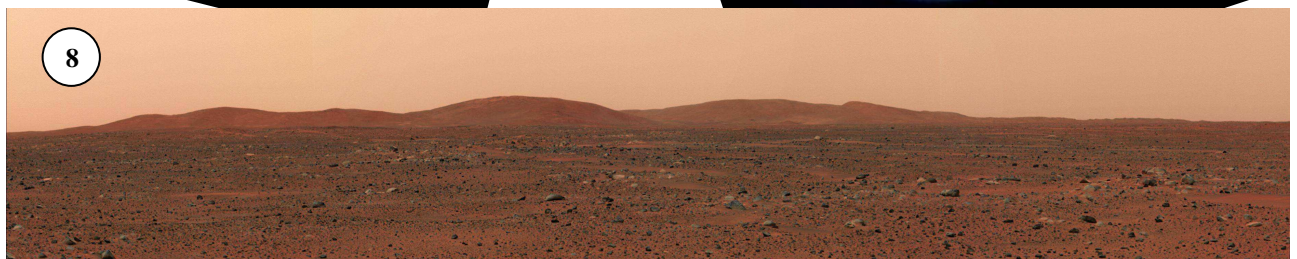
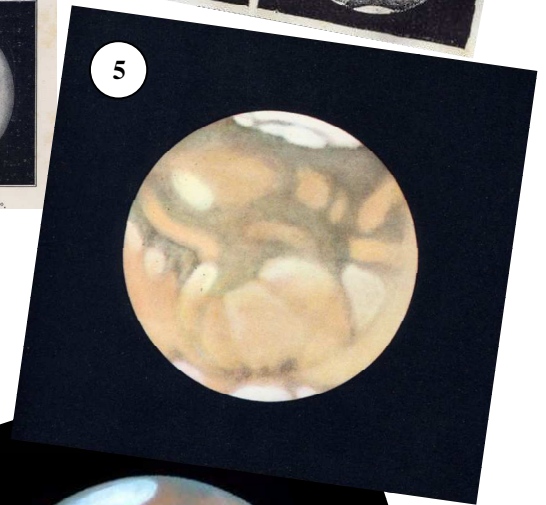
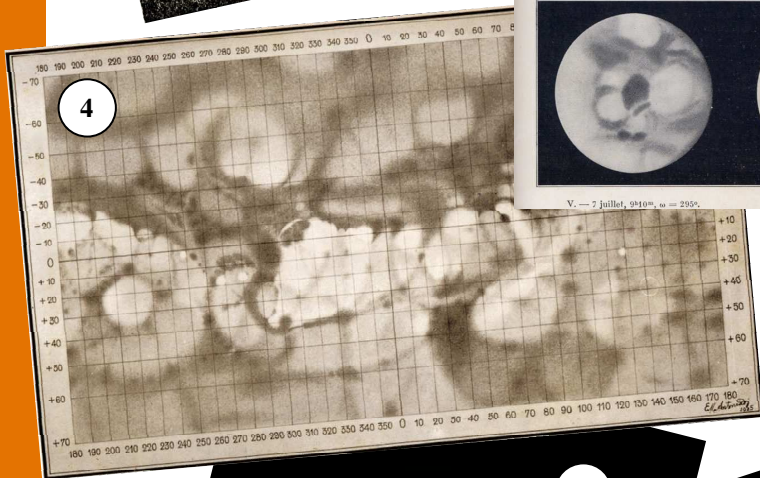
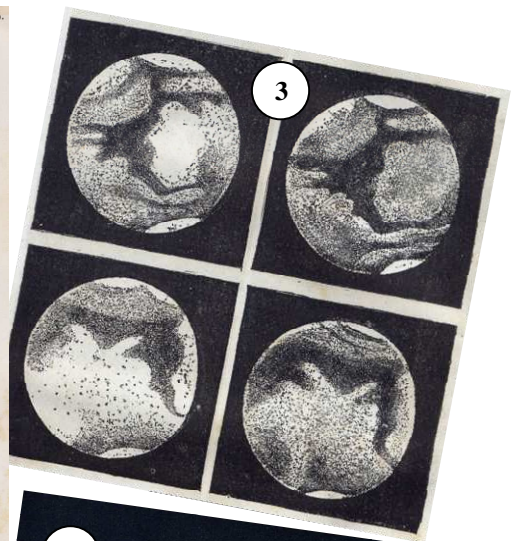
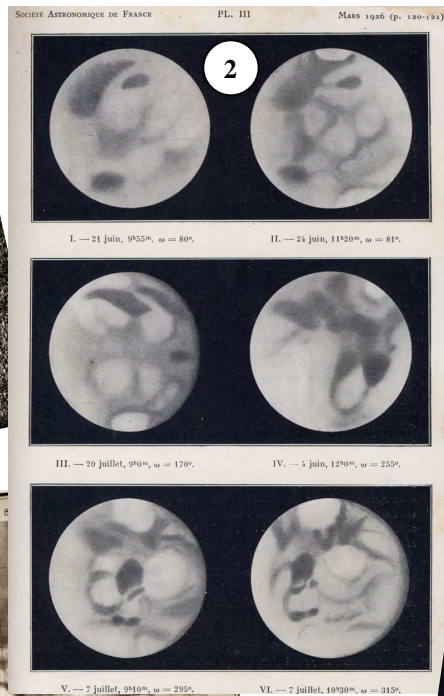
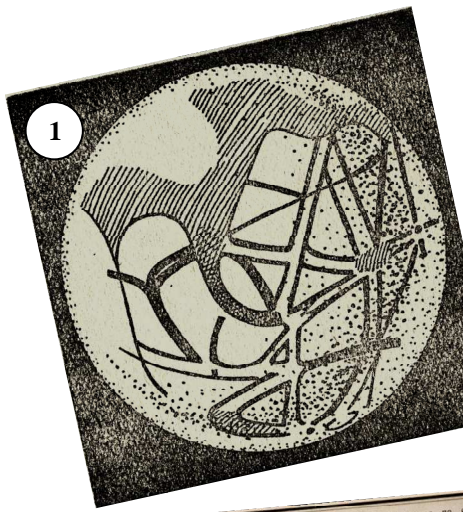


THÈME : MARS



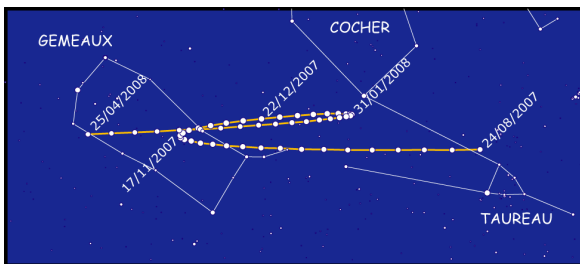
1. Mars vu par Schiaparelli 1879 ; 2. dessins de Mars par Danjon 1922 ; 3. Mars 1860 Flammarion Terres du Ciel ; 4. carte dressée à partir des observations d'Antoniadi de 1909 à 1924 et Millochou de 1898 à 1903 pour les hautes latitudes ; 5. Mars dans astronomie Vaucouleur 1948 ; 6. Mars prise par membre Société d'Astronomie de Bourgogne ; 7. Mars par Hubble (crédit NASA) ; 8. Mars par Spirit (crédit NASA).

Notions de base et repères historiques

Pierre Causeret, Esbarres

Mars et ses mouvements

Il n'est pas difficile de repérer la planète Mars quand elle est à son maximum de luminosité. Sa couleur rouge orangée est caractéristique et l'a fait associer au sang, au feu ou à la guerre. Elle a reçu de nombreux noms comme Angaraka en Inde (charbon ardent), Nirgal en Mésopotamie (le dieu de la mort), Arès, le dieu de la guerre pour les Grecs ou Mars pour les Romains...



La dernière rétrogradation de Mars 2007-2008. Sa position est notée tous les 5 jours

L'observation de Mars :

- Au cours des jours, on voit Mars se déplacer au milieu des étoiles, le plus souvent d'ouest en est mais parfois elle rétrograde d'est en ouest.
- C'est quand Mars et le Soleil sont à l'opposé l'un de l'autre que l'éclat de Mars est maximal et c'est le milieu de la rétrogradation.

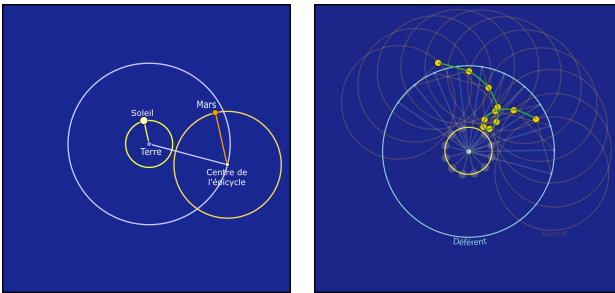


Figure de gauche : Le système des épicycles d'Apollonius. Le rayon joignant le centre de l'épicycle à Mars doit rester parallèle au rayon Terre - Soleil.

Figure de droite : en notant la position de Mars chaque mois, on observe bien une rétrogradation.

- Ces rétrogradations reviennent en moyenne tous les 780 jours et durent 73 jours.

Le premier modèle essayant d'expliquer et de prévoir ce mouvement fut celui des sphères d'Eudoxe. Vint ensuite le système des épicycles d'Apollonius repris par Hipparque et Ptolémée. Le principe est de faire tourner Mars sur un cercle (l'épicycle) dont le centre tourne autour de la Terre. Il s'agit donc d'un système géocentrique.

Ce modèle reproduit correctement les mouvements et les variations d'éclat de Mars à condition d'ajouter quelques épicycles. De plus, Ptolémée excentra la Terre et introduisit le "point équant".

En 1543, Copernic publie son livre "Des révolutions des orbes célestes". Le Soleil a pris la place centrale et la Terre tourne autour.

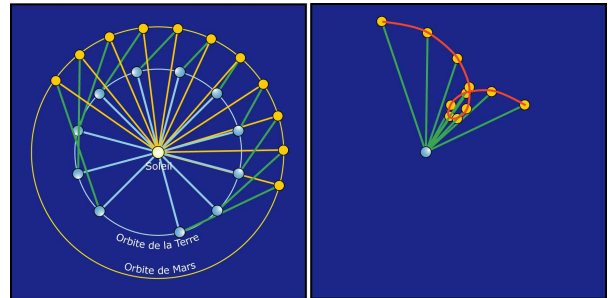


Figure de gauche : dans le système de Copernic, la Terre et Mars tournent autour du Soleil.

Figure de droite : on a reporté à partir d'un point fixe, la direction et la distance de Mars observé depuis la Terre. On obtient la même rétrogradation

Pour que son modèle reproduise correctement les positions de Mars, Copernic a été obligé d'ajouter des épicycles. Finalement, son modèle est relativement complexe et n'est pas meilleur pour les prédictions que celui de Ptolémée. Mais il a le mérite de mettre le Soleil au centre du monde comme l'avait d'ailleurs déjà proposé Aristarque, 18 siècles plus tôt.

En publiant ses deux premières lois, Kepler apporte une grande nouveauté : il remplace les trajectoires circulaires parcourues à vitesse constante par des trajectoires elliptiques parcourues à vitesse variable. Il rompt ainsi avec le dogme du cercle.

Pour trouver ces deux lois, Kepler a utilisé l'orbite de Mars qui est, par chance, l'une des plus aplaties. En 1672, la distance de Mars est mesurée par Richer, Cassini et Picard, on en déduit alors les autres distances dans le système solaire.

