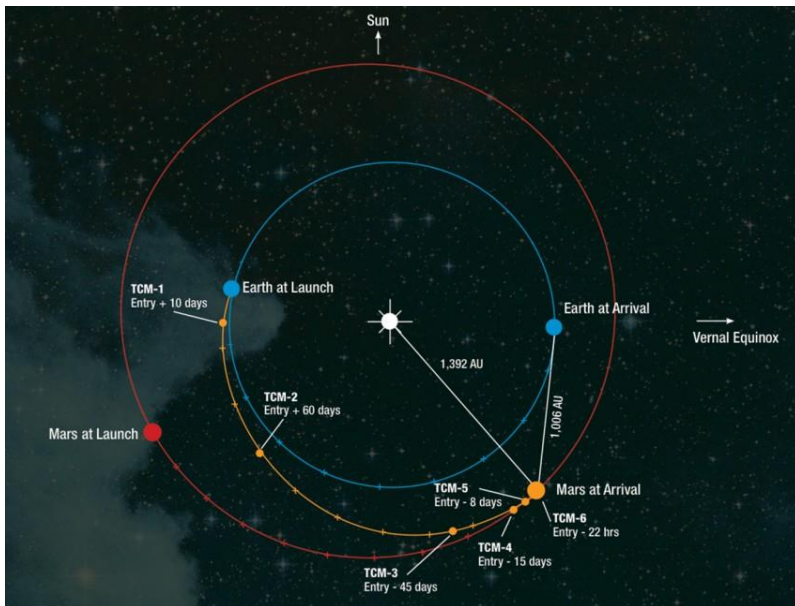


# Aller sur Mars

## 1. Introduction & Pb

Après son lancement, InSight va effectuer un voyage de six mois et demi dans l'espace interplanétaire avant d'atteindre son objectif, la planète rouge. La trajectoire que va suivre la sonde est un arc de cercle, dont l'une des extrémités touche la Terre, tandis que l'autre atteint Mars. Cette orbite de transfert décrit autour du soleil un parcours qui est calculé précisément par les scientifiques impliqués dans la mission.



Orbite suivie par la sonde InSight entre la Terre et Mars (© NASA)

Nous vous proposons dans cette activité de **déterminer comme l'on fait les scientifiques la fenêtre de lancement d'une sonde vers Mars.**

## 2. Age des étudiants

15-17 ans

## 3. Objectif

L'objectif est de déterminer la prochaine fenêtre de lancement vers Mars à partir de la position relative de la Terre et de Mars qui correspond à la trajectoire optimale du vaisseau spatial en termes de consommation d'énergie et en utilisant les données de position planétaire ainsi que le concept d'algèbre avancée.

## 4. Disciplines principales

Mathématiques - Physique – Sciences de la Terre

## 5. Temps requis 30 min – 1 h

## 6. Mots-clés

Orbite, Terre, Mars, missions spatiales, fenêtre de décollage, graphique

## 7. Matériel

Calculatrice, punaises, papier graphique, quadrille ligné, fiche technique des longitudes héliocentriques planétaires

## 8. Connaissance requise

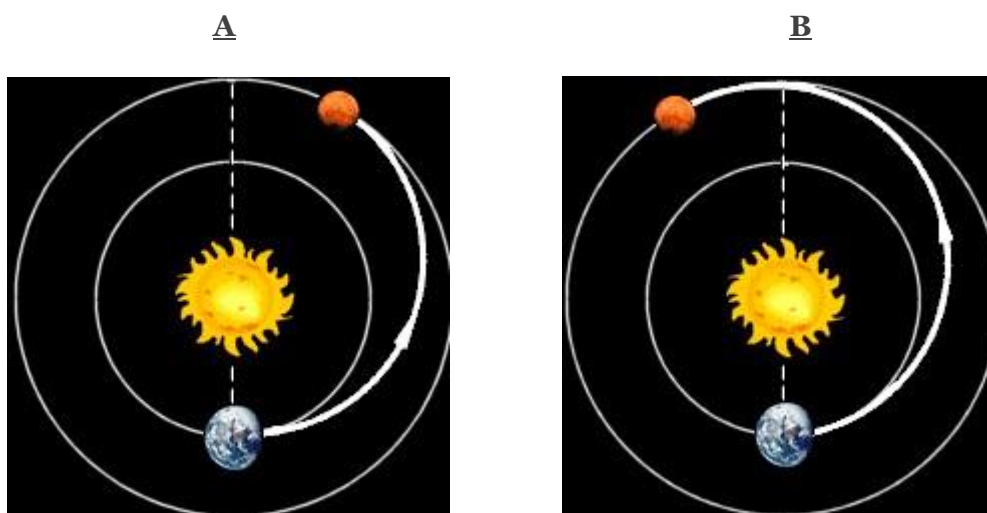
Pour envoyer un vaisseau spatial de la Terre vers n'importe quelle planète, il faut tenir compte de la courbe de la trajectoire résultante de la combinaison de la vitesse du vaisseau spatial et de la force gravitationnelle de la planète. Pour cela les scientifiques doivent "travailler" sur la notion de force et réfléchir à un voyage dans la mesure du possible sans moteur, ce qui réduit le coût de la mission.

