

DM n°10: Architecture de la matière et mécanique

A faire pour le jeudi 01 avril 2021

I Seul sur Mars

L'histoire du film *The Martian* (*Seul sur Mars*) de Ridley Scott, montre comment un homme, Mark Watney, survit seul sur Mars grâce à ses connaissances scientifiques. L'environnement hostile de la planète représente une contrainte de taille pour les ingénieurs et les scientifiques qui travaillent pour que des hommes puissent un jour poser le pied sur la planète rouge. La NASA annonce un vol habité pour Mars dans les années 2030, l'hypothèse du film n'est donc pas irréaliste. Même si cette histoire repose sur des travaux scientifiques et des techniques aérospatiales actuelles, on peut se demander si l'histoire est bien réaliste.

Données :

- ★ Rayons de la Terre $R_T = 6380$ km, de Mars $R_M = 3390$ km et du Soleil $R_S = 6,96 \times 10^5$ km
- ★ Densité moyenne de la Terre $d_T = 5,5$ et de Mars $d_M = 3,9$
- ★ Constante gravitationnelle $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$
- ★ Célérité de la lumière dans le vide $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$
- ★ Distance Terre-Soleil $a_T = 1,50 \times 10^8$ km
- ★ Masse du vaisseau Hermès $M_H = 500 \times 10^3$ kg



I.1 La planète Mars

Mars est la quatrième planète par ordre de distance croissante au Soleil et la deuxième par masse et par taille croissantes sur les huit planètes que compte le système solaire. Dans le référentiel héliocentrique (aussi appelé référentiel de Kepler), supposé galiléen, la trajectoire de Mars est une ellipse contenue dans le plan de l'écliptique.

Document 1 – Extrait de "CNRS Le journal" - Entretien du 09 novembre 2016

QUESTION :

Envoyer des humains sur Mars coûterait au moins 100 ou 200 milliards de dollars et ne serait possible que vers 2050, à condition qu'une vraie volonté politique se dégage. Ne vaut-il pas mieux continuer à envoyer des robots ?

RÉPONSE (du planétologue François Forget) :

C'est un vieux débat, [...] les robots ne sont pas forcément plus efficaces que les humains. Par exemple, un géologue peut repérer en quelques secondes une pierre intéressante, alors qu'il faudra des jours pour la repérer en manœuvrant un rover depuis la Terre, vu que les signaux radio mettent 5 à 22 minutes entre les deux planètes. Mais il y a une alternative qui me plaît bien : envoyer des humains en orbite martienne sans qu'ils se posent à la surface. Il est en effet très difficile — et donc coûteux — de poser des charges de plus d'une tonne sur Mars. Parce que l'atmosphère y est trop fine pour freiner correctement avec un parachute comme sur Terre, et trop épaisse pour ralentir juste au-dessus de la surface avec de simples rétrofusées comme sur notre Lune. Autre avantage : plus besoin de MAV pour remonter, ni d'habitat en surface. Au final, depuis l'orbite, les astronautes pourraient facilement aller se poser sur les petites lunes Phobos ou Deimos (qui n'ont presque pas de gravité), et surtout piloter en quasi temps réel des robots sophistiqués envoyés sur Mars elle-même. Une telle mission pourrait avoir lieu dès 2035.

1. Énoncer les lois de Kepler.
2. Montrer que les planètes du système solaire décrivent des trajectoires planes dans le référentiel de Kepler.

Dans la suite du problème, on supposera que toutes les planètes évoluent dans un plan commun. On supposera aussi qu'elles tournent toutes dans le même sens autour du Soleil. On supposera enfin que la Terre décrit une trajectoire circulaire autour du Soleil.

