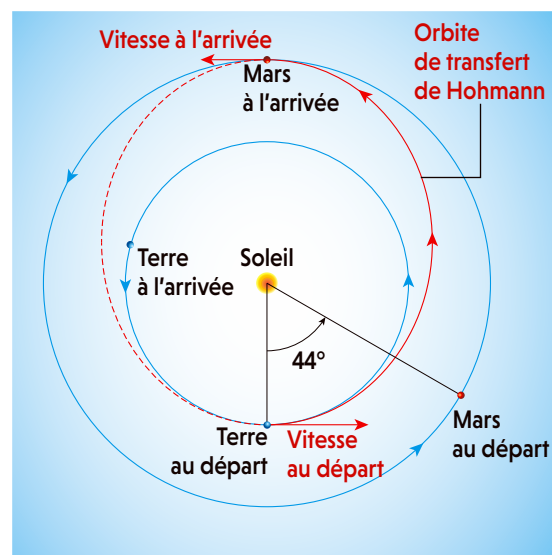




L'ORBITE DE TRANSFERT DE HOHMANN

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).



> (à 300 km d'altitude) vers une orbite géostationnaire (à 35800 km).

Suivre cette trajectoire « optimale » a cependant deux conséquences. Sa durée est parfaitement connue en vertu des lois de Kepler régissant le mouvement d'un corps en orbite autour du Soleil : 258 jours. Cela fixe la fenêtre de lancement, car il faut que, 258 jours après le départ de la mission depuis la Terre, Mars soit sur son orbite dans la position diamétralement opposée par rapport au Soleil. Ce n'est possible que si Mars est dans une certaine position par rapport à la Terre au moment du départ, ce qui n'arrive que tous les 26 mois.

Seconde conséquence : à l'arrivée sur l'orbite martienne, la vitesse de la sonde est seulement de 21,5 km/s, insuffisante pour suivre Mars qui se déplace à 24,1 km/s. Un nouvel incrément de 2,6 km/s est donc nécessaire, pour un total à l'aller de 5,5 km/s. Notons qu'il reste tout à fait possible de faire le voyage plus vite et de partir à une autre période, mais cela nécessite alors bien plus de carburant pour une même masse utile.

PROFITER DE LA GRAVITÉ DES PLANÈTES ?

On peut établir de la même façon les paramètres du voyage retour : la durée totale atteint 974 jours, très longue pour des cosmonautes ! De plus, ce scénario est très idéalisé du point de vue énergétique, car il oublie qu'avant d'être soumis à la seule force gravitationnelle du Soleil, il faut pouvoir quitter le puits de gravité de la Terre et, pour le retour, celui de Mars. Cela nécessite d'atteindre des vitesses considérables, appelées vitesse de libération, respectivement de 11,2 km/s et 5,1 km/s, qui viennent s'ajouter aux incréments précédents.

Cela explique pourquoi il peut être avantageux de choisir un lancement depuis une orbite basse : il faut toujours payer énergétiquement pour amener les éléments de la fusée sur cette orbite mais, ensuite, le coût du voyage est notablement réduit, en profitant de la vitesse déjà acquise. Des calculs donnent ainsi un incrément de 3,6 km/s au lieu des 2,9 km/s.

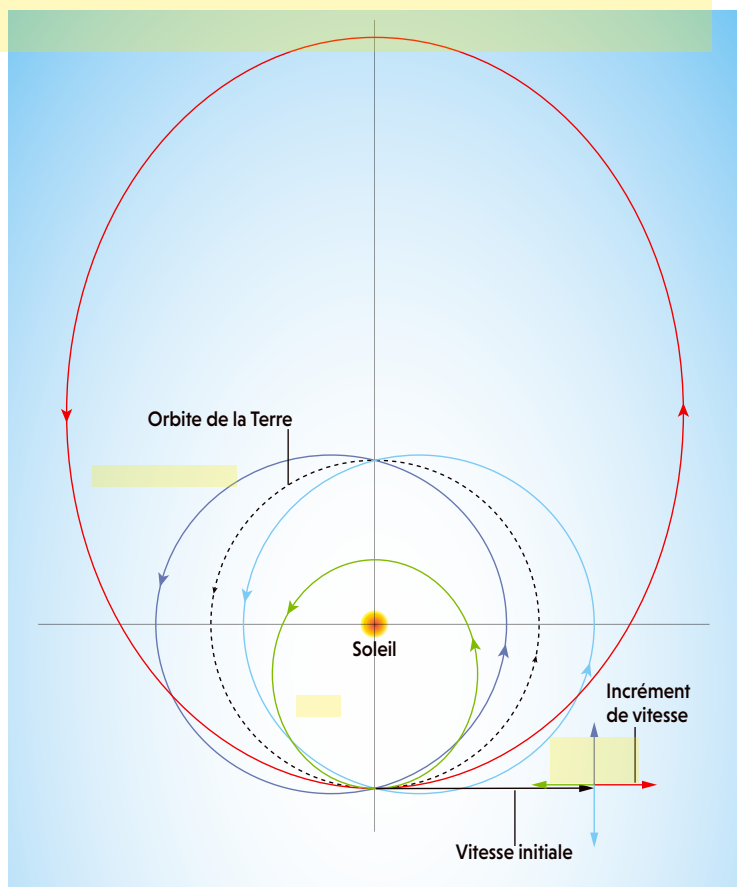
Les gravités planétaires présentent parfois quelques avantages. Imaginons que notre sonde spatiale arrive au voisinage de Mars en la devançant sur sa trajectoire. Si elle arrive suffisamment près de Mars, l'attraction gravitationnelle de Mars devient supérieure à l'attraction gravitationnelle du Soleil. On dit que la sonde est rentrée dans la sphère d'influence de Mars, dont le rayon est estimé à environ 600000 km. Sa

trajectoire est alors contrôlée par Mars, sa vitesse va rapidement augmenter en se rapprochant de la planète, avec le risque soit de la percuter, soit de la frôler à plus de 5,1 km/s et de repartir dans l'espace. C'est pourquoi on freine en général la sonde pour la placer en orbite basse avant qu'elle ne se pose sur la planète. Nul besoin de l'accélérer comme on l'avait évoqué (même si freiner coûte aussi de l'énergie).

On peut aussi jouer sur l'influence gravitationnelle de Mars pour raccourcir la durée du voyage : comme l'orbite de Mars est tangente à l'orbite de transfert à l'aphélie, on peut faire tomber la sonde dans le puits de gravité de la planète bien avant que l'aphélie soit atteint. Le gain peut alors atteindre un bon mois. ■

UN INCRÉMENT DE VITESSE BIEN DIRIGÉ

L'incrément de vitesse appliqué à une sonde spatiale à son départ depuis la Terre donne à l'engin une trajectoire elliptique différente selon la direction de l'incrément. Lorsque l'incrément est donné dans le sens du mouvement initial (celui de la Terre), l'énergie acquise est maximale et la trajectoire qui en résulte (en rouge) a la portée la plus grande. Trois autres situations (en vert, bleu clair et bleu foncé), pour des incréments dirigés en sens opposé ou perpendiculairement au mouvement, sont également figurées ici.



BIBLIOGRAPHIE

A. Stinner et J. Begoray, **Journey to Mars : The physics of travelling to the red planet**, *Physics Education*, vol. 40(1), pp. 35-45, 2005.

L. M. Celnikier, **Basics of Space Flight**, Frontières, 1993.