Comme dans beaucoup de scénarios similaires (par exemple : passer un ballon à un coéquipier de football en course à pied), ce dont il faut tenir compte c'est l'impulsion initiale donnée au vaisseau spatial (le lancement équivalent au lancement du ballon), la position de la planète visée (décrite par son orbite) et enfin la force gravitationnelle.

Pour quitter la Terre et partir en direction de Mars, un vaisseau spatial doit suivre une trajectoire elliptique dont l'une des extrémités touche la Terre et l'autre Mars. En d'autres termes, le vaisseau est placé sur une orbite solaire dont le périhélie (le point de l'orbite le plus proche du Soleil) est occupé par la Terre et dont l'aphélie (le point de l'orbite le plus éloigné du Soleil) est occupé par Mars.

Ce type de trajectoire permet de transférer un objet entre deux planètes avec une dépense énergétique minimale. Elle a été découverte par un ingénieur allemand en 1925 (Walter Hohmann). C'est pourquoi on l'appelle souvent trajectoire de transfert de Hohmann.

C'est une explication simple pour un scénario beaucoup plus complexe où les scientifiques doivent tenir compte d'une variété de paramètres qui sont plus ou moins constants. Ce qu'il faut bien comprendre, c'est qu'une fenêtre de temps de tir spécifique doit être calculée et validée par de multiples simulations bien avant le lancement. Cela permettra de disposer d'une fenêtre de tir adéquate, de sorte que le vaisseau spatial arrivera sur l'orbite de la planète.



En A, position respective de Mars et de la Terre au moment du lancement. En B, la position respective de Mars et de la Terre lors de l'atterrissage (Crédit photo : © Philippe Labrot).

## 9. Protocole

On expliquera aux élèves qu'un vaisseau spatial doit avoir une trajectoire elliptique autour du Soleil pour atteindre le même point en même temps que la planète Mars. Ce qu'ils doivent faire ensuite, c'est de déterminer l'heure du lancement pour que cette intersection ait lieu.

La trajectoire que l'on imprime à un vaisseau spatial pointe dans une direction qui est totalement inoccupée au moment du départ. Ce n'est qu'au terme du voyage que le point d'arrivée sera occupé par la planète que l'on désire atteindre. C'est cette mobilité de la cible à atteindre et la ronde perpétuelle des planètes autour du soleil qui explique que les lancements ne peuvent avoir lieu qu'à l'intérieur de périodes bien déterminées dans le temps. On désigne ces périodes propices aux lancements sous le nom de fenêtre de tir.

Une sonde lancée sur une orbite de transfert de Hohmann mettrait 520 jours pour en faire le tour. Comme la Terre est située au périhélie et Mars à l'aphélie, une sonde ne doit parcourir que la moitié de cette orbite pour arriver à destination soit 260 jours. Pendant ce laps de temps, la planète Mars aura parcouru une certaine distance, que l'on peut calculer aisément. Mars boucle un tour en 687 jours (c'est la durée d'une année martienne).

Depuis sa position au moment du lancement, la planète aura donc parcouru un angle de  $260/687 \times 360^\circ$ , soit  $136^\circ$  autour du soleil. On peut alors calculer la position relative de la Terre et de Mars au rapport au soleil pour que le lancement soit réussi et que le vaisseau arrive à atteindre sa destination :  $180^\circ - 136^\circ = 44^\circ$ . Ainsi, les lancements ne sont possibles que lorsque la terre est située  $44^\circ$  en arrière de la planète Mars. Cette condition n'apparaît que tous les 26 mois, 50 jours en moyenne avant les oppositions (en période d'opposition, Mars est au plus proche de la Terre et l'angle Mars - Soleil - Terre vaut alors  $0^\circ$ ).

La deuxième loi de Kepler nous dit aussi que les planètes voyagent à des vitesses différentes dans leurs orbites elliptiques, se déplaçant plus rapidement quand elles sont plus proches du Soleil et plus lentement quand elles sont plus éloignées du Soleil.