3. Démontrer la troisième loi de Kepler dans le cas d'une trajectoire circulaire.
4. En utilisant l'extrait du *CNRS Le Journal*, proposer un encadrement de la distance de Mars au Soleil. En déduire le demi-grand axe a_M de l'ellipse correspondant à la trajectoire de Mars.
5. Sachant que la période de révolution de Mars est $T_M = 687$ jours, calculer la valeur de a_M . Cette valeur est-elle en accord avec les propos rapportés par l'extrait d'article précédent ?
6. Retrouver également une estimation de la masse du Soleil.

Pour la suite, on prendra $a_M = 228 \times 10^6$ km.

7. On donne la norme du champ de pesanteur sur Terre $g_T = 9,8 \text{ m s}^{-2}$. En supposant que les planètes ont une répartition de masse homogène à symétrie sphérique, déterminer la valeur du champ de pesanteur sur Mars. On négligera l'effet de la rotation propre des planètes.

I.2 Sauvetage de Mark Watney par le vaisseau Hermès

Cette opération consiste à envoyer Mark Watney dans l'espace, grâce à un VAM (Véhicule Ascensionnel Martien), et à l'intercepter depuis le vaisseau Hermès « en plein vol », comme représenté sur la figure 2. L'enjeu est donc que L'Hermès (figure 1) et Mark Watney se retrouvent au même endroit, au même moment avec une vitesse relative nulle.