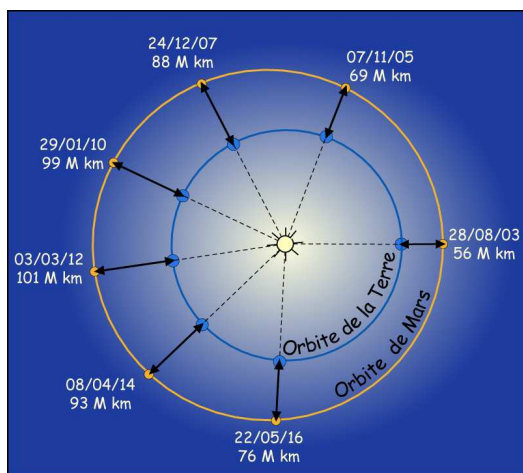
Il faut apporter quelques précisions pour comprendre la trajectoire apparente de Mars :

- Les plans des orbites de la Terre et de Mars forment un angle de $1,85^\circ$. C'est pour cette raison que la trajectoire apparente de Mars n'est pas rectiligne.

- Suivant les positions des deux plans, la trajectoire lors de la rétrogradation peut avoir la forme d'une boucle, d'un Z ou d'un S (voir CC 120).

- Si Mars passe à l'opposition lorsqu'elle est au plus près du Soleil (périhélie), la distance Terre Mars est réduite. C'est ce qui s'est passé en 2003.

Lors de l'opposition, la distance de Mars à la Terre peut varier de 56 à plus de 100 millions de km.



Les oppositions de la planète Mars de 2003 (opposition périhélique) à 2016.

La surface de Mars

Quand Galilée observe Mars en 1610, il ne voit aucun détail.

En 1659, Huygens signale une tache.

Sept ans plus tard, Cassini observe les calottes polaires et mesure la période de rotation en observant la "mer du sablier" (Syrtis Major). Il trouve 24 h et 40 min.

Le diamètre des instruments augmentant, on commence à faire des cartes de la surface de Mars mais elles ont parfois peu de points communs.

1877 : opposition périhélique de Mars. Schiaparelli, directeur de l'observatoire de Milan, fait des dessins de la surface de Mars, nomme différentes formations et remarque des bras de mers (canali en italien).



Fig. 9. — MARS VU PAR SCHIAPARELLI EN 1879

1877 : découverte de Phobos et Déimos, deux minuscules satellites de Mars.

1882 : le même Schiaparelli observe un dédoublement de certains canaux.

1894 : l'américain Percival Lowell fonde un observatoire à ses frais pour observer Mars. Il voit lui aussi des canaux qu'il explique comme étant

des bandes de végétation irriguée grâce aux canaux creusés par les Martiens.

1898 : publication de "la guerre des mondes", roman de H.G. Wells où les Martiens envahissent la Terre.

1907 : premières photos de la surface de Mars, peu nettes, qui montrent de vagues traînées sombres mais qui ne permettent pas de trancher sur la réalité des canaux.

1909 : Antoniadi, en observant à la grande lunette de Meudon, fait des cartes détaillées de la surface de Mars et montre que les canaux n'existent pas.

1938 : Orson Welles adapte la guerre des mondes à la radio et crée la panique chez certains auditeurs qui prennent son feuilleton pour un reportage réel.

Le débat fut vif entre canalistes et anticanalistes à la fin du XIX^e et au début du XX^e siècle. Il nous en est resté le terme de Martiens qu'on entend plus souvent que celui de Sélénites ou de Vénusiens.

Dans les années 1940, on ne croit plus aux canaux mais beaucoup pensent encore que Mars abrite de la vie au moins sous forme végétale. Il faut dire que l'on observe des variations saisonnières que l'on explique maintenant par le vent et les déplacements de poussières.

En 1965 commence l'ère des sondes spatiales avec les premières photos de la surface de Mars prises par Mariner 4. L'article de Cécile Ferrari dans les pages qui suivent vous donnera tous les détails sur cette exploration.

Mars dans les Cahiers Clairaut

Voici quelques articles anciens relatifs à Mars avec leur référence, notée CC pour Cahiers Clairaut suivi du n° de la revue et du n° de la page (comme dans le DVD) et HS pour le hors série suivi du n°.

Rétrogradation, mouvement apparent :

005-03, 030-13, 069-10, 070-02, 071-19, 074-11, 075-33, 077-30, 081-22, 110-16

Observation de Mars : 035-03

Activités avec des élèves : 067-15, 067-35, 095-XV (calcul distance de Mars), HS4 (modélisation système solaire), HS5 (Ptolémée et Copernic)

Géologie : 083-07, 084-02

Histoire, divers : 065-19, 110-14, 111-07, 112-09

Mars sur le site du CLEA

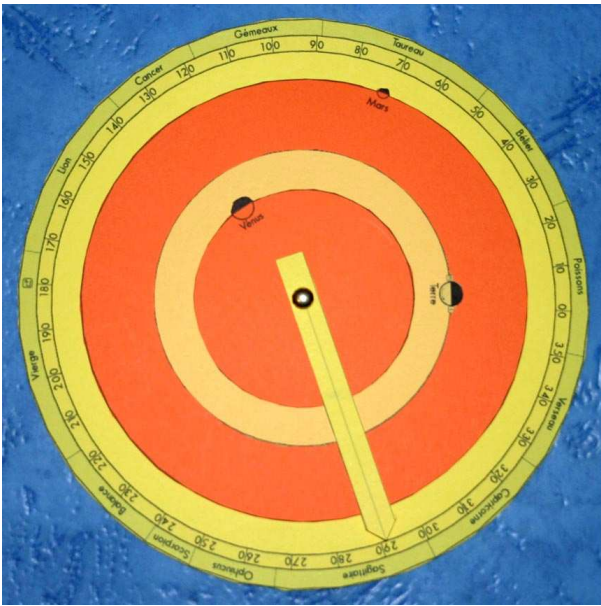
Vous disposez sur le site du CLEA de séries de photos des rétrogradations de 2005-2006 (par Jean Michel Vienney) et 2007-2008 (J-M Vienney en métropole et Michel Vignand, à la Réunion) accessibles depuis la rubrique "Dans vos classes".

Autres sites : S'il faut n'en citer qu'un seul, ce sera www.nirgal.net, tout sur Mars et son exploration.

Un planétaire pour trouver Mars

C'est une activité classique du CLEA qui demande une paire de ciseaux et une attache parisienne mais elle est toujours efficace et permet de mieux comprendre les mouvements des planètes. On peut utiliser un tel planétaire dès l'école primaire (il n'y a pas besoin de parler de degrés, la numérotation extérieure de 0 à 360 sert de repère) et jusqu'au lycée.

Pour la fabrication du planétaire, vous trouverez les fichiers à imprimer sur le site du CLEA à l'adresse www.ac-nice.fr/clea/SommCC127.html Sur ce planétaire, on a aussi placé Vénus.



Le planétaire terminé et réglé pour le 1/10/09

Description

- L'attache parisienne représente le Soleil.
- Vénus, la Terre et Mars tournent autour du Soleil dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.
- Sur la Terre, on a noté **m** pour matin et **s** pour soir.
- L'échelle des distances est de 1 cm pour 32 000 000 km soit 1/3 200 000 000 000. A cette même échelle, la Terre, Vénus et Mars devraient être des points minuscules. Ils sont dessinés ici plus gros pour être bien visibles. Quant aux étoiles, elles devraient être à plusieurs kilomètres ! On a quand même noté les constellations du zodiaque (le Lion, le Taureau...) sur le pourtour.

Réglage du planétaire

a. Placer Mars en trouvant dans le tableau sa longitude.

b. De la même manière, placer la Terre sans déplacer Mars. On peut s'aider de l'index.

c. Placer Vénus sans faire bouger ni Mars, ni la Terre.

Date	Mars	Terre	Vénus
01/09/2009	56	339	78
01/10/2009	72	8	126
01/11/2009	88	39	177
01/12/2009	102	69	225
01/01/2010	117	100	274
01/02/2010	131	132	323
01/03/2010	143	160	8
01/04/2010	157	191	57
01/05/2010	170	220	106
01/06/2010	183	250	156
01/07/2010	197	279	205
01/08/2010	211	309	254
01/09/2010	227	338	303
01/10/2010	242	8	351
01/11/2010	258	38	40
01/12/2010	275	69	88
On rajoute en moyenne chaque mois	16°	30°	49°

Longitude éclipstique héliocentrique des planètes

Un exemple de questionnaire

a) Régler le planétaire pour la date d'aujourd'hui (en suivant les instructions "réglage du planétaire").

b) Répondre par Oui ou Non en regardant le planétaire :

On observe le ciel depuis la Terre	Peut-on voir Mars ?	Peut-on voir Vénus ?
Le soir		
A minuit		
Le matin		

c) Devant quelle constellation doit-on voir Mars ?

d) Citer des constellations du zodiaque visibles le soir

e) Devant quelle constellation est le Soleil ?

On peut recommencer pour d'autres dates.

Ce planétaire permet aussi de savoir si Mars et Vénus présentent des phases, de chercher la date de l'opposition de Mars, des conjonctions inférieures ou supérieures de Vénus... ■

L'exploration de la planète Mars à l'aube du 3^e millénaire.

C. Ferrari, Professeure à l'Université Paris Diderot.

Le deuxième millénaire de l'ère chrétienne aura vu l'Homme s'extraire de l'attraction gravitationnelle de la Terre pour explorer le système solaire, placer des satellites artificiels autour des planètes et poser parfois des engins à leur surface. En ce troisième millénaire, l'exploration de la planète Mars entame une nouvelle ère d'observation systématique et détaillée pour en comprendre le climat et la géologie, y assurant une présence terrestre continue. Sondes en orbites ou robots en surface, à l'échelle globale ou locale, s'attachant en particulier à écrire l'histoire de l'eau et d'un éventuel développement de la vie et à préparer le retour d'échantillons martiens vers la Terre.

Le chemin de l'exploration spatiale habitée passe par la Lune et par Mars. Ces deux mondes focalisent depuis longtemps déjà les intérêts des nations, parfois comme une démonstration obligée de leur puissance technologique. Notre compréhension des conditions d'émergence de la vie sur Terre (et de sa survie !) passe aussi par une exploration poussée de la planète Mars, entre autres territoires, le plus proche et le moins hostile. Quelles sont les conditions qui rendent une planète habitable, comment changent-elles au cours des milliards d'années et quel impact cela a-t-il sur le maintien de la vie ? Y a-t-il (eu) de la vie sur Mars ? La planète serait-elle habitable, moyennant quelques aménagements ? Les programmes d'exploration martienne ont pour objectifs de déterminer si la vie a jamais apparu sur Mars, de caractériser le climat et la géologie de la planète pour se préparer à l'exploration humaine.

La route vers Mars est ouverte.

Depuis 1960, une quarantaine de sondes spatiales ont été lancées à destination de la planète rouge, plus de la moitié ont manqué leur but, jusqu'à tout récemment encore, témoignant de la difficulté de l'exploiter et de la volonté de la surpasser.