Pour rendre possible la tâche mathématique complexe de lancer un engin spatial tout en considérant la dynamique orbitale des planètes, on proposera aux élèves d'émettre des hypothèses sur la fenêtre de lancement.

**Hypothèse 1 :** Les orbites de la Terre et de Mars sont circulaires et centrées sur le soleil. (L'orbite de la Terre est circulaire de Mars, mais les deux sont légèrement elliptiques.)

**Hypothèse 2 :** La Terre et Mars voyagent à vitesse constante. (Ils ne le font pas. Voir la deuxième loi de Kepler).

**Hypothèse 3 :** Les orbites de la Terre et de Mars sont dans le même plan. (Ils sont proches mais légèrement décalés l'un par rapport à l'autre).

Expliquer aux élèves le concept de longitude héliocentrique. Tout comme les longitudes sur Terre mesurent la position par rapport à un point fixe (le méridien origine), les longitudes héliocentriques mesurent la position dans l'espace le long de l'écliptique par rapport à l'équinoxe vernal.

Sachant que la Terre est, en moyenne, à 1 unité astronomique (UA) du Soleil et Mars est, en moyenne, à 1,52 UA du Soleil, les élèves trouvent la longueur du demi-grand axe de l'orbite de transfert en unités astronomiques (UA).

À l'aide de la ficelle et des punaises, demandez aux élèves de dessiner les orbites supposées circulaires de la Terre et de Mars autour du soleil et l'approximation de l'orbite de transfert de Hohmann sur du papier graphique.

Déterminer la période de l'orbite de transfert de Hohmann, puis le temps de parcours vers Mars le long de cette orbite à l'aide de la troisième loi de Kepler (loi de l'harmonie).

La troisième loi de Kepler stipule que le carré de la période de toute planète est proportionnel au cube du demi-grand axe de son orbite. Une équation peut représenter cette relation :

$P^2 = ka^3$  avec  $k$  étant la constante de proportionnalité

En utilisant la Terre comme exemple, nous pouvons mesurer  $P$  en années et  $a$  en unités astronomiques donc  $P = 1$  an et  $a = 1$  UA. Ainsi,  $P^2 = ka^3 \rightarrow k=1 \Rightarrow P^2 = a^3$

$P^2 = (1,26 \text{ AU})^3 \Rightarrow P \sim 1,41 \text{ ans} \sim 517 \text{ jours}$

La période complète de cette orbite de transfert de Hohmann est de 517 jours. Le voyage vers Mars comprend la moitié d'une orbite, soit environ 259 jours.

Compte tenu des mouvements quotidiens de la Terre et de Mars, calculez la position relative idéale des deux planètes pendant le lancement.

1 révolution de Mars = 687 jours  $\Rightarrow$  0,524 degrés/jour  $\Rightarrow$  136 degrés/259 jours

Pour calculer la position de Mars au moment du lancement, soustrayez de son point d'arrivée (180 degrés) l'amplitude de son mouvement pendant le temps de déplacement du vaisseau spatial (136 degrés). 180 degrés - 136 degrés = 44 degrés.

En utilisant les longitudes héliocentriques planétaires, approximativement quand est la prochaine opportunité pour un lancement vers Mars ?

## 10. Echange autour des résultats et conclusion

Une fois ces calculs réalisés, il serait intéressant de demander aux élèves ce qui se passerait si l'estimation de la fenêtre de lancement est plus courte ou plus longue qu'elle ne devrait l'être ?

Mais aussi de réaliser des recherches sur les modalités de calcul utilisés par les scientifiques lors des premières missions spatiales.

## 11. Pour aller plus loin

Réalisez un court programme en Python qui vous permettra de soustraire les longitudes héliocentriques de la Terre et de Mars pour simplifier le calcul des fenêtres de lancement.

## 12. Pour en savoir plus (ressources pour les enseignants)

- Stomp Rockets Activity : <https://www.jpl.nasa.gov/edu/teach/activity/stomp-rockets/>

- When Computers Were Human <https://www.jpl.nasa.gov/edu/news/2016/10/31/when-computers-were-human/>

- Mars in a Minute Video Series <https://www.jpl.nasa.gov/edu/teach/activity/mars-in-a-minute/>

[- https://www.seis-insight.eu/fr/public/l-instrument-seis/exomars/54-public/la-mission-insight](https://www.seis-insight.eu/fr/public/l-instrument-seis/exomars/54-public/la-mission-insight)

Cette activité s'inspire du programme d'éducation du JPL.