^{-5}$ | $K=10^{-7}$ | $K=5.10^{-4}$ | $K=10^{-5}$ | $K=10^{-7}$ |
| t          | 71707         | 19463       | 4193        | 71707             | 19463       | 4193        | 71707         | 19463       | 4193        |
| $\tau_a$   | 48600         | 13068       | 2790        | 48600             | 13068       | 2790        | 48600         | 13068       | 2790        |
| $V_F$      | 18000         | 66000       | 305000      | 18000             | 66000       | 305000      | 18000         | 66000,000   | 305000      |
| $D_a$      | 196830122     | 194059806   | 191515379   | 196830122         | 194059806   | 191515379   | 196830122     | 194059806   | 191515379.  |
| v          | 8100          | 29700       | 137250      | 8100              | 29700       | 137250      | 8100          | 29700       | 137250      |
| $\tau$     | 71707         | 19463       | 4193        | 71707             | 19463       | 4193        | 71707         | 19463       | 4193        |
| $\gamma$   | 0.167         | 2.273       | 49.18       | 0.167             | 2.273       | 49.18       | 0.167         | 2.273       | 49.18       |

## LOIS DE PROPULSION

Signification des symboles :

- $t$  : temps de parcours, en seconde (référentiel des étoiles)
- $\tau_a$  : durée de la phase accélérée (référentiel du vaisseau)
- $V_F$  : vitesse d'éjection finale du propergol
- $D_a$  : distance parcourue au cours de l'accélération
- $v$  : vitesse du vaisseau à la fin de l'accélération
- $\tau$  : temps de parcours, (référentiel du vaisseau)
- $\gamma$  : accélération
  
- Mars en conjonction (#  $42.10^6$  km)

|            | Uranium       |             |             | Deutérium-tritium |             |             | Antimatière   |             |             |
|------------|---------------|-------------|-------------|-------------------|-------------|-------------|---------------|-------------|-------------|
| Propulseur | $K=5.10^{-4}$ | $K=10^{-5}$ | $K=10^{-7}$ | $K=5.10^{-4}$     | $K=10^{-5}$ | $K=10^{-7}$ | $K=5.10^{-4}$ | $K=10^{-5}$ | $K=10^{-7}$ |
| $t$        | 1644537       | 445225      | 95901       | 1644537           | 445225      | 95901       | 1644537       | 445225      | 95901       |
| $\tau_a$   | 1215000       | 288300      | 63948       | 1215000           | 288300      | 63948       | 1215000       | 288300      | 63948       |
| $V_F$      | 90000         | 310000      | 1460000     | 90000             | 310000      | 1460000     | 90000         | 310000      | 1460000     |
| $D_a$      | 24603751931   | 20108942521 | 21007324215 | 24603751931       | 20108942521 | 21007324215 | 24603751931   | 20108942521 | 21007324215 |
| $v$        | 40500         | 139500      | 657002      | 40500             | 139500      | 657002      | 40500         | 139500      | 657002      |
| $\tau$     | 1644537       | 445225      | 95901       | 1644537           | 445225      | 95901       | 1644537       | 445225      | 95901       |
| $\gamma$   | 0.033         | 0.484       | 10,274      | 0.033             | 0.484       | 10,274      | 0.033         | 0.484       | 10,274      |

- Mars en quadrature. Mercure en conjonction (#  $80.10^6$  km)

|            | Uranium       |             |             | Deuterium-tritium |             |             | Antimatière   |             |             |
|------------|---------------|-------------|-------------|-------------------|-------------|-------------|---------------|-------------|-------------|
| Propulseur | $K=5.10^{-4}$ | $K=10^{-5}$ | $K=10^{-7}$ | $K=5.10^{-4}$     | $K=10^{-5}$ | $K=10^{-7}$ | $K=5.10^{-4}$ | $K=10^{-5}$ | $K=10^{-7}$ |
| $t$        | 2523661       | 683990      | 147361      | 2523661           | 683990      | 147361      | 2523661       | 683990      | 147361      |
| $\tau_a$   | 1815000       | 456300      | 98285       | 1815000           | 456300      | 98285       | 1815000       | 456300      | 98285       |
| $V_F$      | 110000        | 390000      | 1810000     | 110000            | 390000      | 1810000     | 110000        | 390000      | 1810000     |
| $D_a$      | 44921256439   | 40040380279 | 40026941323 | 44921256439       | 40040380279 | 40026941323 | 44921256439   | 40040380279 | 40026941323 |
| $v$        | 49500         | 175500      | 814504      | 49500             | 175500      | 814504      | 49500         | 175500      | 814504      |
| $\tau$     | 2523661       | 683990      | 147361      | 2523661           | 683990      | 147361      | 2523661       | 683990      | 147361      |
| $\gamma$   | 0.027         | 0.385       | 8,287       | 0.027             | 0.385       | 8,287       | 0.027         | 0.385       | 8,287       |

- Mercure, Venus en opposition (#  $200.10^6$  km)

|            | Uranium       |              |              | Deuterium-tritium |              |              | Antimatière   |              |              |
|------------|---------------|--------------|--------------|-------------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|
| Propulseur | $K=5.10^{-4}$ | $K=10^{-5}$  | $K=10^{-7}$  | $K=5.10^{-4}$     | $K=10^{-5}$  | $K=10^{-7}$  | $K=5.10^{-4}$ | $K=10^{-5}$  | $K=10^{-7}$  |
| $t$        | 4644603       | 1259924      | 271444       | 4644603           | 1259924      | 271444       | 4644603       | 1259924      | 271444       |
| $\tau_a$   | 2940000       | 842701       | 181555       | 2940000           | 842701       | 181555       | 2940000       | 842701       | 181555       |
| $V_F$      | 140000        | 530000       | 2460000      | 140000            | 530000       | 2460000      | 140000        | 530000       | 2460000      |
| $D_a$      | 92610015677   | 100492231031 | 100492334763 | 92610015677       | 100492231031 | 100492334763 | 92610015677   | 100492231031 | 100492334763 |
| $v$        | 63000         | 238500       | 1107010      | 63000             | 238500       | 1107010      | 63000         | 238500       | 1107010      |
| $\tau$     | 4644603       | 1259924      | 271443       | 4644603           | 1259924      | 271443       | 4644603       | 1259924      | 271443       |
| $\gamma$   | 0.021         | 0.283        | 6,097        | 0.021             | 0.283        | 6,097        | 0.021         | 0.283        | 6,097        |

## LOIS DE PROPULSION

- Mars en opposition (#  $350 \cdot 10^6$  km)

|            | Uranium             |              |              | Deuterium-tritium   |              |              | Antimatière         |              |              |
|------------|---------------------|--------------|--------------|---------------------|--------------|--------------|---------------------|--------------|--------------|
| Propulseur | $K=5 \cdot 10^{-4}$ | $K=10^{-5}$  | $K=10^{-7}$  | $K=5 \cdot 10^{-4}$ | $K=10^{-5}$  | $K=10^{-7}$  | $K=5 \cdot 10^{-4}$ | $K=10^{-5}$  | $K=10^{-7}$  |
| t          | 6742663             | 1829678      | 394190       | 6742663             | 1829678      | 394190       | 6742663             | 1829678      | 394190       |
| $\tau_a$   | 4335000             | 1228803      | 262863       | 4335000             | 1228803      | 262863       | 4335000             | 1228803      | 262863       |
| $V_F$      | 170000              | 640000       | 2960000      | 170000              | 640000       | 2960000      | 170000              | 640000       | 2960000      |
| $D_a$      | 165813793522        | 176947857564 | 175070682824 | 165813793522        | 176947857564 | 175070682824 | 165813793522        | 176947857564 | 175070682824 |
| v          | 76500               | 288000       | 1332018      | 76500               | 288000       | 1332018      | 76500               | 288000       | 1332018      |
| $\tau$     | 6742663             | 1829678      | 394188       | 6742663             | 1829678      | 394188       | 6742663             | 1829678      | 394188       |
| $\gamma$   | 0.018               | 0.234        | 5,067        | 0.018               | 0.234        | 5,067        | 0.018               | 0.234        | 5,067        |

- Astéroïdes (#  $450 \cdot 10^6$  km)

|            | Uranium             |              |              | Deuterium-tritium   |              |              | Antimatière         |              |              |
|------------|---------------------|--------------|--------------|---------------------|--------------|--------------|---------------------|--------------|--------------|
| Propulseur | $K=5 \cdot 10^{-4}$ | $K=10^{-5}$  | $K=10^{-7}$  | $K=5 \cdot 10^{-4}$ | $K=10^{-5}$  | $K=10^{-7}$  | $K=5 \cdot 10^{-4}$ | $K=10^{-5}$  | $K=10^{-7}$  |
| t          | 7970658             | 2163426      | 466090       | 7970658             | 2163426      | 466090       | 7970658             | 2163426      | 466090       |
| $\tau_a$   | 5415001             | 1428304      | 311073       | 5415001             | 1428304      | 311073       | 5415001             | 1428304      | 311073       |
| $V_F$      | 190000              | 690000       | 3220000      | 190000              | 690000       | 3220000      | 190000              | 690000       | 3220000      |
| $D_a$      | 231491325703        | 221744532737 | 225378372464 | 231491325703        | 221744532737 | 225378372464 | 231491325703        | 221744532737 | 225378372464 |
| v          | 85500               | 310500       | 1449024      | 85500               | 310500       | 1449024      | 85500               | 310500       | 1449024      |
| $\tau$     | 7970658             | 2163425      | 466087       | 7970658             | 2163425      | 466087       | 7970658             | 2163425      | 466087       |
| $\gamma$   | 0.016               | 0.217        | 4,658        | 0.016               | 0.217        | 4,658        | 0.016               | 0.217        | 4,658        |