Après maintes tentatives, Mariner 4 a enfin ouvert la route en 1965 et survolé brièvement la planète avant de poursuivre son orbite autour du Soleil. Mariner 6 et 7 ont survolé en 1969 des zones cratérisées de l'hémisphère sud de la planète. Mariner 9 a été la première sonde mise en orbite autour de la planète en 1971. Elle a découvert le grand canyon de Valles Marineris

et différents canaux témoignant d'écoulements importants dans le passé, ce qui a ravivé l'intérêt de la question de la vie sur Mars. Les missions russes Mars 2, 3, 5, 6 et 7, leur ont succédé entre 1971 et 1973, avec parfois moins de succès. Mars 3 reste cependant le premier module à s'être posé à la surface de Mars, même si le contact a été perdu en moins d'une minute. Mars 5 a effectué les premières mesures d'inertie thermique du sol qui ont montré une nature variable du terrain, entre lits rocheux et vastes étendues poussiéreuses. Son spectromètre a mesuré les rayonnements gamma émis par les éléments radioactifs des roches (uranium, thorium et potassium) et constaté leur similitude avec les roches terrestres.

Les sondes Viking 1 et 2, qui sont les premiers modules à vraiment fonctionner à la surface de la planète, se sont posées à l'été 1976, respectivement dans Chryse Planitia et Utopia Planitia.

À bord, les expériences conçues pour chercher la présence de micro-organismes dans le sol ont donné des résultats négatifs. La planète est dès lors restée déserte de toute présence terrestre pendant plus de 17 ans, avec les échecs successifs des sondes russes Phobos en 1988 et de la sonde américaine Mars Observer en 1992, toutes perdues en route. C'est aussi l'époque de la grande épopée des sondes Voyager vers les planètes géantes du Système Solaire.

La mission Mars Global Surveyor (MGS) est partie en 1996 avec le plan de mission de la sonde Mars Observer perdue, c'est-à-dire la topographie globale du sol et le suivi météorolo-

gique de l'atmosphère. C'est la première sonde à avoir testé et réussi la mise en orbite lente par aérofreinage. Placée sur une orbite polaire, d'une durée de deux heures, elle a balayé la surface de Mars avec ses instruments. La carte altimétrique

complète de la planète réalisée par l'altimètre laser MOLA entre 1999 et 2001 constitue un des résultats majeurs de cette mission, atteignant une précision de l'ordre de 30 cm (figure 1).

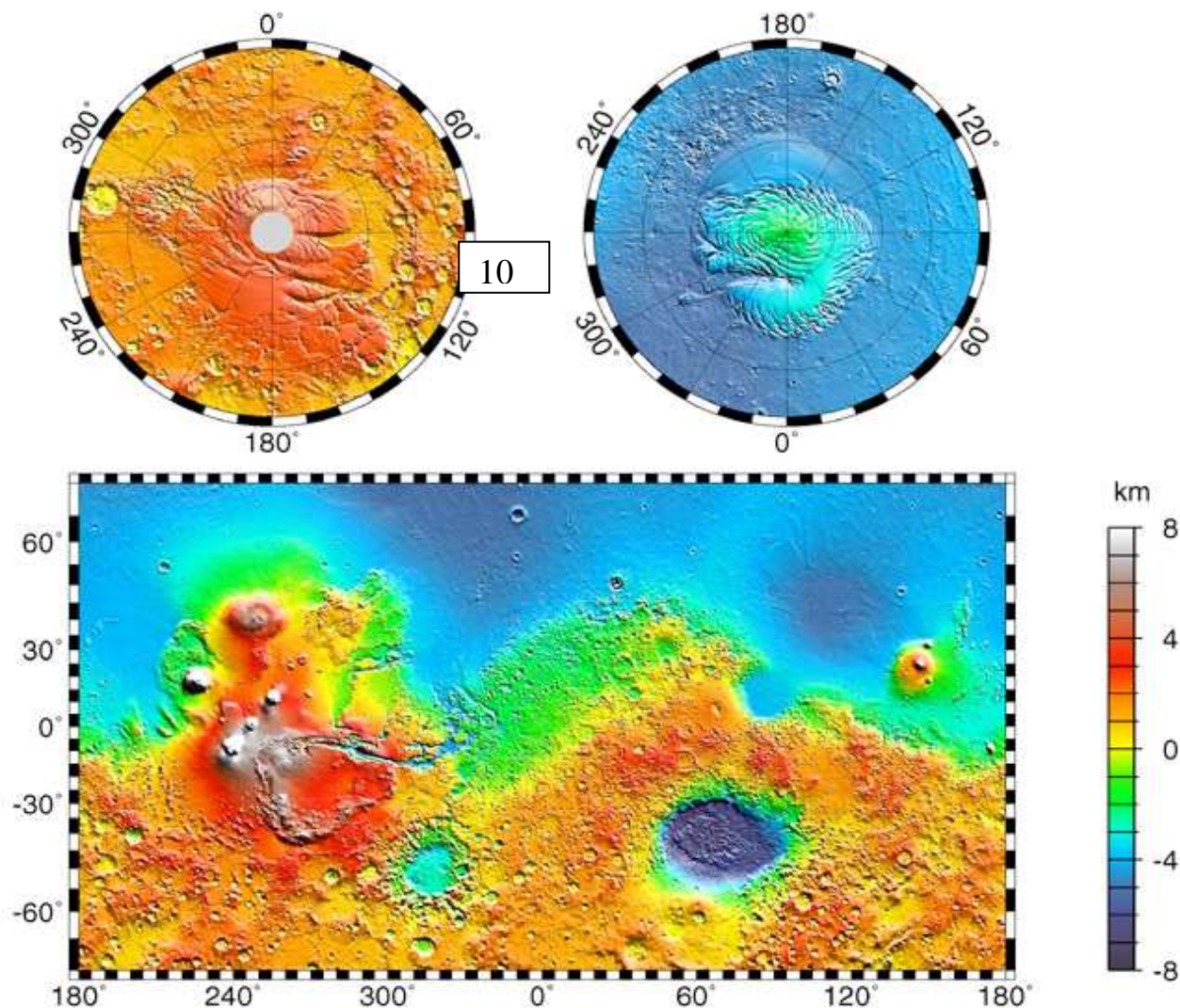


Fig. 1. MOLA-MGS (2001) - Carte altimétrique de la surface de Mars en projection de Mercator (bas) et stéréographique pour les pôles Sud (haut gauche) et Nord (haut, droite). Les variations de couleurs code l'échelle des altitudes entre - 8 km et 8 km par rapport à l'altitude moyenne. La dichotomie entre un hémisphère Nord, sans cratère, et l'hémisphère Sud, beaucoup plus élevé et fortement bombardé, est flagrante. On distingue la grande chaîne de volcan de Tharsis culminant à 8 km (240° - 300° de longitude), Valles Marineris à l'équateur entre 270° et 320° de longitude et l'énorme cratère d'impact Hellas dans l'hémisphère Sud à environ 70° de longitude. Sa profondeur est de 9 km et il fait 2 100 km de diamètre. L'essentiel du plateau qui l'entoure entre 0° et 150° de longitude proviendrait d'une couche d'épaisseur de 3,5 km environ éjectée du point d'impact. Chryse Planitia est l'estuaire de Valles Marineris situé à (330° - 50° N) dans l'hémisphère Nord. Utopia Planitia est la large dépression située à 45° N - 120° E. Crédit NASA.

Cette sonde aura fourni aussi la première carte globale de l'inertie thermique des différents terrains grâce à l'instrument TES (Spectromètre d'émission thermique), elle aura suivi les cycles des "dust devils", tornades de poussières formées dans les déserts, et aura découvert par milliers, des écoulements récents à l'affleurement des fa-

laises grâce à sa camera MOC (Mars Orbiter Camera). Ce phénomène révèle de manière indirecte la présence de glace d'eau souterraine (figure 2). Elle a cessé d'émettre en 2006. Mars Global Surveyor a ouvert une nouvelle ère d'exploration systématique de la planète.

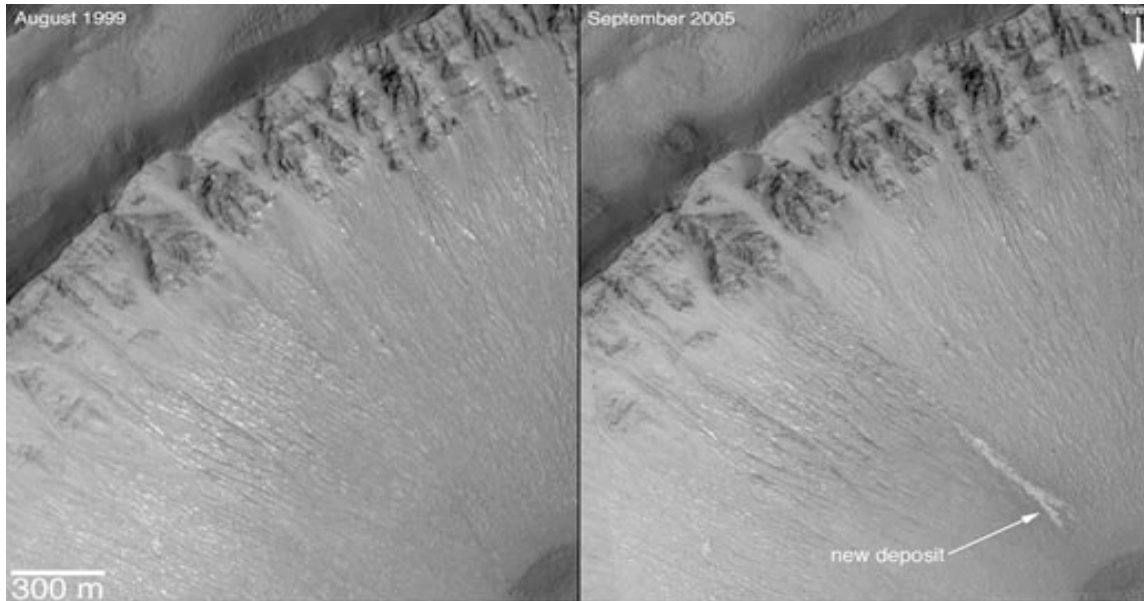


Fig. 2 - MGS-MOC (2005) - Nouveau dépôt résultant du déplacement des grains de sédiments par un fluide, très vraisemblablement de l'eau qui devient liquide à l'affleurement de la falaise en plein après-midi, heure à laquelle la sonde passe à la verticale du lieu. Il est apparu entre 1999 et 2005. Crédit Nasa.

En ce début de troisième millénaire, pas moins de trois sondes en orbite et deux robots en surface scrutent Mars : Mars Odyssey (USA, 2001-), Mars Express (EU, 2003-), Mars Reconnaissance Orbiter (USA, 2005-) et les deux "rovers" Spirit et Opportunity (USA, 2004-). Aujourd'hui, on roule sur Mars à la vitesse de 5 cm/s sur terrain dur. D'une altitude de 300 km environ, on détecte des détails à la surface de l'ordre du mètre. Un observateur situé à Toulouse pourrait ainsi observer les amateurs de pastis attablés à la fraîche sur le port de Marseille (si la Terre était plate!). Leurs innombrables découvertes sont difficiles à décrire en quelques pages. En voici, parmi les plus remarquables, qui nous permettent de reconstruire l'histoire de l'eau sur Mars.

L'histoire de l'eau sur Mars.