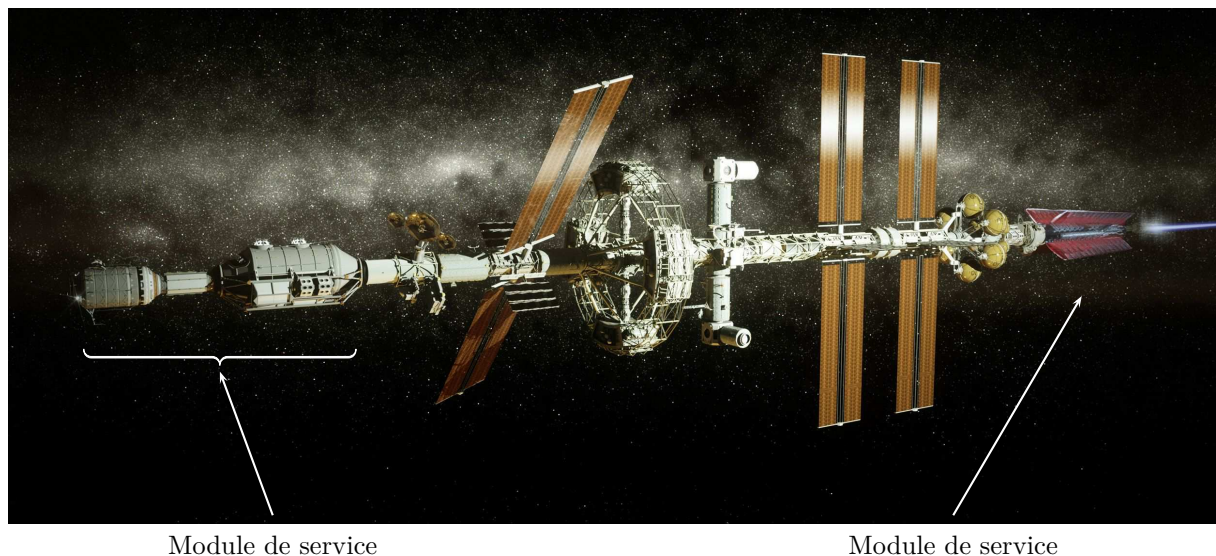


FIGURE 1 – Le vaisseau Hermès

Trajectoire du vaisseau Hermès

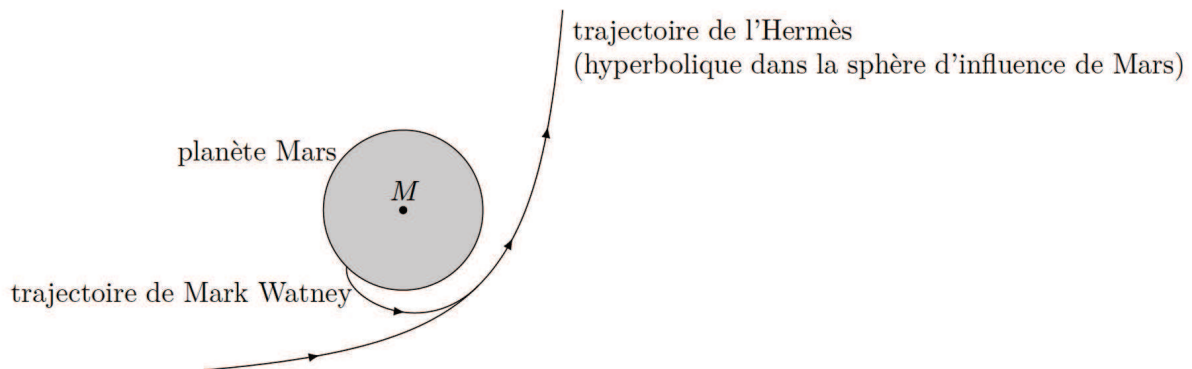


FIGURE 2 – Principe de la récupération de Mark Watney

Dans cette sous-partie, on se place dans le référentiel de Kepler. Le vaisseau Hermès est utilisé pour les trajets Terre-Mars au cours desquels le vaisseau n'est soumis qu'à l'attraction du Soleil. L'orbite de transfert utilisée est une orbite de transfert de Hohmann : ellipse dont le périhélie est un point de l'orbite de la Terre et l'aphélie un point de l'orbite de Mars (figure 3). On supposera dans cette sous-partie, pour simplifier, que les orbites de la Terre et de Mars sont circulaires de rayons respectifs a_T et a_M .

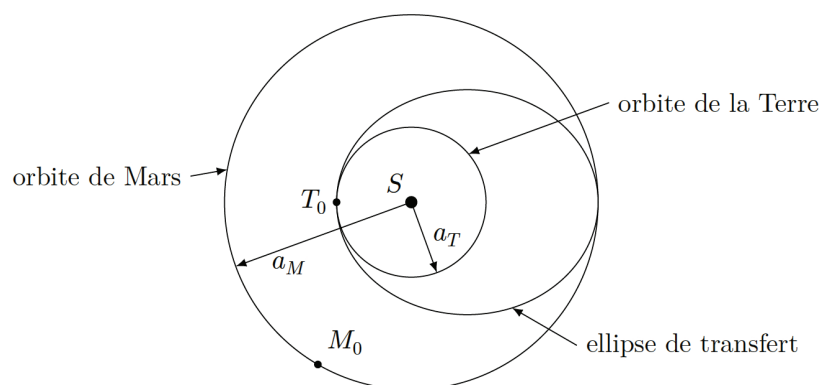


FIGURE 3 – Ellipse de transfert

8. Exprimer le demi grand axe a de l'ellipse de transfert. Faire l'application numérique.

On considère le transfert du vaisseau de la Terre vers la planète Mars, les positions initiales de la Terre et de Mars étant notées respectivement T_0 et M_0 .

9. Déterminer littéralement et numériquement la durée du transfert. En déduire la position de Mars au moment du lancement sur Terre (M_0). En déduire également la position de la Terre au moment de l'arrivée du vaisseau à proximité de Mars (les positions de la Terre et de Mars seront à ce moment là notées respectivement T_1 et M_1).
10. Montrer qu'un nouveau transfert, à partir de la Terre, ne peut avoir lieu qu'environ 780 jours après le premier lancement (période synodique).
11. Une fois le vaisseau arrivé au voisinage de la planète Mars (M_1, T_1), combien de temps faut-il attendre pour envisager un transfert d'Hohmann permettant de ramener le vaisseau à proximité de la Terre ? On notera T_2 et M_2 les positions respectives de la Terre et de Mars au début de ce second transfert.
12. Représenter les points T_0 , M_0 , T_1 , M_1 , T_2 et M_2 , ainsi que les orbites d'aller et de retour, sur un schéma reproduisant la figure 3.
13. En déduire qu'une mission aller-retour vers Mars dure au minimum 972 jours. Sachant qu'entre le départ de l'Hermès vers la Terre, suite à la tempête, et son retour sur Mars, il s'est écoulé 549 jours, commenter.