- Jupiter (#  $700 \cdot 10^6$  km)

|            | Uranium             |              |              | Deuterium-tritium   |              |              | Antimatière         |              |              |
|------------|---------------------|--------------|--------------|---------------------|--------------|--------------|---------------------|--------------|--------------|
| Propulseur | $K=5 \cdot 10^{-4}$ | $K=10^{-5}$  | $K=10^{-7}$  | $K=5 \cdot 10^{-4}$ | $K=10^{-5}$  | $K=10^{-7}$  | $K=5 \cdot 10^{-4}$ | $K=10^{-5}$  | $K=10^{-7}$  |
| t          | 10700707            | 2904446      | 625743       | 10700707            | 2904446      | 625743       | 10700707            | 2904446      | 625743       |
| $\tau_a$   | 7260002             | 1920008      | 417426       | 7260002             | 1920008      | 417426       | 7260002             | 1920008      | 417426       |
| $V_F$      | 220000              | 800000       | 3730000      | 220000              | 800000       | 3730000      | 220000              | 800000       | 3730000      |
| $D_a$      | 359370157211        | 345602006590 | 350336256057 | 359370157211        | 345602006590 | 350336256057 | 359370157211        | 345602006590 | 350336256057 |
| v          | 99000               | 360000       | 1678537      | 99000               | 360000       | 1678537      | 99000               | 360000       | 1678537      |
| $\tau$     | 10700707            | 2904445      | 625737       | 10700707            | 2904445      | 625737       | 10700707            | 2904445      | 625737       |
| $\gamma$   | 0.014               | 0.187        | 4,021        | 0.014               | 0.187        | 4,021        | 0.014               | 0.187        | 4,021        |

## LOIS DE PROPULSION

- Saturne (#  $1,5 \cdot 10^9$  km)

|            | Uranium             |              |              | Deuterium-tritium   |              |              | Antimatière         |              |              |
|------------|---------------------|--------------|--------------|---------------------|--------------|--------------|---------------------|--------------|--------------|
| Propulseur | $K=5 \cdot 10^{-4}$ | $K=10^{-5}$  | $K=10^{-7}$  | $K=5 \cdot 10^{-4}$ | $K=10^{-5}$  | $K=10^{-7}$  | $K=5 \cdot 10^{-4}$ | $K=10^{-5}$  | $K=10^{-7}$  |
| t          | 17861113            | 4828360      | 1040073      | 17861113            | 4828360      | 1040073      | 17861113            | 4828360      | 1040073      |
| $\tau_a$   | 13500008            | 3307524      | 691308       | 13500008            | 3307524      | 691308       | 13500008            | 3307524      | 691308       |
| $V_F$      | 300000              | 1050000      | 4800000      | 300000              | 1050000      | 4800000      | 300000              | 1050000      | 4800000      |
| $D_a$      | 911250745890        | 781404689982 | 746652055324 | 911250745890        | 781404689982 | 746652055324 | 911250745890        | 781404689982 | 746652055324 |
| v          | 135000              | 472500       | 2160079      | 135000              | 472500       | 2160079      | 135000              | 472500       | 2160079      |
| $\tau$     | 17861112            | 4828356      | 1040058      | 17861112            | 4828356      | 1040058      | 17861112            | 4828356      | 1040058      |
| $\gamma$   | 0.01                | 0.143        | 3,125        | 0.01                | 0.143        | 3,125        | 0.01                | 0.143        | 3,125        |

- Uranus (#  $2,8 \cdot 10^9$  km)

|            | Uranium             |               |               | Deuterium-tritium   |               |               | Antimatière         |               |               |
|------------|---------------------|---------------|---------------|---------------------|---------------|---------------|---------------------|---------------|---------------|
| Propulseur | $K=5 \cdot 10^{-4}$ | $K=10^{-5}$   | $K=10^{-7}$   | $K=5 \cdot 10^{-4}$ | $K=10^{-5}$   | $K=10^{-7}$   | $K=5 \cdot 10^{-4}$ | $K=10^{-5}$   | $K=10^{-7}$   |
| t          | 26965281            | 7321341       | 1576829       | 26965281            | 7321341       | 1576829       | 26965281            | 7321341       | 1576829       |
| $\tau_a$   | 18375015            | 5070058       | 1044546       | 18375015            | 5070058       | 1044546       | 18375015            | 5070058       | 1044546       |
| $V_F$      | 350000              | 1300000       | 5900000       | 350000              | 1300000       | 5900000       | 350000              | 1300000       | 5900000       |
| $D_a$      | 1447032858854       | 1482997735677 | 1386746151436 | 1447032858854       | 1482997735677 | 1386746151436 | 1447032858854       | 1482997735677 | 1386746151436 |
| v          | 157500              | 585001        | 2655148       | 157500              | 585001        | 2655148       | 157500              | 585001        | 2655148       |
| $\tau$     | 26965279            | 7321333       | 1576795       | 26965279            | 7321333       | 1576795       | 26965279            | 7321333       | 1576795       |
| $\gamma$   | 0.009               | 0.115         | 2,542         | 0.009               | 0.115         | 2,542         | 0.009               | 0.115         | 2,542         |

- Neptune (#  $4,5 \cdot 10^9$  km)

|            | Uranium             |               |               | Deuterium-tritium   |               |               | Antimatière         |               |               |
|------------|---------------------|---------------|---------------|---------------------|---------------|---------------|---------------------|---------------|---------------|
| Propulseur | $K=5 \cdot 10^{-4}$ | $K=10^{-5}$   | $K=10^{-7}$   | $K=5 \cdot 10^{-4}$ | $K=10^{-5}$   | $K=10^{-7}$   | $K=5 \cdot 10^{-4}$ | $K=10^{-5}$   | $K=10^{-7}$   |
| t          | 37000006            | 10041694      | 2163514       | 37000006            | 10041694      | 2163514       | 37000006            | 10041694      | 2163514       |
| $\tau_a$   | 24000026            | 6750103       | 1449550       | 24000026            | 6750103       | 1449550       | 24000026            | 6750103       | 1449550       |
| $V_F$      | 400000              | 1500000       | 6950000       | 400000              | 1500000       | 6950000       | 400000              | 1500000       | 6950000       |
| $D_a$      | 2160003136938       | 2278171500001 | 2266984354639 | 2160003136938       | 2278171500001 | 2266984354639 | 2160003136938       | 2278171500001 | 2266984354639 |
| v          | 180000              | 675002        | 3127742       | 180000              | 675002        | 3127742       | 180000              | 675002        | 3127742       |
| $\tau$     | 37000002            | 10041680      | 2163449       | 37000002            | 10041680      | 2163449       | 37000002            | 10041680      | 2163449       |
| $\gamma$   | 0.007               | 0.1           | 2,158         | 0.007               | 0.1           | 2,158         | 0.007               | 0.1           | 2,158         |

## LOIS DE PROPULSION

- Pluton (#  $6.10^9$  km)

|            | Uranium        |               |               | Deuterium-tritium |               |               | Antimatière    |               |               |
|------------|----------------|---------------|---------------|-------------------|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|
| Propulseur | K= $5.10^{-4}$ | K= $10^{-5}$  | K= $10^{-7}$  | K= $5.10^{-4}$    | K= $10^{-5}$  | K= $10^{-7}$  | K= $5.10^{-4}$ | K= $10^{-5}$  | K= $10^{-7}$  |
| t          | 44817141       | 12164599      | 2620945       | 44817141          | 12164599      | 2620945       | 44817141       | 12164599      | 2620945       |
| $\tau_a$   | 30375041       | 8167650       | 1756372       | 30375041          | 8167650       | 1756372       | 30375041       | 8167650       | 1756372       |
| $V_F$      | 450000         | 1650000       | 7650000       | 450000            | 1650000       | 7650000       | 450000         | 1650000       | 7650000       |
| $D_a$      | 3075474398262  | 3032259263695 | 3023560730151 | 3075474398262     | 3032259263695 | 3023560730151 | 3075474398262  | 3032259263695 | 3023560730151 |
| v          | 202500         | 742503        | 3442823       | 202500            | 742503        | 3442823       | 202500         | 742503        | 3442823       |
| $\tau$     | 44817135       | 12164578      | 2620849       | 44817135          | 12164578      | 2620849       | 44817135       | 12164578      | 2620849       |
| $\gamma$   | 0.007          | 0.091         | 1.96          | 0.007             | 0.091         | 1.96          | 0.007          | 0.091         | 1.96          |

- Ceinture de Kuiper (#  $9.10^9$  km)

|            | Uranium        |               |               | Deuterium-tritium |               |               | Antimatière    |               |               |
|------------|----------------|---------------|---------------|-------------------|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|
| Propulseur | K= $5.10^{-4}$ | K= $10^{-5}$  | K= $10^{-7}$  | K= $5.10^{-4}$    | K= $10^{-5}$  | K= $10^{-7}$  | K= $5.10^{-4}$ | K= $10^{-5}$  | K= $10^{-7}$  |
| t          | 58750016       | 15941388      | 3434774       | 58750016          | 15941388      | 3434474       | 58750016       | 15941388      | 3434474       |
| $\tau_a$   | 37500063       | 10830265      | 2245815       | 37500063          | 10830265      | 2298069       | 37500063       | 10830265      | 2298069       |
| $V_F$      | 500000         | 1900000       | 8650000       | 500000            | 1900000       | 8750000       | 500000         | 1900000       | 8750000       |
| $D_a$      | 4218759567096  | 4629976624249 | 4371665914030 | 4218759567096     | 4629976624249 | 4525115424478 | 4218759567096  | 4629976624249 | 4525115424478 |
| v          | 225000         | 855004        | 3892967       | 225000            | 855004        | 3937984       | 225000         | 855004        | 3937984       |
| $\tau$     | 58750006       | 15941353      | 3434611       | 58750006          | 15941353      | 3434310       | 58750006       | 15941353      | 3434310       |
| $\gamma$   | 0.006          | 0.079         | 1,733         | 0.006             | 0.079         | 1,714         | 0.006          | 0.079         | 1,714         |