Grâce à des techniques stratigraphiques, on distingue dans l'histoire de Mars trois périodes-clé correspondant à trois types de terrains observés à sa surface : le *Noachien*, entre - 3,95 et - 3,7 milliards d'années (Ga), âge auquel des régions telle Noachis dans l'hémisphère Sud se sont solidifiées, à l'époque donc du bombardement massif tardif. En effet 0,7 Ga après la formation du Soleil (- 4,5 Ga), la migration des planètes géantes semble avoir déstabilisé le système solaire extérieur et la ceinture extérieure des astéroïdes, provoquant un taux d'impact important, encore inscrit sur les surfaces planétaires qui ont peu évolué depuis. L'*Hespérian*, situé entre - 3,7 Ga et - 3,0 Ga correspond au déclin du bombardement tardif et à

l'apparition des volcans, sur des terrains typiques de Hesperia Planum, à l'Est du cratère Hellas. Enfin, l'*Amazonien* (de Amazonia Planitia, à l'ouest de la région volcanique Tharsis) s'étale de - 3 Ga à nos jours. Cette région témoigne d'un âge plus récent de volcanisme très actif et d'érosion faible de la surface.

Suivant la théorie en cours, l'eau a été présente très tôt à la surface de Mars. D'où vient-elle ?

Apparemment des astéroïdes proches de Jupiter qui ont été projetés ici lors du bombardement tardif. Plus chargés en eau que les planétésimaux qui ont formé l'embryon planétaire martien, plus proches du Soleil et donc plus secs. Le flux d'astéroïdes prédit semble suffisant pour créer un océan martien de quelques kilomètres de profondeur qui aurait pu occuper l'hémisphère Nord de Mars.

Les images de Mariner 9 et des sondes Viking ont montré que les bords des cratères les plus vieux datant du *Noachien* avaient subi une érosion plus importante qu'ailleurs, due à une érosion par la pluie. Les grands canaux d'écoulement se trouvent pour l'essentiel sur ces anciens terrains. Les caméras de MGS et Mars Odyssey ont trouvé de larges estuaires, des dépôts sédimentaires et d'anciens lacs, tous témoignant de la présence de l'eau à cette époque-là.

LATE SOUTHERN SUMMER

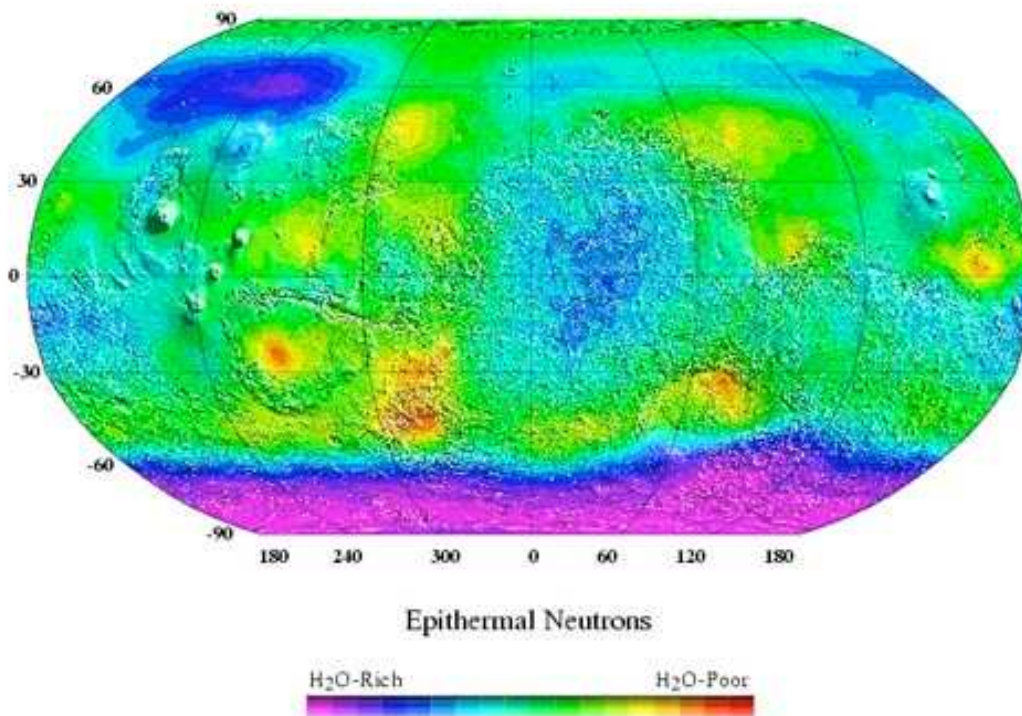


Fig. 3 - MO-GRS (2004) - Une carte de la surface de Mars donnant l'abondance de neutrons d'énergie comprise entre 0,4 et 0,7 eV (neutrons dits épithermiques). Ceux-ci sont beaucoup moins entre - 60° et - 90° de latitude Sud. C'est alors l'été dans l'hémisphère sud, la calotte polaire est plus ensoleillée. Durant l'été austral, le CO₂ se vaporise dans l'atmosphère et dégage ainsi les zones de forte densité de glace d'eau proches de la surface qu'on attend plus importantes dans les zones polaires les plus froides. Au nord, la glace d'eau est ensevelie sur plusieurs mètres de glace de CO₂, au coeur de l'hiver. Crédit NASA.

L'eau, maintenant, où est-elle ? Température et pression actuelles à la surface de Mars empêchent l'eau liquide d'exister de manière stable. L'eau, à l'origine des traces d'écoulement est sans doute gelée, en sous-surface. Cette cryosphère pourrait avoir une épaisseur de 2 à 7 km suivant la latitude. Cette hypothèse a été avancée dans les années 90, basées seulement sur l'aspect géologique de Mars. C'est le spectromètre détecteur de rayonnement gamma GRS (Spectromètre de rayons gamma) embarqué sur la sonde Mars Odyssey qui va donner en 2002 des informations directes sur la présence d'eau dans le premier mètre de profondeur. Les rayons cosmiques qui pénètrent jusque-là, interagissent avec les noyaux des éléments présents en produisant des neutrons d'énergie variable. Les rayons plus énergétiques (valeur supérieure à 0,4 eV) sont ralentis efficacement par l'hydrogène, condensé en premier lieu dans la molécule d'eau, avant d'émerger de la surface. En détectant, d'une région à l'autre le manque de ces neutrons émergeant de la surface, on détecte la présence d'eau (figure 3).

Les sondes Mars Express et Mars Reconnaissance Orbiter sont équipées de nouveaux instruments (des radars, appelés respectivement MARSIS et SHARAD) capables de sonder la surface sur quelques kilomètres d'épaisseur. Ils ont pour mission de cartographier la glace d'eau en sous-sol en analysant l'écho radar réfléchi à l'interface entre les strates de composition chimique ou d'états de phase différents. Ils peuvent ainsi distinguer les échos venant d'un dépôt de poussière, d'une couche d'eau glacée ou liquide. L'écho est mesuré avec des antennes dipolaires longilignes dont le champ de vue équivaut à une coupe longiligne de la surface. Un radargramme présente une image qui donne en ordonnée le temps de retour de l'écho radar (donc la profondeur) et en abscisse la distance le long de la coupe radar. Ces instruments apportent donc la troisième dimension dans l'exploration de Mars et montrent la présence de glace d'eau sur des épaisseurs importantes dans le sous-sol de Mars (figure 4).

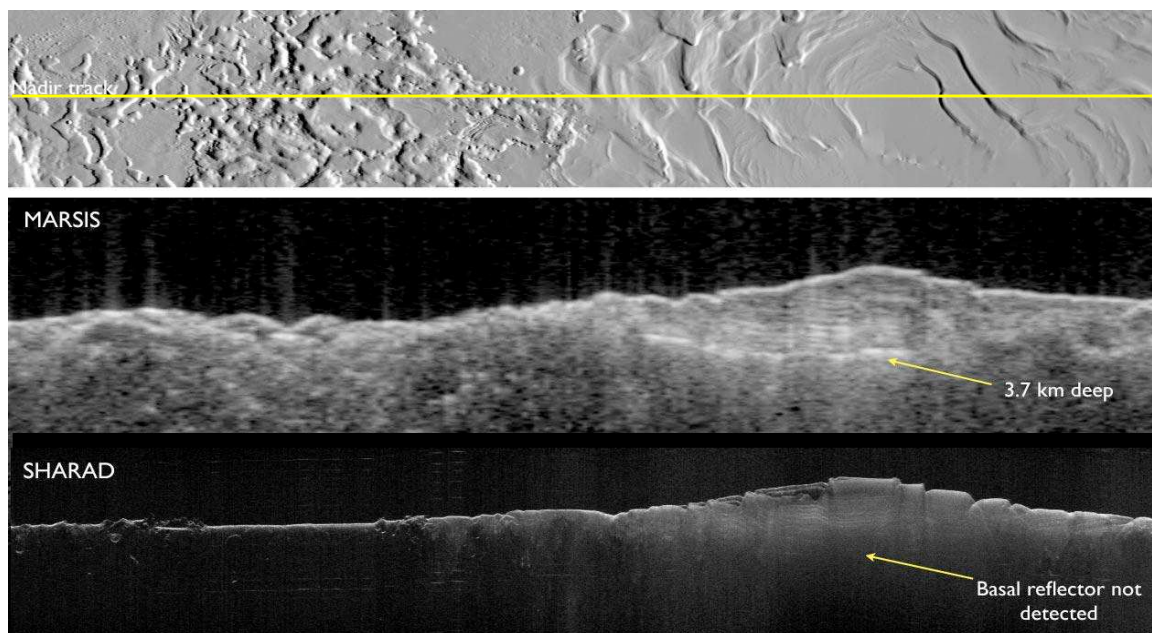


Fig. 4 - Mars Express-MARSIS/MRO-SHARAD (2008) – *En haut*, image du pôle Nord de Mars avec la calotte polaire bien visible sur la droite. La coupe en profondeur faite par les deux mesures radar est repérée (trait jaune). *Au centre*, radargramme de MARSIS suivant la coupe désignée donnant une image des différentes strates empilées sous le pôle Nord. Un écho est reçu d'une couche située à 3,7 km de profondeur. Il indique la base de la calotte glaciaire. Les fines strates visibles entre le sommet le plus proéminent et cette couche sont des strates de matériau plus réfléchissant, sans doute de la poussière déposée au cours de variations climatiques à l'échelle de millions d'années. Les strates plus sombres qui les séparent sont constituées de glace d'eau. *En bas*, radargramme de SHARAD pour la même région. Ce radar donne une image plus détaillée mais pénètre moins profondément et n'a donc pas détecté la base de la calotte.

L'eau a été présente dans un passé lointain sous forme liquide. On la trouve maintenant sous forme solide. Est-elle restée assez longtemps liquide pour que la vie apparaisse ? Ce sont les dépôts de minéraux qui n'ont pu se former qu'en présence d'eau sur de grandes périodes de temps qui peuvent nous le dire. Il faut donc regarder leur composition le long des lignes de côtes d'océans anciens, ou au fond des lacs anciens. Le spectromètre proche infrarouge OMEGA embarqué sur la sonde Mars Express a détecté des minéraux hydratés dans les régions les plus anciennes, les phyllosilicates, sur des terrains apparemment longtemps cachés sous des dépôts plus jeunes et maintenant découverts. Très tôt dans l'époque hespérienne, l'atmosphère semble s'être amincie et la température avoir diminué, les nouveaux terrains témoignant de conditions anhydres.