I.3 La récupération de Mark Watney

14. *BONUS 1* : au cours de l'opération de sauvetage, le vaisseau Hermès doit réduire brutalement sa vitesse de 30 m s^{-1} . Pour cela les astronautes ont l'idée de vider brutalement un ou des modules de l'Hermès de son air (modules de service sur la figure 1) et de profiter de la propulsion par réaction qui en découle pour freiner. On admet que la vitesse d'éjection des gaz est de l'ordre de 500 m s^{-1} (ordre de grandeur de la vitesse d'agitation thermique des molécules de l'air de la cabine). Estimer l'ordre de grandeur du volume total des différents modules à vider de façon à freiner correctement le vaisseau Hermès. Commenter.

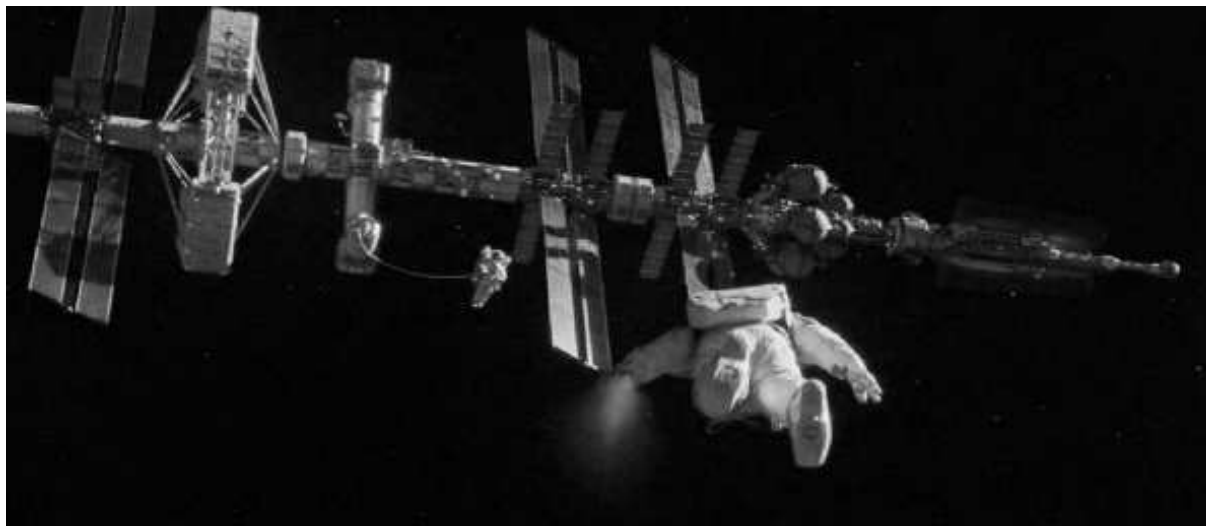


FIGURE 4 – Mark Watney se propulsant vers l'Hermès.

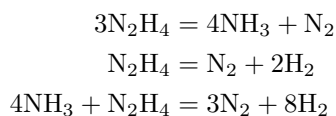
15. *BONUS 2* : au moment du sauvetage, Mark Watney s'aperçoit qu'il est encore trop loin de l'Hermès. Il décide alors de percer sa combinaison (trou de diamètre de l'ordre de 1 cm^2) pour se propulser. De quelle force de poussée dispose-t-il alors? Commenter votre résultat. Commenter également la photo (figure 4) représentant Mark Watney se propulsant vers l'Hermès.