- Nuage de Oort (#  $5.10^{12}$  km)

|            | Uranium         |                 |                 | Deuterium-tritium |                 |                 | Antimatière     |                 |                 |
|------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Propulseur | K= $5.10^{-4}$  | K= $10^{-5}$    | K= $10^{-7}$    | K= $5.10^{-4}$    | K= $10^{-5}$    | K= $10^{-7}$    | K= $5.10^{-4}$  | K= $10^{-5}$    | K= $10^{-7}$    |
| t          | 3968587801      | 1402832462      | 1292946104      | 3968587801        | 1077545571      | 608626309       | 3968587801      | 1077545571      | 233531322       |
| $\tau_a$   | 2646316837      | 221991443       | 2219914         | 2646316837        | 712627345       | 10180200        | 2646316837      | 712627345       | 153887304       |
| $V_F$      | 4200000         | 8600000         | 8600000         | 4200000           | 15400000        | 18400000        | 4200000         | 15400000        | 70400000        |
| $D_a$      | $2.501.10^{15}$ | $4.296.10^{14}$ | $4.296.10^{12}$ | $2.501.10^{15}$   | $2.471.10^{15}$ | $4.218.10^{13}$ | $2.501.10^{15}$ | $2.471.10^{15}$ | $2.466.10^{15}$ |
| v          | 1890053         | 3870459         | 3870459         | 1890053           | 6932642         | 8284508         | 1890053         | 6932642         | 31936975        |
| $\tau$     | 3968543991      | 1402727879      | 1292838468      | 3968543991        | 1077384471      | 608396469       | 3968543991      | 1077384471      | 232786912       |
| $\gamma$   | 0.001           | 0.017           | 1.744           | 0.001             | 0.01            | 0.814           | 0.001           | 0.01            | 0.208           |



## LOIS DE PROPULSION

- Année lumière (#  $10^{13}$  km)

|                | Uranium                |                        |                        | Deuterium-tritium      |                        |                        | Antimatière            |                        |                        |
|----------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Propulseur     | K=5.10 <sup>-4</sup>   | K=10 <sup>-5</sup>     | K=10 <sup>-7</sup>     | K=5.10 <sup>-4</sup>   | K=10 <sup>-5</sup>     | K=10 <sup>-7</sup>     | K=5.10 <sup>-4</sup>   | K=10 <sup>-5</sup>     | K=10 <sup>-7</sup>     |
| t              | 6301694908             | 2694668603             | 2584782244             | 6301694908             | 1716094818             | 1212162391             | 6301694908             | 1710784207             | 372056487              |
| $\tau_a$       | 4056744533             | 221991443              | 2219914                | 4056744533             | 1018020053             | 10180200               | 4056744533             | 1131972606             | 242967188              |
| V <sub>F</sub> | 5200000                | 8600000                | 8600000                | 5200000                | 18400000               | 18400000               | 5200000                | 19400000               | 87600000               |
| D <sub>a</sub> | 4.747.10 <sup>15</sup> | 4.296.10 <sup>14</sup> | 4.296.10 <sup>12</sup> | 4.747.10 <sup>15</sup> | 4.218.10 <sup>15</sup> | 4.218.10 <sup>13</sup> | 4.747.10 <sup>15</sup> | 4.945.10 <sup>15</sup> | 4.876.10 <sup>15</sup> |
| v              | 2340101                | 3870459                | 3870459                | 2340101                | 8284508                | 8284508                | 2340101                | 8735285                | 39920308               |
| $\tau$         | 6301585319             | 2694456354             | 2584566943             | 6301585319             | 1715698655             | 1211702063             | 6301585319             | 1710378266             | 370188407              |
| $\gamma$       | 0.001                  | 0.017                  | 1.744                  | 0.001                  | 0.008                  | 0.814                  | 0.001                  | 0.008                  | 0.164                  |

- Dix années lumière (#  $10^{14}$  km)

|                | Uranium                 |                        |                        | Deutérium-tritium       |                        |                        | Antimatière             |                        |                        |
|----------------|-------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| Propulseur     | K=5.10 <sup>-4</sup>    | K=10 <sup>-5</sup>     | K=10 <sup>-7</sup>     | K=5.10 <sup>-4</sup>    | K=10 <sup>-5</sup>     | K=10 <sup>-7</sup>     | K=5.10 <sup>-4</sup>    | K=10 <sup>-5</sup>     | K=10 <sup>-7</sup>     |
| t              | 31386538888             | 25947719137            | 25837832779            | 29244805588             | 12579744305            | 12075811878            | 29244805588             | 7954057443             | 1787704122             |
| $\tau_a$       | 11099572156             | 221991443              | 2219914                | 19511212268             | 1018020053             | 10180200               | 19511212268             | 5304737328             | 1087563252             |
| V <sub>F</sub> | 8600000                 | 8600000                | 8600000                | 11400000                | 18400000               | 18400000               | 11400000                | 41800000               | 170000000              |
| D <sub>a</sub> | 2.1481.10 <sup>16</sup> | 4.296.10 <sup>14</sup> | 4.296.10 <sup>12</sup> | 5.0061.10 <sup>16</sup> | 4.218.10 <sup>15</sup> | 4.218.10 <sup>13</sup> | 5.0061.10 <sup>16</sup> | 5.009.10 <sup>16</sup> | 4.474.10 <sup>16</sup> |
| v              | 3870459                 | 3870459                | 3870459                | 5131071                 | 8284508                | 8284508                | 5131071                 | 18863140               | 80495213               |
| $\tau$         | 31384539752             | 25945568898            | 25835679486            | 29242427212             | 12575199357            | 12071202766            | 29242427212             | 7945307119             | 1748903551             |
| $\gamma$       | 0.0003                  | 0.017                  | 1.744                  | 0.00026                 | 0.008                  | 0.814                  | 0.00026                 | 0.004                  | 0.074                  |

L'examen des tableaux ci-dessus montre que le paramètre le plus influent, dans la détermination du temps de parcours, est la masse spécifique du propulseur. L'incidence de la capacité énergétique de l'ergol n'apparaît que pour les grandes distances, de même que les effets relativistes : ceci n'est pas pour surprendre, la durée de l'accélération n'étant pas suffisante, lorsque la distance parcourue reste modérée, pour que se manifeste l'impulsion spécifique élevée de l'antimatière ou, même, celle de l'association deutérium-tritium.

### 2.3.3.2) Parcours avec phase de freinage

Dans ce qui suit, la vitesse initiale et la vitesse du vaisseau, à la fin de la phase de freinage, sont supposées nulles, hypothèse cohérente avec le fait qu'un vaisseau spatial part généralement d'une orbite sur laquelle sa vitesse est très inférieure à celle qu'il atteindra sur son parcours et qu'il en est de même, lorsque après avoir freiné, il se place sur une nouvelle orbite.

Signification des symboles supplémentaires :

- V<sub>Ff</sub> : vitesse d'éjection du propergol à la fin du freinage
- $\tau_f$  : temps de freinage dans le référentiel du vaisseau
- $\gamma_f$  : freinage

Les tableaux suivants résument les performances réalisées pour les mêmes parcours-types que ci-dessus, et pour les trois propulseurs et les trois ergols envisagés.

## LOIS DE PROPULSION

- terre-Lune

|                 | Uranium              |                       |                       | Deutérium-tritium    |                       |                       | Antimatière          |                       |                       |
|-----------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Propulseur      | K=5.10 <sup>-4</sup> | K=10 <sup>-5</sup>    | K=10 <sup>-7</sup>    | K=5.10 <sup>-4</sup> | K=10 <sup>-5</sup>    | K=10 <sup>-7</sup>    | K=5.10 <sup>-4</sup> | K=10 <sup>-5</sup>    | K=10 <sup>-7</sup>    |
| t               | 112741               | 30590                 | 6590                  | 112741               | 30590                 | 6590                  | 112741               | 30590                 | 6590                  |
| τ <sub>a</sub>  | 37285                | 10166                 | 2214                  | 37285                | 10166                 | 2214                  | 37285                | 10166                 | 2214                  |
| V <sub>F</sub>  | 13011                | 48004                 | 224002                | 13011                | 48004                 | 224002                | 13011                | 48004                 | 224002                |
| D <sub>a</sub>  | 1.9.10 <sup>8</sup>  | 1.912.10 <sup>8</sup> | 1.943.10 <sup>8</sup> | 1.9.10 <sup>8</sup>  | 1.912.10 <sup>8</sup> | 1.943.10 <sup>8</sup> | 1.9.10 <sup>8</sup>  | 1.912.10 <sup>8</sup> | 1.943.10 <sup>8</sup> |
| v               | 5092                 | 18802                 | 87746                 | 5092                 | 18802                 | 87746                 | 5092                 | 18802                 | 87746                 |
| τ               | 112741               | 30590                 | 6590                  | 112741               | 30590                 | 6590                  | 112741               | 30590                 | 6590                  |
| γ               | 0.137                | 1.849                 | 39                    | 0.137                | 1.849                 | 39                    | 0.137                | 1.849                 | 39                    |
| V <sub>Ff</sub> | 13000                | 48000                 | 224000                | 13000                | 48000                 | 224000                | 13000                | 48000                 | 224000                |
| τ <sub>f</sub>  | 37351                | 10168                 | 2214                  | 37351                | 10168                 | 2214                  | 37351                | 10168                 | 2214                  |
| γ <sub>f</sub>  | -0.136               | -1.849                | -39                   | -0.136               | -1.849                | -39                   | -0.136               | -1.849                | -39                   |

