

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY et ÉDOUARD KIERLIK
professeurs de physique à Sorbonne Université, à Paris

EN ROUTE VERS MARS! MAIS QUELLE ROUTE?

Il s'agit de choisir les trajectoires des sondes spatiales de telle façon que les moteurs-fusées consomment le moins possible de carburant.



Le lancement de plusieurs missions spatiales vers Mars est prévu cette année, entre la mi-juillet et le début d'août. Une fenêtre favorable qui ne se répète que tous les 26 mois.

Tianwen-1, Hope, Mars 2020... Le point commun à tous ces noms? Il s'agit de missions spatiales à destination de Mars dont le lancement est prévu entre la mi-juillet et le début d'août 2020. Une accumulation temporelle qui n'est pas fortuite: ces missions profitent d'une fenêtre de lancement vers la Planète rouge qui ne s'ouvre que tous les 26 mois. Toutes ces sondes spatiales suivront la même trajectoire, *grosso modo* une demi-ellipse. Pourquoi cette fenêtre? Et quelles trajectoires ces engins empruntent-ils? Les lois de la mécanique permettent de répondre.

DU BON USAGE DES MOTEURS À RÉACTION

Comment, dans le Système solaire, modifier une trajectoire régie exclusivement par l'attraction gravitationnelle du

Soleil et des autres planètes? Pour ce faire, il faut exercer une force. Or dans le vide spatial, il n'y a ni sol terrestre sur lequel prendre appui, ni eau sur laquelle flotter, ni air pour se faire porter. Si l'on exclut l'utilisation de la lumière du Soleil comme le font les voiles solaires, la seule possibilité qui reste est le principe de l'action et de la réaction.

Lorsqu'un système physique éjecte une masse vers l'arrière, la conservation de la quantité de mouvement (le produit de la masse par la vitesse) implique que le reste du système est propulsé vers l'avant. En pratique, pour les moteurs-fusées, la force propulsive résultant de cette éjection est le produit du débit de masse par la vitesse d'éjection. Cela a deux conséquences.

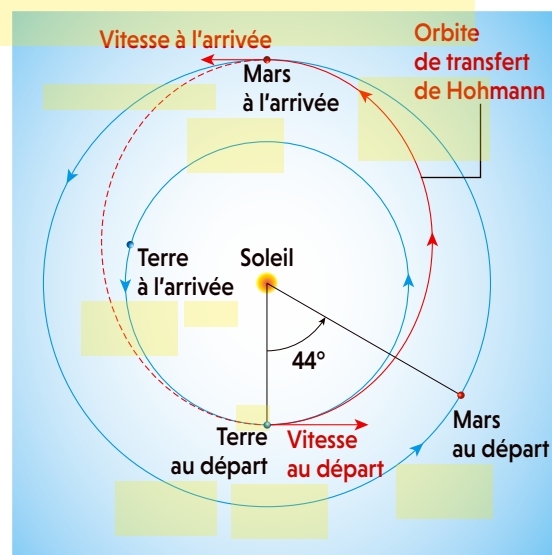
D'une part, cette force ne dépend pas de la vitesse déjà acquise par la fusée; autrement dit, il n'est pas de plus en plus

difficile d'accélérer (contrairement au cas d'une voiture!). D'autre part, les moteurs à combustion chimique utilisés pour les sondes interplanétaires ne peuvent fonctionner en continu, compte tenu des petites quantités de carburant embarquées et des débits massiques requis pour accélérer convenablement. Une fois la sonde spatiale libérée de l'attraction terrestre, à l'échelle de la durée et des distances d'une mission vers Mars, tout se passe comme si le fonctionnement des moteurs se limitait à quelques brefs instants et provoquait une variation de vitesse instantanée. On parle alors d'«incrément» de vitesse de la sonde en un point de sa trajectoire.



L'ORBITE DE TRANSFERT DE HOHMANN

La fenêtre de lancement la plus favorable pour une mission vers Mars se reproduit tous les 26 mois. Dans cette situation ici représentée, les propulseurs de la sonde lui confèrent un incrément de vitesse à son départ depuis la Terre, dans le sens du mouvement. Cela met la sonde sur une partie de trajectoire elliptique, l'« orbite de transfert de Hohmann », jusqu'à rejoindre l'orbite de Mars (assimilée ici à un cercle pour simplifier) au périhélie de l'ellipse. Là, un second incrément de vitesse est donné à la sonde pour qu'elle accompagne la Planète rouge dans son mouvement de révolution.



Comment dans ces conditions aller sur Mars? Pour simplifier, une fois la sonde partie de la Terre, oublions l'attraction de cette dernière ainsi que celle de Mars et des autres planètes, et imaginons que notre engin se trouve sur la même orbite que la Terre. Cela signifie que l'on part d'une trajectoire quasi circulaire autour du Soleil parcourue à la vitesse, respectable, de 29,8 kilomètres par seconde (km/s).

Toute modification de vitesse transformera cette orbite circulaire en une ellipse dont le Soleil est un foyer, seule forme possible de trajectoire pour les objets piégés par le champ de gravitation du Soleil. Comment, dans cette situation, choisir l'incrément de vitesse pour optimiser la trajectoire et utiliser le moins possible de carburant? Autrement dit, dans quelle direction pointer et quel incrément minimal de vitesse fournir?

L'idée qui vient naturellement à l'esprit est de s'éloigner du Soleil, donc de pousser dans la direction opposée à notre étoile. Mauvaise idée! Comme l'illustre l'encadré page 90, la trajectoire qui en résulte est beaucoup plus limitée que lorsque l'incrément de vitesse est fourni dans la direction de la vitesse initiale.

OPTIMISER LA TRAJECTOIRE

On peut le comprendre d'un point de vue énergétique. L'énergie fournie à l'engin spatial par la force de poussée (qui, on l'a vu, est indépendante de son mouvement) est d'autant plus élevée que cette force et la vitesse sont colinéaires. Or, à la fin, pour s'éloigner du « puits » de gravité du Soleil, il faut bien augmenter son énergie mécanique.

En poussant dans le sens du mouvement, on optimise cette augmentation en plaçant la sonde sur une trajectoire

elliptique, le point où est appliqué l'incrément étant le périhélie (le point le plus proche du Soleil) de cette ellipse. L'incrément minimal est alors celui pour lequel l'aphélie (le point de l'ellipse le plus distant du Soleil) est sur l'orbite de Mars. Cela correspond à un supplément de vitesse de 2,9 km/s et la trajectoire suivie, appelée « orbite de transfert de Hohmann » en l'honneur de l'ingénieur allemand Walter Hohmann qui l'a proposée en 1925, est une demi-ellipse (voir l'encadré ci-dessus). Ce type de trajectoire est communément employé avec les satellites artificiels, pour les transférer d'une orbite basse >

Les auteurs ont notamment publié:
En avant la physique!,
une sélection de leurs
chroniques (Belin, 2017).