Phyllosilicates : du grec "phyllo" "feuille" Les phyllosilicates, appelés aussi *silicates lamellaires*, sont construits par empilement de feuillets tétraédriques dont trois sommets sur quatre sont partagés, le quatrième sommet est relié à un feuillet octaédrique. L'ensemble des tétraèdres et des octaèdres forme des feuillets qui permettent le clivage des phyllosilicates. (micas, argiles).

La route sur Mars est ouverte.

Les rovers-robots Spirit et Opportunity explorent la surface de Mars depuis 2004 et nous envoient des paysages tels que nous les verrions si nous y étions. Ils nous rendent la planète familière. Opportunity (figure 5) a été bâti pour gravir et descendre les pentes des cratères.

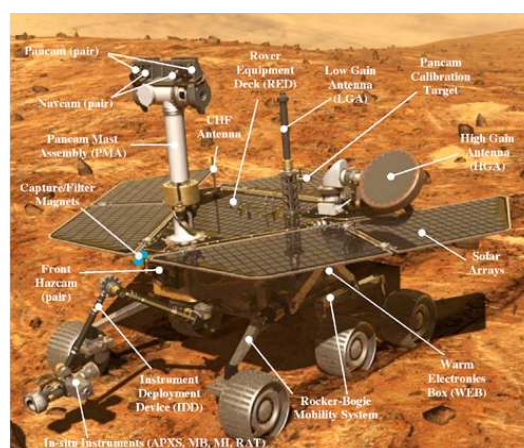


Fig. 5 Opportunity (vue d'artiste)

Spirit a fait de l'handicap d'une roue cassée une chance. Sa roue traînante a mis en évidence des dépôts jaune-blanchâtre, du soufre ou des sels, impliquant la présence d'eau chaude à un moment

donné de l'histoire martienne. Opportunity a aussi découvert dans les différents cratères visités des dépôts de sulfates impliquant la présence d'eau chaude. En route vers le cratère Endeavour, il a fourni un splendide panorama de 360° où l'on aperçoit un lit rocheux riches en sulfates. Phoenix (figure 6) enfin a été largué le 25 mai 2008 à 68°

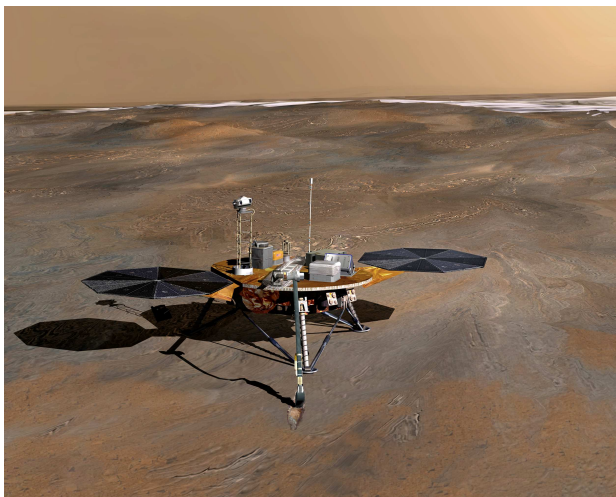


Fig. 6. Phoenix (vue d'artiste)

de latitude Nord, 234° de longitude est, près du cratère Heimdall, à la recherche de l'eau et de son histoire pour étudier l'habitabilité potentielle des régions arctiques. Il est équipé pour analyser la composition du sol à la recherche d'éléments chimiques structurant la vie comme d'atomes de C, N, P et H. Ces premières pelletées ont permis de détecter de la glace d'eau effleurant la surface (figure 7).

A l'horizon 2020-2025, l'exploration in-situ devrait prendre de l'ampleur avec la quête d'échantillons du sol et de l'atmosphère et leur



Fig. 7. Phoenix (2008). Glace d'eau mise à jour sous quelques centimètres de poussières le 20 Octobre 2008 alors que la température du jour est de - 46° et la nuit de - 89° - Crédit NASA.

renvoi sur Terre à des fins d'analyse chimique plus poussée que celles faites in situ. La séparation de composés ou une analyse plus adaptée en fonction des découvertes est alors possible. Un autre laboratoire ambulant à la recherche de traces de vie (Astrobiology Field Laboratory) est aussi proposé qui emporterait des instruments capables d'identifier les composés chimiques essentiels pour la vie, composés organiques, soufre, azote, etc. Un robot-foreur capable d'atteindre quelques centaines de mètres de profondeur est aussi à l'étude.

Mars Science Laboratory : Il a failli partir en 2009, il partira en 2011. Il s'agit du super robot de la NASA, Mars Science Laboratory (MSL : 600 kg dont 65 kg d'instruments scientifiques). Son énergie sera fournie par des générateurs au plutonium et portera la traditionnelle caméra stéréo couleur, une caméra microscopique, un spectromètre alpha rayons X, une caméra de descente sophistiquée, un spectromètre à ablation laser capable de vaporiser, grâce à un rayon laser, la surface des roches et du sol dans un rayon de 10 mètres, un détecteur à neutrons, une station météorologique, un capteur ultraviolet (c'est une première), Mais je me suis laissé emporter par l'enthousiasme. Ce n'est pas de lui que je voulais vous parler, mais de sa maquette.

Impliqué dans la mission, un chercheur du Centre d'Études Spatiales du Rayonnement (Toulouse) souhaitait faire réaliser une petite maquette par des élèves de lycée. Après une rencontre avec l'IPR de STI, c'est une maquette à l'échelle 1 et mobile qui fut réalisée. Ce qui est extraordinaire, c'est que ceci fut possible par la mise en réseau de 13 lycées de l'académie de Toulouse. Le CNES a soutenu financièrement le projet. Les étudiants de BTS de ces lycées ont ainsi réalisé un engin qui est motorisé et télépiloté ; il identifie la position d'une roche à analyser par faisceau laser ; l'image de l'environnement est obtenue par 2 caméras, l'image 3D extraite est renvoyée à l'équipement de pilotage. Cette maquette fut présentée pour la première fois au salon du Bourget en juin dernier (nous espérons bien l'avoir à Cahors pour une Fête de la Science).

Quelle magnifique aventure pour ces étudiants et enseignants !!!

Pour en savoir plus : http://orbitmars.futura-sciences.com/mars_actu/print.php?id_news=317
http://msc.cnes.fr/MSL/Fr/A_proj_etud.htm

(liens sur le site CLEA)

Jean Ripert

Les aurores martiennes

Jean Lilensten,⁽¹⁾ François Leblanc⁽²⁾ et Olivier Witasse⁽³⁾

Les aurores polaires sur Terre sont dues aux interactions de l'atmosphère avec les particules du vent solaire qui sont piégées dans le champ magnétique terrestre (aurores boréales et australes). Mars ne possède pas de champ magnétique dipolaire. Mais alors ...

Le Soleil est une étoile, c'est-à-dire un astre qui produit son énergie grâce à la fusion thermonucléaire. Il émet un rayonnement électromagnétique dont la lumière visible est la partie la plus familière et perd une partie de sa masse via un flux permanent d'électrons et d'ions. Cette expulsion a été nommée "vent solaire" par Parker, en 1959. Au niveau de la Terre, il est composé en moyenne de 5 ions et de 5 électrons par centimètre cube, et sa vitesse moyenne est de 370 km/s.

De façon sporadique, avec des périodicités allant de la dizaine d'années à quelques heures, le Soleil est le siège de phénomènes éruptifs. Ces éruptions peuvent prendre naissance près de sa surface ou dans sa haute atmosphère, sa "couronne". Dans ce dernier cas, on parle d'éjection de masse coronale. La matière ainsi libérée voyage dans l'espace interplanétaire, et rencontre éventuellement une planète. Si la planète possède une atmosphère, de nombreuses interactions ont alors lieu : chauffage et transformations physiques ou chimiques le plus souvent à haute altitude (au dessus de 900 km sur Titan, de 90 km sur Terre, de 100 km sur Vénus etc.). Si, de surcroît, la planète possède un champ magnétique, des phénomènes supplémentaires apparaissent. Les particules électrisées qui engendrent un courant électrique sensible au champ magnétique, sont conduites au gré d'un parcours compliqué, à se déposer dans l'atmosphère. Avec un axe magnétique comme ceux de la Terre, Jupiter ou Saturne, grossièrement perpendiculaires au plan de l'écliptique, ce dépôt se produit sur deux couronnes centrées autour des pôles magnétiques nord et sud. En Europe, cet "ovale auroral" surmonte la Laponie. Comme pour de la pluie ou de la neige, on parle de précipitations pour les particules précipitées qui, rapides, heurtent la haute atmosphère. Cette dernière s'excite de diverses manières (vibrationnelle, rotationnelle, électronique etc.), s'ionise, puis rend éventuellement l'énergie reçue sous forme de lumière : ce sont les aurores polaires, boréales au nord et australes au sud.



Simulation de phénomènes auroraux grâce à "la planeterella" mise au point par J. Lilensten. Crédit photo : C. Simon ESTEC/LPG

Lorsque les planètes ont un champ fortement incliné par rapport à l'écliptique, des ovales auroraux existent probablement, mais une partie du vent solaire s'engouffre directement le long des lignes de champ ouvertes sur l'espace pour créer une tache aurorale au pôle magnétique côté jour. Pour Vénus, qui n'a pas de champ magnétique, le vent solaire s'engouffre directement dans la haute atmosphère et crée des intensifications du rayonnement par excitation collisionnelle. Mais il s'agit là d'un phénomène différent de celui des aurores polaires terrestres.

Puisque la présence d'un champ magnétique est nécessaire à la formation d'aurores, il n'était pas envisagé que Mars puisse être le siège de phénomènes auroraux jusqu'à ce que ...

En novembre 1996, après presque deux décennies d'échecs, la NASA et le Jet Propulsion Laboratory (États-Unis) envoient la sonde Mars Global Surveyor vers la planète rouge. Parmi les expériences à bord, se trouve le magnétomètre MER (magnétomètre /réflectomètre à électrons). Grâce à ce qui avait d'abord paru un problème d'aérofreinage, cette sonde a pu effectuer des mesures à une altitude plus basse que celle initialement prévue, et en particulier en dessous de l'ionosphère martienne. Le 15 septembre 1998, les données de MER ont permis de mettre en évidence la présence claire d'un champ magnétique intense dans certaines régions de la planète. Ces observations témoignent que Mars a eu, probablement dans le premier milliard d'années de son existence, un champ magnétique interne dipolaire, comparable à celui de la Terre. En effet, là où le sol est ferro ou para-

¹Laboratoire de Planétologie de Grenoble,

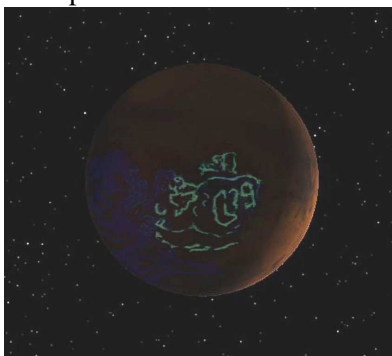
²Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales - CNRS/IPSL, actuellement à Osservatorio Astronomico di Trieste, Italy

³Agence Spatiale Européenne - ESTEC, RSSD, Noordwijk, Hollande

magnétique, l'aimantation est restée forte après l'extinction du champ dipolaire. Ces champs magnétiques rémanents sont appelés, de façon un peu étrange, des "anomalies magnétiques". Elles n'ont bien sûr rien d'anormal !