- Mars en conjonction (# 42.10<sup>6</sup> km)

|                 | Uranium                |                        |                        | Deutérium-tritium      |                        |                        | Antimatière            |                        |                        |
|-----------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Propulseur      | K=5.10 <sup>-4</sup>   | K=10 <sup>-5</sup>     | K=10 <sup>-7</sup>     | K=5.10 <sup>-4</sup>   | K=10 <sup>-5</sup>     | K=10 <sup>-7</sup>     | K=5.10 <sup>-4</sup>   | K=10 <sup>-5</sup>     | K=10 <sup>-7</sup>     |
| t               | 2581820                | 699613                 | 150725                 | 2581820                | 699613                 | 150725                 | 2581820                | 699613                 | 150725                 |
| τ <sub>a</sub>  | 794254                 | 233422                 | 50519                  | 794254                 | 233422                 | 50519                  | 794254                 | 233422                 | 50519                  |
| V <sub>F</sub>  | 60029                  | 230015                 | 1070032                | 60029.831              | 230015                 | 1070032                | 60029                  | 230015                 | 1070032                |
| D <sub>a</sub>  | 1.867.10 <sup>10</sup> | 2.103.10 <sup>10</sup> | 2.118.10 <sup>10</sup> | 1.867.10 <sup>10</sup> | 2.103.10 <sup>10</sup> | 2.118.10 <sup>10</sup> | 1.867.10 <sup>10</sup> | 2.103.10 <sup>10</sup> | 2.118.10 <sup>10</sup> |
| v               | 23503                  | 90096                  | 419145                 | 23503                  | 90096                  | 419145                 | 23503                  | 90096                  | 419145                 |
| τ               | 2581820.               | 699613                 | 150725                 | 2581820                | 699613                 | 150725                 | 2581820                | 699613                 | 150725                 |
| γ               | 0.03                   | 0.386                  | 8.297                  | 0.03                   | 0.386                  | 8.297                  | 0.03                   | 0.386                  | 8.297                  |
| V <sub>Ff</sub> | 60000                  | 230000                 | 1070000                | 60000                  | 230000                 | 1070000                | 60000                  | 230000                 | 1070000                |
| τ <sub>f</sub>  | 795044                 | 233454                 | 50522.                 | 795044.                | 233454                 | 50522                  | 795044                 | 233454.                | 50522                  |
| γ <sub>f</sub>  | -0.03                  | -0.386                 | -8.296                 | -0.03                  | -0.386                 | -8.296                 | -0.03                  | -0.386                 | -8.296                 |

- Mars en quadrature. Mercure en conjonction (# 80.10<sup>6</sup> km)

|                 | Uranium                |                        |                        | Deutérium-tritium      |                        |                        | Antimatière            |                        |                        |
|-----------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Propulseur      | K=5.10 <sup>-4</sup>   | K=10 <sup>-5</sup>     | K=10 <sup>-7</sup>     | K=5.10 <sup>-4</sup>   | K=10 <sup>-5</sup>     | K=10 <sup>-7</sup>     | K=5.10 <sup>-4</sup>   | K=10 <sup>-5</sup>     | K=10 <sup>-7</sup>     |
| t               | 3965880                | 1075393                | 231600                 | 3965880                | 1075393                | 231600                 | 3965880                | 1075393                | 231600                 |
| τ <sub>a</sub>  | 1412007                | 345941                 | 76884                  | 1412007                | 345941                 | 76884                  | 1412007                | 345941                 | 76884                  |
| V <sub>F</sub>  | 80039                  | 280040                 | 1320002                | 80039                  | 280040                 | 1320002                | 80039.                 | 280040                 | 1320002                |
| D <sub>a</sub>  | 4.426.10 <sup>10</sup> | 3.795.10 <sup>10</sup> | 3.976.10 <sup>10</sup> | 4.426.10 <sup>10</sup> | 3.795.10 <sup>10</sup> | 3.976.10 <sup>10</sup> | 4.426.10 <sup>10</sup> | 3.795.10 <sup>10</sup> | 3.976.10 <sup>10</sup> |
| v               | 31337                  | 109682                 | 517076                 | 31337                  | 109682                 | 517076                 | 31337                  | 109682                 | 517076                 |
| τ               | 3965880                | 1075393                | 231600                 | 3965880                | 1075393                | 231600                 | 3965880                | 1075393                | 231600                 |
| γ               | 0.022                  | 0.317                  | 6.725                  | 0.022                  | 0.317                  | 6.725                  | 0.022                  | 0.317                  | 6.725                  |
| V <sub>Ff</sub> | 80000                  | 280000                 | 1320000                | 80000                  | 280000                 | 1320000                | 80000                  | 280000                 | 1320000                |
| τ <sub>f</sub>  | 1413411                | 346042                 | 76884                  | 1413411                | 346042                 | 76884                  | 1413411                | 346042                 | 76884                  |
| γ <sub>f</sub>  | -0.022                 | -0.317                 | -6.725                 | -0.022                 | -0.317                 | -6.725                 | -0.022                 | -0.317                 | -6.725                 |

## LOIS DE PROPULSION

- Mercure, Venus en opposition (# 200.10<sup>6</sup> km)

|                 | Uranium               |                        |                        | Deutérium-tritium     |                        |                        | Antimatière           |                        |                        |
|-----------------|-----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| Propulseur      | K=5.10 <sup>-4</sup>  | K=10 <sup>-5</sup>     | K=10 <sup>-7</sup>     | K=5.10 <sup>-4</sup>  | K=10 <sup>-5</sup>     | K=10 <sup>-7</sup>     | K=5.10 <sup>-4</sup>  | K=10 <sup>-5</sup>     | K=10 <sup>-7</sup>     |
| t               | 7311263               | 1980401                | 426616                 | 7311263               | 1980401                | 426616                 | 7311263               | 1980401                | 426616                 |
| τ <sub>a</sub>  | 2669576               | 671145                 | 141384                 | 2669576               | 671145                 | 141384                 | 2669576               | 671145                 | 141384                 |
| V <sub>F</sub>  | 110005                | 390045                 | 1790020                | 110005                | 390045                 | 1790020                | 110005                | 390045                 | 1790020                |
| D <sub>a</sub>  | 1.15.10 <sup>11</sup> | 1.025.10 <sup>11</sup> | 9.914.10 <sup>10</sup> | 1.15.10 <sup>11</sup> | 1.025.10 <sup>11</sup> | 9.914.10 <sup>10</sup> | 1.15.10 <sup>11</sup> | 1.025.10 <sup>11</sup> | 9.914.10 <sup>10</sup> |
| v               | 43089                 | 152772                 | 701188                 | 43089                 | 152772                 | 701188                 | 43089                 | 152772                 | 701188                 |
| τ               | 7311263               | 1980401                | 426615                 | 7311263               | 1980401                | 426615                 | 7311263               | 1980401                | 426615                 |
| γ               | 0.016                 | 0.228                  | 4.959                  | 0.016                 | 0.228                  | 4.959                  | 0.016                 | 0.228                  | 4.959                  |
| V <sub>Ff</sub> | 110000                | 390000                 | 1790000                | 110000                | 390000                 | 1790000                | 110000                | 390000                 | 1790000                |
| τ <sub>f</sub>  | 2669838               | 671302                 | 141387                 | 2669838               | 671302                 | 141387                 | 2669838               | 671302                 | 141387                 |
| γ <sub>f</sub>  | -0.016                | -0.228                 | -4.959                 | -0.016                | -0.228                 | -4.959                 | -0.016                | -0.228                 | -4.959                 |

- Mars en opposition (# 350.10<sup>6</sup> km)

|                 | Uranium                |                        |                        | Deutérium-tritium      |                        |                        | Antimatière            |                        |                        |
|-----------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Propulseur      | K=5.10 <sup>-4</sup>   | K=10 <sup>-5</sup>     | K=10 <sup>-7</sup>     | K=5.10 <sup>-4</sup>   | K=10 <sup>-5</sup>     | K=10 <sup>-7</sup>     | K=5.10 <sup>-4</sup>   | K=10 <sup>-5</sup>     | K=10 <sup>-7</sup>     |
| t               | 10602217               | 2875874                | 619529                 | 10602217               | 2875874                | 619529                 | 10602217               | 2875874                | 619529                 |
| τ <sub>a</sub>  | 3728582                | 974727                 | 205876                 | 3728582                | 974727                 | 205876                 | 3728582                | 974727                 | 205876                 |
| V <sub>F</sub>  | 130015                 | 470035                 | 2160032                | 130015                 | 470035                 | 2160032                | 130015                 | 470035                 | 2160032                |
| D <sub>a</sub>  | 1.899.10 <sup>11</sup> | 1.795.10 <sup>11</sup> | 1.742.10 <sup>11</sup> | 1.899.10 <sup>11</sup> | 1.795.10 <sup>11</sup> | 1.742.10 <sup>11</sup> | 1.899.10 <sup>11</sup> | 1.795.10 <sup>11</sup> | 1.742.10 <sup>11</sup> |
| v               | 50924                  | 184110                 | 846128                 | 50924                  | 184110                 | 846128                 | 50924                  | 184110                 | 846128                 |
| τ               | 10602217               | 2875874                | 619527                 | 10602217               | 2875874                | 619527                 | 10602217               | 2875874                | 619527                 |
| γ               | 0.014                  | 0.189                  | 4.11                   | 0.014                  | 0.189                  | 4.11                   | 0.014                  | 0.189                  | 4.11                   |
| V <sub>Ff</sub> | 130000                 | 470000                 | 2160000                | 130000                 | 470000                 | 2160000                | 130000                 | 470000                 | 2160000                |
| τ <sub>f</sub>  | 3729462                | 974876                 | 205882                 | 3729462                | 974876                 | 205882                 | 3729462                | 974876                 | 205882                 |
| γ <sub>f</sub>  | -0.014                 | -0.189                 | -4.11                  | -0.014                 | -0.189                 | -4.11                  | -0.014                 | -0.189                 | -4.11                  |