I.5 Fabrication d'eau et culture sur Mars

Mark Watney est bien conscient que l'eau est l'une des clefs de sa survie sur Mars. Il n'en manque pas grâce à l'ingéniosité des procédés développés dans le domaine spatial mais il a besoin d'énormes quantités d'eau pour arroser ses plants de pomme de terre et assurer son alimentation en attendant l'aide hypothétique de la Terre. Heureusement, outre sa qualité de botaniste, il a des notions élémentaires de mécanique, de physique et de chimie.

Mark Watney estime avoir besoin de 600 L d'eau, qu'il décide d'obtenir par combustion de dihydrogène par le dioxygène. Il peut obtenir le dihydrogène par décomposition de l'hydrazine et le dioxygène par réduction du CO_2 en CO à haute température (800°C) selon la réaction $2\text{CO}_2 \rightarrow \text{O}_2 + 2\text{CO}$ en phase gazeuse.

L'hydrazine dont il souhaite tirer le dihydrogène avant de le *brûler* pour former l'eau est un carburant notamment utilisé dans la conquête spatiale. Les réactions chimiques de décomposition de l'hydrazine en molécules de N_2 et H_2 , en présence d'iridium comme catalyseur, sont les suivantes (en phase gazeuse) :



Une fois le problème de production de l'eau résolu, Mark Watney peut effectivement planter ses pommes de terres dans la terre martienne. Néanmoins, la mission Mars phoenix de la NASA a découvert en 2008 dans les sols martiens la présence de sels de perchlorate ($\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$, $\text{Ca}(\text{ClO}_4)_2$, KClO_4 , ...), susceptibles de se décomposer sous l'effet de températures élevées ou d'une exposition aux rayons ultra-violets solaires pour former des espèces chlorées capables

de dégrader les acides aminés (constituants élémentaires des protéines) rendant l'habitabilité de Mars plus difficile que prévu. En 2015, la NASA a découvert également que ces sels de perchlorate mélangés à l'eau forment des saumures qui demeurent liquides lors des étés martiens et ravinent les terrains.

Données :

- ★ nombre d'Avogadro : $N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$;
- ★ numéros atomiques : H : $Z = 1$, N : $Z = 7$, O : $Z = 8$, Cl : $Z = 17$, Ir : $Z = 77$
- ★ masses molaires : $M(\text{H}) = 1,01 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$, $M(\text{N}) = 14,01 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$, $M(\text{O}) = 16,00 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$, $M(\text{Cl}) = 35,45 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$, $M(\text{Ir}) = 192,22 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$

16. Donner, la configuration électronique des atomes d'azote N, oxygène O, chlore Cl et iridium Ir dans leur état fondamental. Préciser le nombre d'électrons de valence pour N, O et Cl.
17. À quelle famille chimique appartient le chlore ? Citer trois autres éléments de la même famille.
18. Les deux isotopes majeurs du chlore sont $^{35}_{17}\text{Cl}$ de masse molaire atomique $M_1 = 34,97 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ et $^{37}_{17}\text{Cl}$ de masse molaire atomique $M_2 = 36,97 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$. En déduire les abondances isotopiques respectives x_1 et x_2 de ces deux isotopes.
19. Proposer des formules de Lewis pour l'hydrazine N_2H_4 (présence d'une liaison entre les deux azotes), l'ammoniac NH_3 (N atome central), le diazote N_2 et les ions perchlorate ClO_4^- (Cl atome central).
20. Déterminer le volume d'hydrazine (densité 1,02) nécessaire pour obtenir les 600 L d'eau liquide voulus par Mark Watney.
21. La présence du catalyseur d'iridium modifie-t-elle l'état d'équilibre ?
22. L'iridium cristallise dans un réseau cubique à faces centrées compact avec une densité de 22,5. Représenter l'allure de cette maille cristalline. Estimer le rayon atomique de l'iridium.