Mars se retrouve donc dotée à la fois d'une atmosphère ténue, et d'un champ magnétique local. On se doute bien que des aurores pourraient s'y produire. Son atmosphère est constituée essentiellement de monoxyde et de dioxyde de carbone, qui rayonnent surtout dans l'ultraviolet lorsqu'ils sont excités par le Soleil. Il y a bien, à haute altitude, un peu d'oxygène atomique, dont les rayonnements rouge et vert sont bien connus dans les aurores terrestres. Cependant, un tel rayonnement visible n'a jamais été observé sur Mars, ce qui conduit à penser qu'il n'y a pas d'aurore martienne.

A quelques années de là, en juin 2003, l'Agence Spatiale Européenne envoie Mars Express, construit avec une rapidité record après l'échec de la sonde européenne Mars 96. A bord, l'instrument SPICAM (Spectroscopy for the Investigation of the Characteristics of the Atmosphere of Mars) est un spectromètre de facture française qui observe le rayonnement de l'atmosphère dans l'ultraviolet. La sonde est faite de telle sorte que pour utiliser SPICAM, il faut orienter le satellite selon un pointage qui rend difficile l'utilisation d'autres instruments. Pour les programmeurs de la mission, il s'ensuit un jeu subtil de recherche du meilleur compromis entre les objectifs scientifiques de chacun des instruments et des possibilités d'observation offertes durant chaque orbite de Mars Express. Il faut donc quelques mois pour SPICAM avant de pouvoir effectuer ses premières observations du côté nuit de la planète. Lors d'une de ces premières observations, SPICAM découvre tout d'abord l'émission de la haute atmosphère nocturne martienne essentiellement similaire aux émissions de la nuit de Vénus. Puis, quelques semaines plus tard, SPICAM observe au dessus des anomalies magnétiques une émission ponctuelle et spectralement très différente de l'émission de la haute atmosphère nocturne martienne. L'équipe de



*Carte des aurores martiennes réalisée par Fr Leblanc et ses collaborateurs.
Crédit photo : ESO-CNRS*

SPICAM identifie immédiatement en particulier des raies d'émission du monoxyde de carbone, les bandes de Cameron, entre 180 et 240 nm et une raie intense de l'ion dioxyde de carbone à 289,7 nm.

Ces raies d'émission sont typiquement observées du côté jour de Mars mais sont inattendues du côté nuit. Autre surprise, la zone d'émission, à une altitude de 130 kilomètres, mesure seulement 30 kilomètres de large et se situe très exactement au dessus d'une des régions de champ magnétique rémanent les plus intenses identifiées par Mars Global Surveyor.

Le responsable de SPICAM, J.L. Bertaux du Service d'Aéronomie, se doute qu'il s'agit d'un phénomène auroral, c'est-à-dire une émission produite par la précipitation de particules énergétiques dans la haute atmosphère martienne. Il souhaite, avant de publier, une confirmation théorique. Mais il existe très peu de modèles informatiques capables de calculer les rayonnements auroraux. Par chance, l'un d'entre eux a été développé en France. Il a été longtemps utilisé pour décrire les aurores terrestres, et justement, un jeune doctorant du Laboratoire de Planétologie de Grenoble vient de l'adapter au cas martien. Le calcul montre que toutes les intensifications du rayonnement se modélisent bien en tenant compte d'électrons du vent solaire avec des énergies typiques de quelques centaines d'électron volts. La découverte ne fait plus de doute, et sort dans le journal Nature en 2005 : Mars entre dans la famille des planètes aurorales !

Bibliographie :

- Bertaux, J.L., F. Leblanc, O. Witasse, E. Quemerais, J. Lilensten, S. A. Stern, B. Sandel and O. Korabely, Discovery of Aurora on Mars, *Nature*, **435**, p 790-794, 2005, doi 10.1038
- Leblanc F., Chaufray J.Y, Lilensten J., Witasse O. and Bertaux J.-L., The Martian dayglow as seen by SPICAM UV spectrometer on Mars Express, *J. Geophys. Res.*, **111**, No. E9, E09S11, 10.1029/2005JE002664, 2006
- Leblanc, F., O. Witasse, J. Winningham, D. Brain, J. Lilensten, P.-L. Blelly, R. A. Frahm, J. S. Halekas, and J. L. Bertaux, Origins of the Martian aurora observed by Spectroscopy for Investigation of Characteristics of the Atmosphere of Mars (SPICAM) on board Mars Express, *J. Geophys. Res.*, **111**, A09313, doi:10.1029/2006JA011763., 2006
- Leblanc F, Witasse O., Lilensten J., R. A. Frahm, Ali Safaenili, D. A. Brain, J. Mouginot, H. Nilsson, Y. Futaana, J. Halekas, M. Holmström, J.L., Observations of aurorae by SPICAM UVS on board Mars Express: simultaneous ASPERA-3 and MARSIS measurements, *J. Geoph. Res.*, **113**, A08311, DOI 10.1029/2008JA013033, 2008
- Jean Lilensten, Mathieu Barthélémy, Cyril Simon, Philippe Jeanjacquot, La Planeterrella, une expérience pédagogique en planétologie et physique des plasmas, *Bull. Un. Phys.*, **102**, 799-816, 2008

www-lpg.obs.ujf-grenoble.fr/Planeterrella-du-nouveau

AVEC NOS ÉLÈVES

Voyage interplanétaire : application à une mission martienne

Gilles Bouteville, Chamalières

Comment aller sur Mars ? La ligne droite est rarement le plus court chemin en astronomie. Vous pourrez découvrir ici la méthode la plus simple et la plus économique en énergie, l'orbite de transfert de Hohmann. Et la réalisation d'une maquette vous aidera à la mieux comprendre.

Principes généraux

Les différentes étapes

Un voyage interplanétaire classique comporte trois étapes :

Étape 1 : quitter la planète c'est-à-dire échapper à son attraction. Il s'agit de quitter la sphère d'influence de la Terre. On considère que celle-ci est petite comparée à la distance de Mars. On néglige alors le chemin parcouru dans cette phase de départ et le temps de vol.

Étape 2 : utiliser l'attraction principale du Soleil, pour rejoindre le voisinage de la planète cible, Mars en l'occurrence. C'est cette étape qui nous intéresse ici. Nous nous placerons dans un repère héliocentrique écliptique, la seule force attractive étant celle du Soleil.

Étape 3 : manœuvrer pour se faire capturer par la planète visée et travailler en orbite autour d'elle ou se poser sur le sol.

Éventuellement, il faut prévoir de repartir, de revenir vers la Terre et de se poser.

La trajectoire de Hohmann

Pour simplifier, nous supposons que les orbites de Mars et de la Terre sont circulaires et contenues dans le même plan, le plan de l'écliptique. Le rayon de l'orbite est de 150 000 000 km ou 1 unité astronomique (UA) pour la Terre et de 1,52 UA pour Mars ou 228 000 000 km. La période de révolution est de 1 an pour la Terre et de 1,88 an ou 687 jours pour Mars. Le Soleil étant le seul attracteur, la trajectoire du vaisseau spatial sera une ellipse, une hyperbole ou éventuellement une parabole.

Walter Hohmann, architecte allemand, a effectué les premiers calculs détaillés de trajectoires reliant deux planètes, à partir de ces hypothèses simplificatrices. Il pose très simplement les bases d'un voyage interplanétaire. La trajectoire est une ellipse dont le périhélie P (point le plus proche du

Soleil) est sur l'orbite de la Terre et l'aphélie A (point le plus éloigné du soleil) sur celle de Mars. L'orbite est donc tangente aux deux orbites des planètes. C'est la manière la plus économique en énergie pour se rendre d'une planète à une autre.

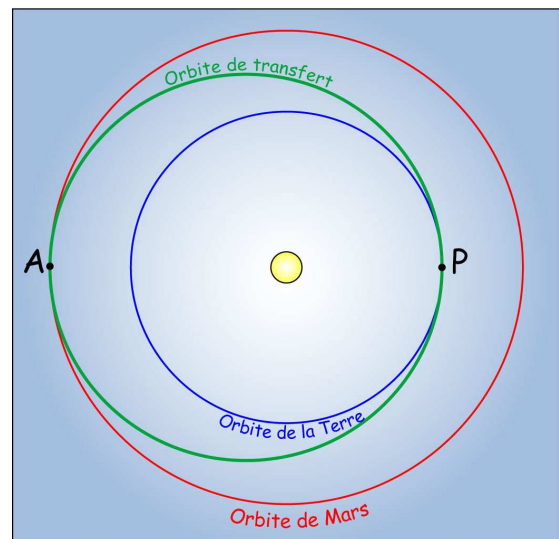


Fig. 1. Trajectoire de transfert de type Hohmann

La période T pour parcourir cette ellipse se calcule simplement avec la troisième loi de Kepler (voir encadré 1). On trouve 1,42 an pour une révolution complète, la durée du voyage aller sur Mars est donc de la moitié, 0,71 an soit environ 259 jours ou 8,5 mois.

Encadré 1. Calcul du temps de voyage

La troisième loi de Kepler s'écrit $T^2 / a^3 = 1$ si T est en années et a en unités astronomiques.

Le grand axe de l'ellipse est :

$$PA = PS + SA = 1 + 1,523691 = 2,523691 \text{ UA}$$

Le demi grand axe vaut donc : $a = 2,523691/2$ soit 1,261845 UA ou 188 770 000 km.

$$T^2 / a^3 = 1 \text{ donc } T^2 = a^3 \quad T^2 = 1,261845^3 = 2,00918 \text{ et } T = 1,417454 \text{ ans ou } 518 \text{ jours.}$$

T est le temps aller et retour.

Le seul aller sur Mars est moitié moindre, 0,70873 an, soit environ 259 jours ou 8,5 mois.

Encadré 2. Calcul des caractéristiques de l'ellipse
 Grand axe PA = PS + SA = 1 + 1,524 = 2,524 UA ou 377 500 000 km
 Demi grand axe : a = 1,262 UA ou 188 800 000 km
 Distance du centre de l'ellipse au foyer :
 c = OS = 1,262 - 1 = 0,262 UA ou 39 200 000 km
 Excentricité : e = c/a = 0,21
 Si on appelle b le demi grand axe, la relation $a^2 + b^2 = c^2$
 donne b = 1.234 UA ou 184 700 000 km

Instant du tir

La figure 1 donne la position de la Terre au moment du départ (P) et la position de Mars à l'arrivée (A).

Mais où doit être Mars au jour du lancement ?

Mars accomplit une orbite complète de 360° en 1,88 an. Par conséquent, avec l'hypothèse d'une orbite circulaire et uniforme (approximation moins précise pour Mars que pour la Terre), en 0,71 an, le temps du voyage, il parcourt 136° .

Calcul : $360^\circ \times (0,71 / 1,88) \approx 136^\circ$

Nous lançons donc notre vaisseau quand Mars est sur son orbite à 136° du point A (rendez vous avec la planète). On peut alors calculer la position relative de la Terre et de Mars au rapport au Soleil.