- Astéroïdes (# 450.10<sup>6</sup> km)

|                 | Uranium                |                        |                        | Deutérium-tritium      |                        |                        | Antimatière            |                        |                        |
|-----------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Propulseur      | K=5.10 <sup>-4</sup>   | K=10 <sup>-5</sup>     | K=10 <sup>-7</sup>     | K=5.10 <sup>-4</sup>   | K=10 <sup>-5</sup>     | K=10 <sup>-7</sup>     | K=5.10 <sup>-4</sup>   | K=10 <sup>-5</sup>     | K=10 <sup>-7</sup>     |
| t               | 12530705               | 3400207                | 732525                 | 12530705               | 3400207                | 732525                 | 12530705               | 3400207                | 732525                 |
| τ <sub>a</sub>  | 4324273                | 1147698                | 243689                 | 4324273                | 1147698                | 243689                 | 4324273                | 1147698                | 243689                 |
| V <sub>F</sub>  | 140020                 | 510006                 | 2350011                | 140020                 | 510006                 | 2350011                | 140020                 | 510006                 | 2350011                |
| D <sub>a</sub>  | 2.372.10 <sup>11</sup> | 2.293.10 <sup>11</sup> | 2.243.10 <sup>11</sup> | 2.372.10 <sup>11</sup> | 2.293.10 <sup>11</sup> | 2.243.10 <sup>11</sup> | 2.372.10 <sup>11</sup> | 2.293.10 <sup>11</sup> | 2.243.10 <sup>11</sup> |
| v               | 54841                  | 199779                 | 920557                 | 54841                  | 199779                 | 920557                 | 54841                  | 199779                 | 920557                 |
| τ               | 12530704               | 3400207                | 732523                 | 12530704               | 3400207                | 732523                 | 12530704               | 3400207                | 732523                 |
| γ               | 0.013                  | 0.174                  | 3.778                  | 0.013                  | 0.174                  | 3.778                  | 0.013                  | 0.174                  | 3.778                  |
| V <sub>Ff</sub> | 140000                 | 510000                 | 2350000                | 140000                 | 510000                 | 2350000                | 140000                 | 510000                 | 2350000                |
| τ <sub>f</sub>  | 4325527                | 1147727                | 243691                 | 4325527                | 1147727                | 243691                 | 4325527                | 1147727                | 243691                 |
| γ <sub>f</sub>  | -0.013                 | -0.174                 | -3.778                 | -0.013                 | -0.174                 | -3.778                 | -0.013                 | -0.174                 | -3.778                 |

## LOIS DE PROPULSION

- Jupiter (#  $700.10^6$  km)

| Propulseur | Uranium        |                |                 | Deutérium-tritium |                |                 | Antimatière    |                |                 |
|------------|----------------|----------------|-----------------|-------------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|
|            | K= $5.10^{-4}$ | K= $10^{-5}$   | K= $10^{-7}$    | K= $5.10^{-4}$    | K= $10^{-5}$   | K= $10^{-7}$    | K= $5.10^{-4}$ | K= $10^{-5}$   | K= $10^{-7}$    |
| t          | 16818216       | 4564948        | 983439          | 16818216          | 4564948        | 983439          | 16818216       | 4564948        | 983439          |
| $\tau_a$   | 5648030        | 1536002        | 328874          | 5648030           | 1536002        | 328874          | 5648030        | 1536002        | 328874          |
| $V_F$      | 160030         | 590045         | 2730012         | 160030            | 590045         | 2730012         | 160030         | 590045         | 2730012         |
| $D_a$      | $3.54.10^{11}$ | $3.55.10^{11}$ | $3.517.10^{11}$ | $3.54.10^{11}$    | $3.55.10^{11}$ | $3.517.10^{11}$ | $3.54.10^{11}$ | $3.55.10^{11}$ | $3.517.10^{11}$ |
| v          | 62675          | 231117         | 1069416         | 62675             | 231117         | 1069416         | 62675          | 231117         | 1069416         |
| $\tau$     | 16818216       | 4564947        | 983435          | 16818216          | 4564947        | 983435          | 16818216       | 4564947        | 983435          |
| $\gamma$   | 0.011          | 0.15           | 3.252           | 0.011             | 0.15           | 3.252           | 0.011          | 0.15           | 3.252           |
| $V_{Ff}$   | 160000         | 590000         | 2730000         | 160000            | 590000         | 2730000         | 160000         | 590000         | 2730000         |
| $\tau_f$   | 5650165        | 1536240        | 328877          | 5650165           | 1536240        | 328877          | 5650165        | 1536240        | 328877          |
| $\gamma_f$ | -0.011         | -0.15          | -3.252          | -0.011            | -0.15          | -3.252          | -0.011         | -0.15          | -3.252          |

- Saturne (#  $1.5.10^9$  km)

| Propulseur | Uranium         |                 |                 | Deutérium-tritium |                 |                 | Antimatière     |                 |                 |
|------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|            | K= $5.10^{-4}$  | K= $10^{-5}$    | K= $10^{-7}$    | K= $5.10^{-4}$    | K= $10^{-5}$    | K= $10^{-7}$    | K= $5.10^{-4}$  | K= $10^{-5}$    | K= $10^{-7}$    |
| t          | 27971247        | 7587813         | 1634623         | 27971247          | 7587813         | 1634623         | 27971247        | 7587813         | 1634623         |
| $\tau_a$   | 8825048         | 2482052         | 540571          | 8825048           | 2482052         | 540571          | 8825048         | 2482052         | 540571          |
| $V_F$      | 200000          | 750025          | 3500023         | 200000            | 750025          | 3500023         | 200000          | 750025          | 3500023         |
| $D_a$      | $6.914.10^{11}$ | $7.292.10^{11}$ | $7.412.10^{11}$ | $6.914.10^{11}$   | $7.292.10^{11}$ | $7.412.10^{11}$ | $6.914.10^{11}$ | $7.292.10^{11}$ | $7.412.10^{11}$ |
| v          | 78344           | 293793          | 1371055         | 78344             | 293793          | 1371055         | 78344           | 293793          | 1371055         |
| $\tau$     | 27971247        | 7587811         | 1634613         | 27971247          | 7587811         | 1634613         | 27971247        | 7587811         | 1634613         |
| $\gamma$   | 0.009           | 0.118           | 2.536           | 0.009             | 0.118           | 2.536           | 0.009           | 0.118           | 2.536           |
| $V_{Ff}$   | 200000          | 750000          | 3500000         | 200000            | 750000          | 3500000         | 200000          | 750000          | 3500000         |
| $\tau_f$   | 8825121         | 2482221         | 540578          | 8825121           | 2482221         | 540578          | 8825121         | 2482221         | 540578          |
| $\gamma_f$ | -0.009          | -0.118          | -2.536          | -0.009            | -0.118          | -2.536          | -0.009          | -0.118          | -2.536          |

- Uranus (#  $2,8.10^9$  km)

| Propulseur | Uranium        |                 |                 | Deutérium-tritium |                 |                 | Antimatière    |                 |                 |
|------------|----------------|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|
|            | K= $5.10^{-4}$ | K= $10^{-5}$    | K= $10^{-7}$    | K= $5.10^{-4}$    | K= $10^{-5}$    | K= $10^{-7}$    | K= $5.10^{-4}$ | K= $10^{-5}$    | K= $10^{-7}$    |
| t          | 42382836       | 11506563        | 2478207         | 42382836          | 11506563        | 2478207         | 42382836       | 11506563        | 2478207         |
| $\tau_a$   | 13789139       | 3982322         | 835048          | 13789139          | 3982322         | 835048          | 13789139       | 3982322         | 835048          |
| $V_F$      | 250025         | 950024          | 4350029         | 250025            | 950024          | 4350029         | 250025         | 950024          | 4350029         |
| $D_a$      | $1.35.10^{12}$ | $1.482.10^{12}$ | $1.423.10^{12}$ | $1.35.10^{12}$    | $1.482.10^{12}$ | $1.423.10^{12}$ | $1.35.10^{12}$ | $1.482.10^{12}$ | $1.423.10^{12}$ |
| v          | 97930          | 372138          | 1704041         | 97930             | 372138          | 1704041         | 97930          | 372138          | 1704041         |
| $\tau$     | 42382835       | 11506558        | 2478185         | 42382835          | 11506558        | 2478185         | 42382835       | 11506558        | 2478185         |
| $\gamma$   | 0.007          | 0.093           | 2.041           | 0.007             | 0.093           | 2.041           | 0.007          | 0.093           | 2.041           |
| $V_{Ff}$   | 250000         | 950000          | 4350000         | 250000            | 950000          | 4350000         | 250000         | 950000          | 4350000         |
| $\tau_f$   | 13791968       | 3982523         | 835059          | 13791968          | 3982523         | 835059          | 13791968       | 3982523         | 835059          |
| $\gamma_f$ | -0.007         | -0.093          | -2.041          | -0.007            | -0.093          | -2.041          | -0.007         | -0.093          | -2.041          |

## LOIS DE PROPULSION

- Neptune (#  $4,5 \cdot 10^9$  km)

|            | Uranium               |                       |                       | Deutérium-tritium     |                       |                       | Antimatière           |                       |                       |
|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Propulseur | $K=5 \cdot 10^{-4}$   | $K=10^{-5}$           | $K=10^{-7}$           | $K=5 \cdot 10^{-4}$   | $K=10^{-5}$           | $K=10^{-7}$           | $K=5 \cdot 10^{-4}$   | $K=10^{-5}$           | $K=10^{-7}$           |
| t          | 58148765              | 15782863              | 3400180               | 58148765              | 15782863              | 3400180               | 58148765              | 15782863              | 3400180               |
| $\tau_a$   | 19856364              | 5339189               | 1125465               | 19856364              | 5339189               | 1125465               | 19856364              | 5339189               | 1125465               |
| $V_F$      | 300001                | 1100046               | 5050019               | 300001                | 1100046               | 5050019               | 300001                | 1100046               | 5050019               |
| $D_a$      | $2.333 \cdot 10^{12}$ | $2.301 \cdot 10^{12}$ | $2.227 \cdot 10^{12}$ | $2.333 \cdot 10^{12}$ | $2.301 \cdot 10^{12}$ | $2.227 \cdot 10^{12}$ | $2.333 \cdot 10^{12}$ | $2.301 \cdot 10^{12}$ | $2.227 \cdot 10^{12}$ |
| v          | 117517                | 430896                | 1978271               | 117517                | 430896                | 1978271               | 117517                | 430896                | 1978271               |
| $\tau$     | 58148763              | 15782854              | 3400139               | 58148763              | 15782854              | 3400139               | 58148763              | 15782854              | 3400139               |
| $\gamma$   | 0.006                 | 0.081                 | 1.758                 | 0.006                 | 0.081                 | 1.758                 | 0.006                 | 0.081                 | 1.758                 |
| $V_{Ff}$   | 300000                | 1100000               | 5050000               | 300000                | 1100000               | 5050000               | 300000                | 1100000               | 5050000               |
| $\tau_f$   | 19856517              | 5339642               | 1125474               | 19856517              | 5339642               | 1125474               | 19856517              | 5339642               | 1125474               |
| $\gamma_f$ | -0.006                | -0.081                | -1.758                | -0.006                | -0.081                | -1.758                | -0.006                | -0.081                | -1.758                |

- Pluton (#  $6 \cdot 10^9$  km)

|            | Uranium               |                       |                       | Deutérium-tritium     |                       |                       | Antimatière           |                       |                       |
|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Propulseur | $K=5 \cdot 10^{-4}$   | $K=10^{-5}$           | $K=10^{-7}$           | $K=5 \cdot 10^{-4}$   | $K=10^{-5}$           | $K=10^{-7}$           | $K=5 \cdot 10^{-4}$   | $K=10^{-5}$           | $K=10^{-7}$           |
| t          | 70792337              | 19118512              | 4119067               | 70792337              | 19118512              | 4119067               | 70792337              | 19118512              | 4119067               |
| $\tau_a$   | 27026723              | 6354084               | 1384011               | 27026723              | 6354084               | 1384011               | 27026723              | 6354084               | 1384011               |
| $V_F$      | 350025                | 1200044               | 5600032               | 350025                | 1200044               | 5600032               | 350025                | 1200044               | 5600032               |
| $D_a$      | $3.706 \cdot 10^{12}$ | $2.987 \cdot 10^{12}$ | $3.036 \cdot 10^{12}$ | $3.706 \cdot 10^{12}$ | $2.987 \cdot 10^{12}$ | $3.036 \cdot 10^{12}$ | $3.706 \cdot 10^{12}$ | $2.987 \cdot 10^{12}$ | $3.036 \cdot 10^{12}$ |
| v          | 137103                | 470069                | 2193744               | 137103                | 470069                | 2193744               | 137103                | 470069                | 2193744               |
| $\tau$     | 70792334              | 19118499              | 4119006               | 70792334              | 19118499              | 4119006               | 70792334              | 19118499              | 4119006               |
| $\gamma$   | 0.005                 | 0.074                 | 1.585                 | 0.005                 | 0.074                 | 1.585                 | 0.005                 | 0.074                 | 1.585                 |
| $V_{Ff}$   | 350000                | 1200000               | 5600000               | 350000                | 1200000               | 5600000               | 350000                | 1200000               | 5600000               |
| $\tau_f$   | 27030727              | 6354560               | 1384027               | 27030727              | 6354560               | 1384027               | 27030727              | 6354560               | 1384027               |
| $\gamma_f$ | -0.005                | -0.074                | -1.585                | -0.005                | -0.074                | -1.585                | -0.005                | -0.074                | -1.585                |

- Ceinture de Kuiper (#  $9 \cdot 10^9$  km)

|            | Uranium               |                       |                       | Deutérium-tritium     |                       |                       | Antimatière           |                       |                       |
|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Propulseur | $K=5 \cdot 10^{-4}$   | $K=10^{-5}$           | $K=10^{-7}$           | $K=5 \cdot 10^{-4}$   | $K=10^{-5}$           | $K=10^{-7}$           | $K=5 \cdot 10^{-4}$   | $K=10^{-5}$           | $K=10^{-7}$           |
| t          | 92673643              | 25059949              | 5397502               | 92673643              | 25059949              | 5397502               | 92673643              | 25059949              | 5397502               |
| $\tau_a$   | 27026723              | 8648640               | 1807785               | 27026723              | 8648640               | 1807785               | 27026723              | 8648640               | 1807785               |
| $V_F$      | 350025                | 1400040               | 6400047               | 350025                | 1400040               | 6400047               | 350025                | 1400040               | 6400047               |
| $D_a$      | $3.706 \cdot 10^{12}$ | $4.743 \cdot 10^{12}$ | $4.533 \cdot 10^{12}$ | $3.706 \cdot 10^{12}$ | $4.743 \cdot 10^{12}$ | $4.533 \cdot 10^{12}$ | $3.706 \cdot 10^{12}$ | $4.743 \cdot 10^{12}$ | $4.533 \cdot 10^{12}$ |
| v          | 137103                | 548414                | 2507168               | 137103                | 548414                | 2507168               | 137103                | 548414                | 2507168               |
| $\tau$     | 92673637              | 25059926              | 5397398               | 92673637              | 25059926              | 5397398               | 92673637              | 25059926              | 5397398               |
| $\gamma$   | 0.005                 | 0.063                 | 1.387                 | 0.005                 | 0.063                 | 1.387                 | 0.005                 | 0.063                 | 1.387                 |
| $V_{Ff}$   | 350000                | 1400000               | 6400000               | 350000                | 1400000               | 6400000               | 350000                | 1400000               | 6400000               |
| $\tau_f$   | 27030727              | 8649136               | 1807812               | 27030727              | 8649136               | 1807812               | 27030727              | 8649136               | 1807812               |
| $\gamma_f$ | -0.005                | -0.063                | -1.387                | -0.005                | -0.063                | -1.387                | -0.005                | -0.063                | -1.387                |

## LOIS DE PROPULSION

- Nuage de Oort (#  $5.10^{12}$  km)

|                 | Uranium                |                       |                       | Deutérium-tritium      |                        |                       | Antimatière            |                        |                        |
|-----------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Propulseur      | K=5.10 <sup>-4</sup>   | K=10 <sup>-5</sup>    | K=10 <sup>-7</sup>    | K=5.10 <sup>-4</sup>   | K=10 <sup>-5</sup>     | K=10 <sup>-7</sup>    | K=5.10 <sup>-4</sup>   | K=10 <sup>-5</sup>     | K=10 <sup>-7</sup>     |
| t               | 6.24.10 <sup>9</sup>   | 1.811.10 <sup>9</sup> | 1.487.10 <sup>9</sup> | 6.24.10 <sup>9</sup>   | 1.693.10 <sup>9</sup>  | 7.084.10 <sup>8</sup> | 6.24.10 <sup>9</sup>   | 1.693.10 <sup>9</sup>  | 3.657.10 <sup>8</sup>  |
| τ <sub>a</sub>  | 1.986.10 <sup>9</sup>  | 3.265.10 <sup>8</sup> | 3264860               | 1.986.10 <sup>9</sup>  | 5.739.10 <sup>8</sup>  | 14967546              | 1.986.10 <sup>9</sup>  | 5.739.10 <sup>8</sup>  | 1.212.10 <sup>8</sup>  |
| V <sub>F</sub>  | 3000010                | 8600045               | 8600045               | 3000010                | 11400029               | 18400022              | 3000010                | 11400029               | 52000033               |
| D <sub>a</sub>  | 2.334.10 <sup>15</sup> | 1.1.10 <sup>15</sup>  | 1.1E+13               | 2.334.10 <sup>15</sup> | 2.563.10 <sup>15</sup> | 1.08.10 <sup>14</sup> | 2.334.10 <sup>15</sup> | 2.563.10 <sup>15</sup> | 2.482.10 <sup>15</sup> |
| v               | 1175185                | 3369154               | 3369154               | 1175185                | 4466420                | 7210955               | 1175185                | 4466420                | 20443262               |
| τ               | 6.24.10 <sup>9</sup>   | 1.81.10 <sup>9</sup>  | 1.487.10 <sup>9</sup> | 6.24.10 <sup>9</sup>   | 1.693.10 <sup>9</sup>  | 7.082.10 <sup>8</sup> | 6.24.10 <sup>9</sup>   | 1.693.10 <sup>9</sup>  | 3.652.10 <sup>8</sup>  |
| γ               | 0.001                  | 0.01                  | 1.032                 | 0.001                  | 0.008                  | 0.482                 | 0.001                  | 0.008                  | 0.169                  |
| V <sub>Ff</sub> | 3000000                | 8600000               | 8600000               | 3000000                | 11400000               | 18400000              | 3000000                | 11400000               | 52000000               |
| τ <sub>f</sub>  | 1.986.10 <sup>9</sup>  | 3.265.10 <sup>8</sup> | 3264894               | 1.986.10 <sup>9</sup>  | 5.739.10 <sup>8</sup>  | 14967582              | 1.986.10 <sup>9</sup>  | 5.739.10 <sup>8</sup>  | 1.212.10 <sup>8</sup>  |
| γ <sub>f</sub>  | -0.001                 | -0.01                 | -1.032                | -0.001                 | -0.008                 | -0.481                | -0.001                 | -0.008                 | -0.168                 |