$180^\circ - 136^\circ = 44^\circ$. Ainsi, les lancements ne sont possibles que lorsque la Terre est située 44° en arrière de la planète Mars, soit 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°).

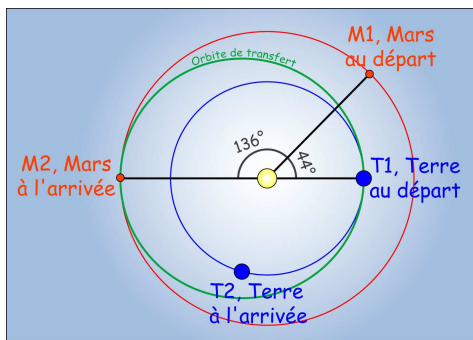


Fig.2. Voyage aller. Positions de la Terre et de Mars au départ du vaisseau depuis la Terre (instant 1) et à son arrivée sur Mars (instant 2).

Périodes de tir

Un nouveau tir ne peut avoir lieu que si l'angle T_1SM_1 retrouve sa valeur de 44° (ce qui n'implique pas que les planètes soient au même endroit que lors du tir précédent). La période de répétitivité (période synodique) est de 780 jours pour Mars soit 2 ans et 50 jours. On peut la calculer avec la formule :

$$T_{\text{synod}} = T_M \cdot T_T / (T_M - T_T) \text{ où } T_M \text{ et } T_T \text{ sont les périodes sidérales de Mars et de la Terre.}$$

Dates de tir favorables : 26/11/1994, 30/12/1996, 01/02/1999, 09/03/2001, 26/04/2003, 08/07/2005, 23/09/2007, 11/11/2009 (la Terre est alors située 44° en arrière de Mars d'après les éphémérides).
 Entre deux périodes consécutives, on a en moyenne 780 jours.

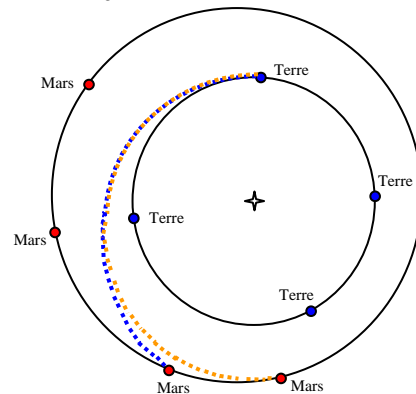


Fig. 3. Mars Global Surveyor (pointillés orange) et Mars Pathfinder (pointillés bleus) ont suivi des trajectoires voisines de l'orbite de Hohmann. Elles ont quitté la Terre en novembre et décembre 1996 (dates proches du 30/12/96 indiqué ci-dessus). Mars Pathfinder est parti en dernier mais est arrivé en premier après un voyage de 7 mois alors que MGS a mis 10 mois (au lieu de la durée calculée de 8,5 mois pour l'orbite de Hohmann).

Vitesses

Au départ, tous les corps sur Terre, objets, animaux, hommes, etc., se déplacent autour du Soleil comme la Terre elle-même, à une vitesse d'environ 29,8 km/s. Pour que le vaisseau parcoure une ellipse plus grande, sa vitesse au niveau de la Terre doit être supérieure à 29,8 km/s.

Avec la deuxième loi de Kepler, on peut calculer la vitesse du vaisseau au départ en T1 pour qu'il suive l'orbite de Hohmann (voir encadré). On obtient 32,7 km/s. Cela montre qu'il faut une poussée supplémentaire correspondant à une augmentation de vitesse de 2,9 km/s,

A l'arrivée, le vaisseau atteint l'orbite de Mars avec une vitesse de 21,5 km/s. La vitesse de Mars sur son orbite, en la supposant constante (l'orbite de Mars est supposée circulaire) est de 24,1 km/s. Nous constatons que Mars se déplace plus rapidement et rattrape le vaisseau spatial. Pour coordonner sa vitesse avec celle de Mars, le vaisseau spatial doit produire une poussée supplémentaire correspondant à une augmentation de vitesse de 2,6 km/s. La différence de vitesse du vaisseau entre son départ de la Terre et son arrivée sur Mars est due à une perte d'énergie cinétique (pour lutter contre l'attraction du Soleil) au profit de l'énergie potentielle.

Encadré 3. Calculs de vitesse

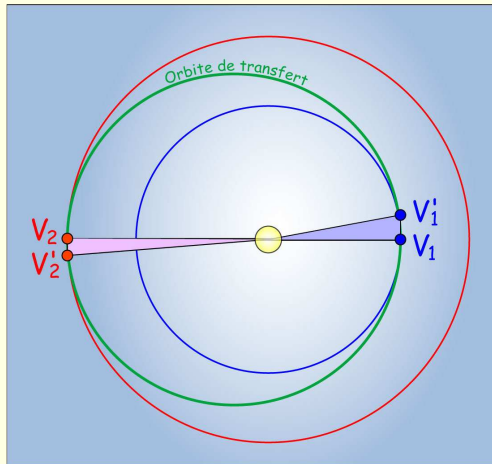


Fig.4. Vitesses du vaisseau

V_1 : position du vaisseau au départ de la Terre.
 V'_1 : une seconde après.
 V_2 : le vaisseau 1 s avant l'arrivée sur Mars.
 V'_2 : à l'arrivée sur Mars

La deuxième loi de Kepler appelée aussi loi des aires dit que les aires balayées par le rayon SV en des temps égaux sont égales.

L'aire de l'ellipse est égale à πab soit

$$\pi \times 188\,800\,000 \times 184\,700\,000 \text{ ou } 1,951 \times 10^{19} \text{ km}^2$$

Cette aire est balayée en 518 j ou 44 732 000 s.

Aire balayée par seconde : $1,951 \times 10^{19} / 44\,732\,000$
 soit 2 448 000 000 km²/s

Au départ, le vaisseau passe de V_1 à V'_1 en 1 s.

On considère que $(V_1 V'_1)$ est perpendiculaire à (SV_1) (car on est au périhélie).

L'aire du triangle $SV_1V'_1$ est égale $SV_1 \times V_1V'_1 / 2$.

On sait que $SV_1 = 149\,600\,000$ km.

On doit donc avoir :

$$149\,600\,000 \times V_1V'_1 / 2 = 2\,448\,000\,000$$

On en déduit $V_1V'_1$ qui vaut 32,7 km. La vitesse du vaisseau au départ doit donc être de 32,7 km/s.

On fait un calcul analogue pour l'arrivée sur Mars avec une distance de 227 900 000 km et on obtient 21,5 km/s.

On peut aussi calculer les vitesses à partir de l'énergie du vaisseau (potentielle et cinétique).

Le retour

Le vaisseau arrive sur Mars 259 jours (0,70873 an) après son départ, pendant ce temps la Terre a parcouru 255° ($0,70873 \times 360^\circ$). Elle se trouve dans la position T2 de la figure 2 (75° au-delà de la position de Mars).

Supposons que le vaisseau spatial débarqué sur Mars soit un robot collectant un échantillon et qu'il redécolle immédiatement pour son voyage de retour. Il peut de nouveau suivre l'ellipse de transfert de Hohmann, après s'être libéré de la pesanteur de la planète. Après 259 jours, il arrive de nouveau au niveau de l'orbite terrestre. Mais la

Terre n'est pas au rendez-vous, ayant parcouru à nouveau 255° !

Pour que la rencontre ait lieu, il faut que la Terre soit, au départ du vol de retour, 255° en arrière du point de rencontre. Cela la place à 75° derrière la position de Mars.

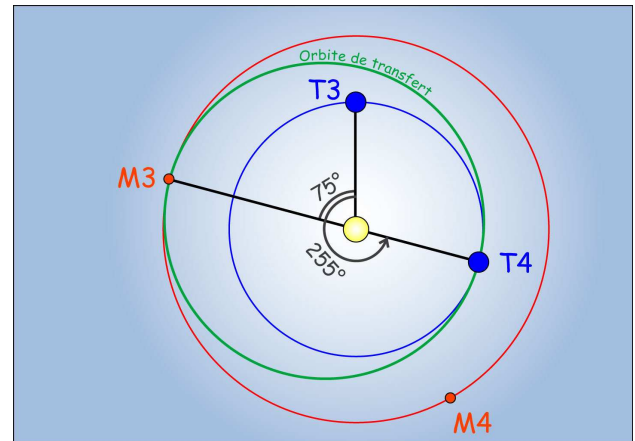


Fig.5. Voyage retour. Positions de la Terre et de Mars au départ du vaisseau depuis Mars (instant 3) et à son arrivée sur la Terre (instant 4).

Calculons le temps nécessaire pour retrouver cette configuration planétaire.

À l'arrivée du vaisseau sur Mars, la Terre avait 75° d'avance sur la planète rouge (T2 et M2 sur la fig. 2). Quand le vaisseau décolle de Mars, la Terre doit avoir 75° de retard (T3 et M3 de la fig 5).

La vitesse angulaire de la Terre autour du Soleil est de $0,986^\circ/\text{jour}$ ($360/365,26$), celle de Mars est de $0,524^\circ/\text{j}$ ($360/687$). Donc la Terre rattrape Mars à raison de $0,462^\circ/\text{j}$. Pour passer de 75° d'avance à 75° de retard, elle doit avancer de 210° par rapport à Mars ($360 - 2 \times 75$), ce qu'elle fera en 454 jours ($210/0,462$) soit environ 15 mois.

Au total la mission aura duré 8,5 mois pour l'aller et autant pour le retour, et 15 mois sur place soit 32 mois.

Les vraies missions

Les missions sur Mars partent toujours autour des dates favorables calculées pour l'orbite de Hohmann mais elles peuvent suivre des trajectoires un peu plus courtes ou un peu plus longues. Mars Pathfinder par exemple n'a mis que 7 mois pour faire le voyage (fig.3). Pour cela, il suffit de rattraper Mars plus tôt. L'inconvénient, c'est qu'il faut aller plus vite donc dépenser davantage de carburant pour accélérer.

Quant à un voyage avec retour, cela ne s'est encore pas produit.

La maquette

Elle permet de trouver sans aucun calcul les fenêtres de tir vers Mars, la durée de la mission et la date du retour.

Objectifs

- Faire prendre conscience qu'il existe des configurations planétaires particulières permettant le voyage interplanétaire.
- Utiliser la maquette pour poser le problème.
- Montrer qu'il faut anticiper une situation, pour résoudre le problème.

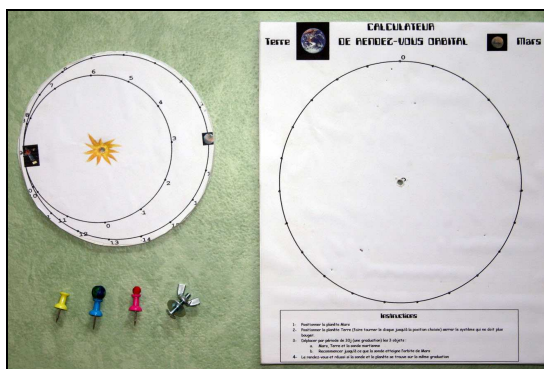
Hypothèses simplificatrices

- L'année terrienne est ramenée à 360 jours pour 360° soit 12 mois de 30 jours.
- L'année martienne est de 690 jours ou 23 mois de 30 jours.
- Le trajet Terre-Mars dure 270 jours soit 9 mois.
- Les deux orbites (Mars et Terre) sont circulaires et centrées sur le Soleil.