- Année lumière (# 10<sup>13</sup> km)

|                 | Uranium                |                        |                        | Deutérium-tritium      |                         |                        | Antimatière            |                       |                        |
|-----------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| Propulseur      | K=5.10 <sup>-4</sup>   | K=10 <sup>-5</sup>     | K=10 <sup>-7</sup>     | K=5.10 <sup>-4</sup>   | K=10 <sup>-5</sup>      | K=10 <sup>-7</sup>     | K=5.10 <sup>-4</sup>   | K=10 <sup>-5</sup>    | K=10 <sup>-7</sup>     |
| t               | 9.912.10 <sup>9</sup>  | 3.473.10 <sup>9</sup>  | 3.193.10 <sup>9</sup>  | 9.912.10 <sup>9</sup>  | 2.688.10 <sup>9</sup>   | 1.431.10 <sup>9</sup>  | 9.912.10 <sup>9</sup>  | 2.689.10 <sup>9</sup> | 5.815.10 <sup>8</sup>  |
| τ <sub>a</sub>  | 3.530.10 <sup>9</sup>  | 2.825.10 <sup>8</sup>  | 2825031                | 3.530.10 <sup>9</sup>  | 8.658.10 <sup>8</sup>   | 14322681               | 3.530.10 <sup>9</sup>  | 8.658.10 <sup>8</sup> | 1.971.10 <sup>8</sup>  |
| V <sub>F</sub>  | 4000006                | 8000043                | 8000043                | 4000006                | 14000048                | 18000024               | 4000006                | 14000048              | 66000022               |
| D <sub>a</sub>  | 5.531.10 <sup>15</sup> | 8.854.10 <sup>15</sup> | 8.854.10 <sup>12</sup> | 5.531.10 <sup>15</sup> | 4.7501.10 <sup>15</sup> | 1.010.10 <sup>14</sup> | 5.531.10 <sup>15</sup> | 4.75.10 <sup>15</sup> | 5.141.10 <sup>15</sup> |
| v               | 1566928                | 3134055                | 3134055                | 1566928                | 5485558                 | 7054058                | 1566928                | 5485558               | 26005091               |
| τ               | 9.912.10 <sup>9</sup>  | 3.473.10 <sup>9</sup>  | 3.193.10 <sup>9</sup>  | 9.912.10 <sup>9</sup>  | 2.688.10 <sup>9</sup>   | 1.431.10 <sup>9</sup>  | 9.912.10 <sup>9</sup>  | 2.689.10 <sup>9</sup> | 5.803.10 <sup>8</sup>  |
| γ               | 0.00044                | 0.011                  | 1.109                  | 0.00044                | 0.0063                  | 0.492                  | 0.00044                | 0.006                 | 0.132                  |
| V <sub>Ff</sub> | 4000000                | 8000000                | 8000000                | 4000000                | 14000000                | 18000000               | 4000000                | 14000000              | 66000000               |
| τ <sub>f</sub>  | 3.530.10 <sup>9</sup>  | 2.825.10 <sup>8</sup>  | 2825062                | 3.530.10 <sup>9</sup>  | 8.658.10 <sup>8</sup>   | 14322720               | 3.530.10 <sup>9</sup>  | 8.658.10 <sup>8</sup> | 1.971.10 <sup>8</sup>  |
| γ <sub>f</sub>  | -0.00044               | -0.011                 | -1.109                 | -0.00044               | -0.0063                 | -0.492                 | -0.00044               | -0.006                | -0.131                 |

- Dix années lumière (# 10<sup>14</sup> km)

|                 | Uranium                |                        |                        | Deutérium-tritium      |                        |                        | Antimatière            |                        |                        |
|-----------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Propulseur      | K=5.10 <sup>-4</sup>   | K=10 <sup>-5</sup>     | K=10 <sup>-7</sup>     | K=5.10 <sup>-4</sup>   | K=10 <sup>-5</sup>     | K=10 <sup>-7</sup>     | K=5.10 <sup>-4</sup>   | K=10 <sup>-5</sup>     | K=10 <sup>-7</sup>     |
| t               | 4.603.10 <sup>10</sup> | 3.219.10 <sup>10</sup> | 3.191.10 <sup>10</sup> | 4.603.10 <sup>10</sup> | 1.560.10 <sup>10</sup> | 1.419.10 <sup>10</sup> | 4.603.10 <sup>10</sup> | 1.249.10 <sup>10</sup> | 2.746.10 <sup>9</sup>  |
| τ <sub>a</sub>  | 1.412.10 <sup>10</sup> | 2.825.10 <sup>8</sup>  | 2825031                | 1.412.10 <sup>10</sup> | 1.432.10 <sup>9</sup>  | 14322681               | 1.412.10 <sup>10</sup> | 3.991.10 <sup>9</sup>  | 9.747.10 <sup>8</sup>  |
| V <sub>F</sub>  | 8000043                | 8000043                | 8000043                | 8000043                | 18000024               | 18000024               | 8000043                | 30000041               | 1.400.10 <sup>8</sup>  |
| D <sub>a</sub>  | 4.427.10 <sup>16</sup> | 8.854.10 <sup>14</sup> | 8.854.10 <sup>12</sup> | 4.427.10 <sup>16</sup> | 1.010.10 <sup>16</sup> | 1.010.10 <sup>14</sup> | 4.427.10 <sup>16</sup> | 4.699.10 <sup>16</sup> | 5.576.10 <sup>16</sup> |
| v               | 3134055                | 3134055                | 3134055                | 3134055                | 7054058                | 7054058                | 3134055                | 11765771               | 56359717               |
| τ               | 4.603.10 <sup>10</sup> | 3.218.10 <sup>10</sup> | 3.190.10 <sup>10</sup> | 4.603.10 <sup>10</sup> | 1.560.10 <sup>10</sup> | 1.418.10 <sup>10</sup> | 4.603.10 <sup>10</sup> | 1.248.10 <sup>10</sup> | 2.720.10 <sup>9</sup>  |
| γ               | 0.00022                | 0.011                  | 1.109                  | 0.00022                | 0.0049                 | 0.492                  | 0.00022                | 0.0029                 | 0.057                  |
| V <sub>Ff</sub> | 8000000                | 8000000                | 8000000                | 8000000                | 18000000               | 18000000               | 8000000                | 30000000               | 1.400.10 <sup>8</sup>  |
| τ <sub>f</sub>  | 1.412.10 <sup>10</sup> | 2.825.10 <sup>8</sup>  | 2825062                | 1.412.10 <sup>10</sup> | 1.432.10 <sup>9</sup>  | 14322720               | 1.412.10 <sup>10</sup> | 3.991.10 <sup>9</sup>  | 9.747.10 <sup>8</sup>  |
| γ <sub>f</sub>  | -0.00022               | -0.011                 | -1.109                 | -0.00022               | -0.0049                | -0.492                 | -0.00022               | -0.0029                | -0.055                 |

## LOIS DE PROPULSION

### 2.3.4) Consommations d'ergols

Les quantités d'ergols consommés pour les diverses missions envisagées ci-dessus et pour les différentes combinaisons de types de propulseurs (caractérisés par leurs masses spécifiques) et d'ergols sont obtenues simplement en faisant le produit du temps de propulsion (accélération et freinage) mesuré dans le référentiel du vaisseau, par la puissance du propulseur considéré et en divisant par l'énergie spécifique de l'ergol, pondérée par le rendement, soit :

$$\chi = \frac{(\eta - \alpha)}{K} \cdot \frac{(\tau_a + \tau_f)}{\kappa \cdot \zeta}$$

Rappelons que  $\chi$  représente la fraction d'ergol rapportée à la masse totale du vaisseau.

#### 2.3.4.1) Consommations d'ergols sans phase de freinage

Les quantités d'ergol sont données en kilogramme par tonne de vaisseau (masse initiale).

| Propulseur                                   | Uranium              |                    |                    | Deutérium-tritium    |                    |                    | Antimatière          |                    |                    |
|--|----------------------|--------------------|--------------------|----------------------|--------------------|--------------------|----------------------|--------------------|--------------------|
|  | K=5.10 <sup>-4</sup> | K=10 <sup>-5</sup> | K=10 <sup>-7</sup> | K=5.10 <sup>-4</sup> | K=10 <sup>-5</sup> | K=10 <sup>-7</sup> | K=5.10 <sup>-4</sup> | K=10 <sup>-5</sup> | K=10 <sup>-7</sup> |
| Terre Lune                                   | 0.0007               | 0.009409           | 0.20088            | 0.000154             | 0.002076           | 0.044312           | 6.561E-7             | 0.000009           | 0.000188           |
| Mars en conjonction                          | 0.017496             | 0.207576           | 4.604256           | 0.003859             | 0.045789           | 1.015645           | 0.000016             | 0.000195           | 0.004316           |
| Mars en quadrature<br>Mercure en conjonction | 0.026136             | 0.328536           | 7.07652            | 0.005765             | 0.072471           | 1.560997           | 0.000025             | 0.000308           | 0.006634           |
| Mercure Vénus en opposition                  | 0.042336             | 0.606745           | 13.07196           | 0.009339             | 0.133841           | 2.883521           | 0.00004              | 0.000569           | 0.012255           |
| Mars en opposition                           | 0.062424             | 0.884738           | 18.926136          | 0.01377              | 0.195163           | 4.174883           | 0.000059             | 0.000829           | 0.017743           |
| Astéroïdes                                   | 0.077976             | 1.028379           | 22.397256          | 0.017201             | 0.226848           | 4.940571           | 0.000073             | 0.000964           | 0.020997           |
| Jupiter                                      | 0.104544             | 1.382406           | 30.054672          | 0.023061             | 0.304942           | 6.629707           | 0.000098             | 0.001296           | 0.028176           |
| Saturne                                      | 0.1944               | 2.381417           | 49.774176          | 0.042882             | 0.525313           | 10.979598          | 0.000182             | 0.002233           | 0.046663           |
| Uranus                                       | 0.2646               | 3.650442           | 75.207312          | 0.058368             | 0.805245           | 16.589848          | 0.000248             | 0.003422           | 0.070507           |
| Neptune                                      | 0.3456               | 4.860074           | 104.3676           | 0.076235             | 1.072075           | 23.022265          | 0.000324             | 0.004556           | 0.097845           |
| Pluton                                       | 0.437401             | 5.880708           | 126.458784         | 0.096485             | 1.297215           | 27.89532           | 0.00041              | 0.005513           | 0.118555           |
| Ceinture de Kuiper                           | 0.540001             | 7.797791           | 161.69868          | 0.119118             | 1.720101           | 36.498743          | 0.000506             | 0.00731            | 0.15512            |
| Nuage de Oort                                | 38.106962            | 159.833839         | 159.833808         | 8.405948             | 113.18199          | 161.685529         | 0.035725             | 0.481023           | 10.387393          |
| Une année lumière                            | 58.417121            | 159.833839         | 159.833808         | 12.88613             | 161.685538         | 161.685529         | 0.054766             | 0.764082           | 16.400285          |
| Dix années lumière                           | 159.833839           | 159.833839         | 159.833808         | 61.976792            | 161.685538         | 161.685529         | 0.263401             | 3.580698           | 73.41052           |

#### 2.3.4.2) Consommations d'ergols avec phase de freinage

Les quantités d'ergol sont données en kilogramme par tonne de vaisseau (masse initiale).

| Propulseur                                   | Uranium              |                    |                    | Deutérium-tritium    |                    |                    | Antimatière          |                    |                    |
|--|----------------------|--------------------|--------------------|----------------------|--------------------|--------------------|----------------------|--------------------|--------------------|
|  | K=5.10 <sup>-4</sup> | K=10 <sup>-5</sup> | K=10 <sup>-7</sup> | K=5.10 <sup>-4</sup> | K=10 <sup>-5</sup> | K=10 <sup>-7</sup> | K=5.10 <sup>-4</sup> | K=10 <sup>-5</sup> | K=10 <sup>-7</sup> |
| Terre Lune                                   | 0.001075             | 0.01464            | 0.318816           | 0.000237             | 0.00323            | 0.070327           | 0.000001             | 0.000014           | 0.000299           |
| Mars en conjonction                          | 0.022886             | 0.336151           | 7.274952           | 0.005048             | 0.074151           | 1.604769           | 0.000021             | 0.000315           | 0.00682            |
| Mars en quadrature<br>Mercure en conjonction | 0.040686             | 0.498228           | 11.071296          | 0.008975             | 0.109903           | 2.442198           | 0.000038             | 0.000467           | 0.010379           |
| Mercure Vénus en opposition                  | 0.076888             | 0.966562           | 20.359512          | 0.01696              | 0.213212           | 4.491069           | 0.000072             | 0.000906           | 0.019087           |
| Mars en opposition                           | 0.107396             | 1.403714           | 29.646576          | 0.02369              | 0.309643           | 6.539686           | 0.000101             | 0.001316           | 0.027794           |
| Astéroïdes                                   | 0.124557             | 1.652706           | 35.09136           | 0.027476             | 0.364567           | 7.740741           | 0.000117             | 0.001549           | 0.032898           |
| Jupiter                                      | 0.162694             | 2.212014           | 47.358072          | 0.035888             | 0.487944           | 10.446634          | 0.000153             | 0.002074           | 0.044398           |
| Saturne                                      | 0.254162             | 3.574277           | 77.842728          | 0.056065             | 0.788443           | 17.17119           | 0.000238             | 0.003351           | 0.072978           |
| Uranus                                       | 0.397168             | 5.734688           | 120.247704         | 0.087611             | 1.265005           | 26.525229          | 0.000372             | 0.005376           | 0.112732           |
| Neptune                                      | 0.571865             | 7.688758           | 162.067608         | 0.126147             | 1.69605            | 35.750208          | 0.000536             | 0.007208           | 0.151938           |
| Pluton                                       | 0.778427             | 9.150224           | 199.298736         | 0.171712             | 2.018432           | 43.962956          | 0.00073              | 0.008578           | 0.186843           |
| Ceinture de Kuiper                           | 0.778427             | 12.454399          | 260.322984         | 0.171712             | 2.747294           | 57.424188          | 0.00073              | 0.011676           | 0.244053           |
| Nuage de Oort                                | 57.1968              | 470.16             | 470.13984          | 12.616941            | 182.297647         | 475.439696         | 0.053622             | 0.16362            | 16.362             |
| Une année lumière                            | 101.664              | 406.8              | 406.804464         | 22.425882            | 275.018824         | 454.955749         | 0.09531              | 1.16883            | 26.6085            |
| Dix années lumière                           | 406.656              | 1246.752           | 406.804464         | 89.703529            | 454.870588         | 454.955749         | 0.38124              | 5.38785            | 131.5845           |

## LOIS DE PROPULSION

### 3) Conclusions

Il ressort des résultats des calculs, présentés ci-dessus, que la “ physique sur étagère ” et, même, presque la “ technologie sur étagère ” permettraient de réaliser des vaisseaux de l'espace capables de performances en durées de parcours nettement supérieures à celles auxquelles nous ont habitués les moyens conventionnels. C'est ainsi qu'un appareil équipé d'un modeste réacteur nucléaire de type courant, associé à un propulseur à impulsion spécifique variable tel qu'une tuyère à plasma, par exemple, pourrait atteindre la Lune en un peu plus d'une journée, Mars, en moins d'un mois, Mercure ou Venus, en un peu plus d'un mois et demi, la ceinture des astéroïdes, en moins de six mois, Saturne, l'objectif de l'extraordinaire mission Cassini / Huygens, en moins de onze mois, la lointaine Pluton, en moins de deux ans et trois mois et, la ceinture de Kuiper, en moins de trois ans. Ces temps de parcours se réduisant, respectivement, si l'on ramenait la masse spécifique du propulseur à celle d'un réacteur d'avion, à huit heures, pour la Lune, un peu plus de deux jours, pour Mars, une douzaine de jours, pour Mercure ou Venus, à peine plus d'un mois, pour la ceinture d'astéroïdes, moins de trois mois, pour Saturne, moins de huit mois, pour Pluton et moins de dix mois, pour la ceinture de Kuiper. Les consommations d'ergol, en l'occurrence, de l'uranium ou du thorium, ne dépassant pas 0,8 kg par tonne de vaisseau, dans le cas d'un réacteur de type classique et 12 kg par tonne de vaisseau, pour le type le plus performant. Rappelons que le vaisseau en question inclurait 60% de sa masse sous forme de propergol, lequel pourrait faire partie de la structure (supposée consommable), 30% constituée par le propulseur, 10% seulement étant dévolue à la charge utile. Cependant, pour des distances “ sidérales ” telles que la distance moyenne du nuage de Oort, une année lumière ou dix années lumière (la distance nous séparant de Sirius est un peu supérieure à 8 années lumière), les temps de parcours deviennent prohibitifs, même en assurant le freinage par réaction sur le gaz interstellaire et, cela, même avec le recours à l'antimatière, dont les capacités énergétiques exigent l'utilisation d'un propulseur plus performant que les meilleurs propulseurs de fusée, la durée d'un parcours de dix années lumière, dans de telles conditions étant encore voisine de 57 ans (réduite à moins de 56ans, dans le système propre du vaisseau, en raison des effets relativistes). Cela au prix d'une consommation de plus de 73 kg d'antimatière par tonne de vaisseau. Ce fait est dû à ce que, même les propulseurs de la masse spécifique la plus réduite que l'on puisse concevoir, sans enfreindre la règle exigeant de se limiter à la “ physique sur étagère ”, ne permettent pas de disposer d'une puissance suffisante pour “ brûler ” assez vite l'antimatière. La solution, dans le cas des distances “ sidérales ”, consiste à ravitailler le vaisseau, en vol, en accélérant des conteneurs de propergol et d'ergol (lequel peut, tout banalement, être de l'uranium ou du thorium) au moyen de faisceaux de particules émis depuis des centrales à énergie solaire en orbite et agissant sur une “ voile magnétique ” solidaire du conteneur.