Réalisation

Matériel nécessaire :

- Un disque de fond "orbite de Mars" portant 23 graduations constitue le support collé sur un support (carton plume épais par exemple).
- Un disque mobile portant la "trajectoire de la Terre" (12 graduations) et celle du vaisseau (18 graduations) collé lui aussi sur un support (type carton plume).
- Une vis (les deux disques sont mobiles autour d'un axe passant par le Soleil).
- 3 objets pour matérialiser la Terre, Mars et le vaisseau comme de grosses punaises.



Les différentes pièces constituant la maquette

Prise en main

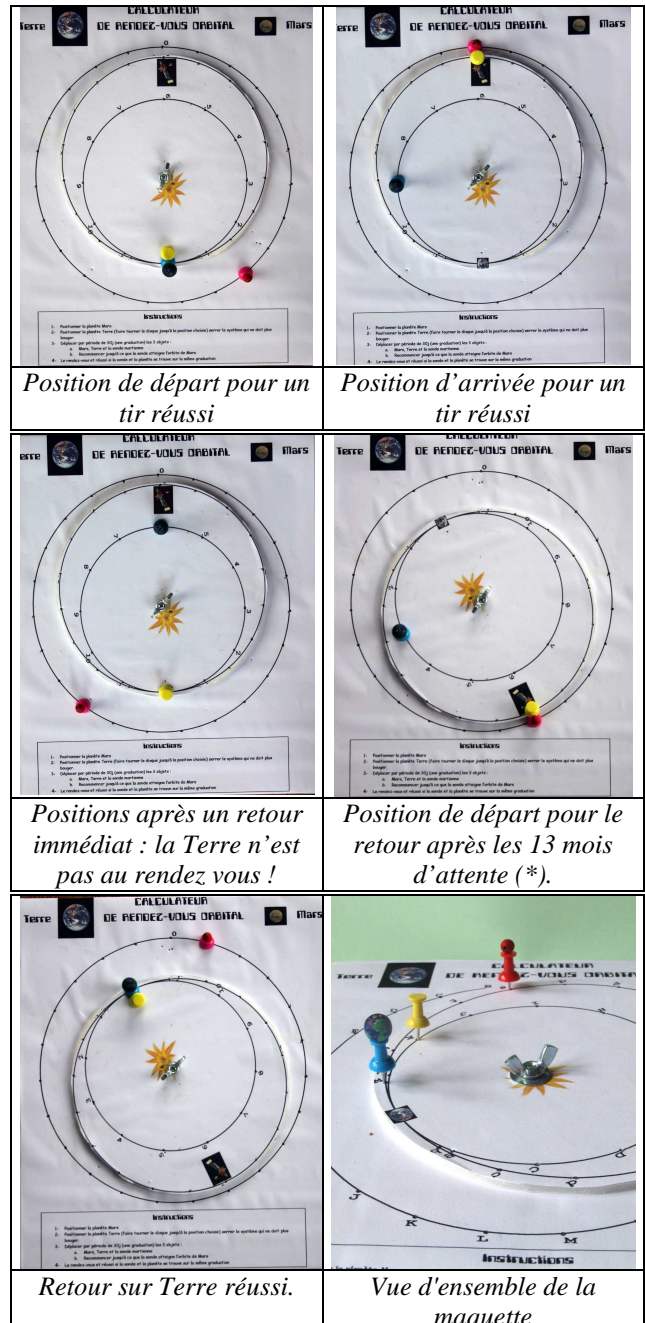
- Il est conseillé de commencer par quelques essais en positionnant par exemple les planètes à la date du jour (on pourra s'aider des coordonnées page 9)
- On positionne la Terre, Mars et le vaisseau.
 - On fait évoluer les 3 objets sur 9 mois (ou 8,5 mois pour une meilleure approximation).
 - On observe la réussite ou non de la mission.

Recherche

Voici quatre problèmes que l'on peut étudier avec la maquette :

- Déterminer les configurations planétaires pour la réussite de la mission.
- Montrer que le retour direct n'est pas possible.
- Déterminer le temps d'attente (mission planétaire).
- Effectuer le retour.

Voici les réponses en images :



(*) Avec les valeurs simplifiées, on trouve un temps d'attente d'environ 13 mois au lieu de 15. Les plans de cette maquette sont sur le site CLEA www.ac-nice.fr/clea/SommCC127.html

AVEC NOS ÉLÈVES

Construire l'orbite de Mars à la manière de Kepler avec un logiciel de géométrie

Michel Cauchois, Saint Genest Lerpt

Dans le numéro 117 des Cahiers Clairaut, Blaise Simon nous a expliqué comment Kepler a été amené à étudier la trajectoire de la Terre autour du Soleil afin de pouvoir ensuite étudier celle de Mars avec précision. Dans le numéro suivant, Béatrice Sandré a recherché, en utilisant les méthodes de Kepler et avec des valeurs récentes de l'IMCCE, les équations des orbites de la Terre et de Mars. Suivons leurs pas et essayons comme Kepler de tracer l'orbite de Mars ou du moins la projection de celle-ci sur l'écliptique.

Pour ce faire nous utiliserons GeoGebra, logiciel libre de géométrie dynamique qui, depuis sa version 3.2, possède un module tableur. On peut adapter la démarche à d'autres logiciels de géométrie dynamique comme Géoplan par exemple. Vous trouverez les fichiers GeoGebra sur le site du CLEA, ils permettent de suivre la construction à différentes étapes.

Cette activité est accessible à des lycéens même si les notions de vecteur et de rotation ne sont plus abordées au collège

L'orbite de la Terre

Principe

Nous supposons ici comme Kepler que l'orbite de la Terre est un cercle excentré (c'est une très bonne approximation, l'erreur sur la position de la Terre est de l'ordre du diamètre de la Terre).

Le rayon r du cercle est CA ou CP . L'excentricité est égale à CS/r .

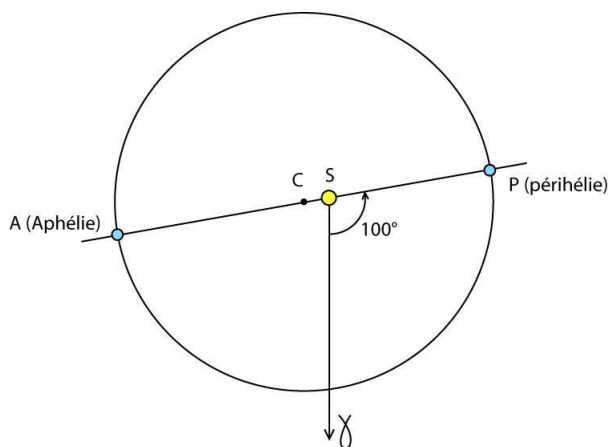


Fig. 1. L'orbite de la Terre est un cercle excentré.

Données initiales

Nous prendrons les données de Kepler rappelées par Blaise Simon : excentricité 0,01653, longitude du périhélie $\omega = 100^\circ 19'$ ou $100,32^\circ$.

Construction dans Geogebra

Dans GeoGebra on place le point S, en (0 ; 0), la direction du point vernal, origine des longitudes écliptiques héliocentriques et géocentriques, sera donnée par le vecteur $\vec{\gamma}$ de coordonnées (0 ; -1). On saisit ensuite les deux valeurs initiales $e = 0,01653$ et $\omega = 100^\circ + 19'/60$ (attention à ne pas oublier les degrés dans les données angulaires) ainsi que a , le rayon de l'orbite terrestre, défini comme un curseur pouvant varier de 1 cm à 10 cm (ce qui permet de faire varier l'échelle du tracé).

Le centre C du cercle cT de l'orbite terrestre se trouve sur la demi-droite d'origine S et passant par l'aphélie, cette demi-droite fait donc avec le vecteur $\vec{\gamma}$ un angle de $\alpha = 180^\circ + \omega = 280,32^\circ$.

La construction de cette demi-droite permettra ensuite de créer un outil appelé DdOVA construisant une demi-droite dont on connaît l'origine et qui fait avec un vecteur donné un angle fixé.

Finalisons la construction du point C comme le point d'intersection entre la demi-droite définie précédemment et le cercle de centre S et de rayon $e \times a$. Pour les habitués de GeoGebra :

$C = \text{Intersection}[\text{DdOVA}[S, \gamma, 180^\circ + \omega], \text{Cercle}[S, e \cdot a]]$

On construit enfin le cercle cT de centre C et de rayon a (on peut masquer le point C).

L'orbite de Mars

Principe

Kepler a trouvé dans les mesures de Tycho Brahé quatorze couples de dates séparées de 687 jours, période de révolution de la planète. Pour un couple de dates données, Mars a la même position par rapport au Soleil mais la Terre s'est déplacée. De ce fait, la même position de Mars est vue depuis deux positions de la Terre dans deux directions différentes ; pour ce couple de dates, Mars est donc à l'intersection de ces deux directions.

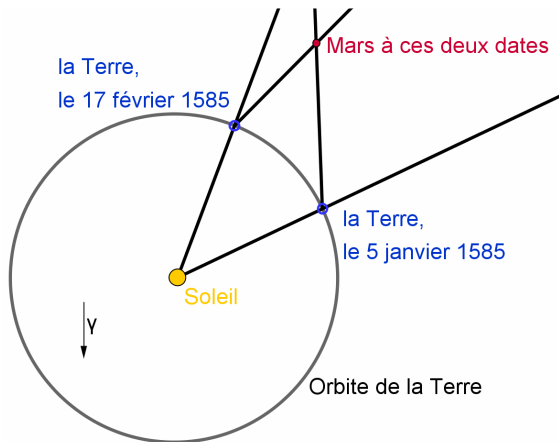


Fig. 2. Principe pour trouver une position de Mars.

Les données

- Colonne 1** : couples de dates distantes de 687 j.
- Colonne 2** : longitude écliptique héliocentrique de la planète Terre.
- Colonne 3** : longitude écliptique géocentrique de la planète Mars.

	Colonne 1	Colonne 2	Colonne 3
1.1	17 février 1585	159,38°	135,20°
1.2	5 janvier 1587	115,35°	182,13°
2.1	19 septembre 1591	5,78°	284,30°
2.2	6 août 1593	323,43°	346,93°
3.1	7 décembre 1593	85,88°	3,07°
3.2	25 octobre 1595	41,7°	49,70°
4.1	28 mars 1587	196,83°	168,20°
4.2	12 février 1589	153,70°	218,80°
5.1	10 mars 1585	179,68°	131,80°
5.2	26 janvier 1587	136,10°	184,70°

La construction dans Geogebra

On travaillera avec cinq couples de données, GeoGebra permettant de tracer une conique passant par cinq points.

Il faut intégrer le tableau précédent dans le tableur de GeoGebra, ce qui permettra ensuite de saisir les mesures de chaque angle par le numéro de la cellule qui le contient par exemple C2 pour 159,38°.

On note T11 la position 1.1 de la Terre le 17 février 1585, c'est le point d'intersection du cercle cT et de la demi-droite d'origine S faisant avec le vecteur $\vec{\gamma}$

un angle $C2 = 159,38^\circ$, soit :

$T11 = \text{Intersection}[\text{DdOVA}[S, \gamma, C2], cT]$; de même $T12 = \text{Intersection}[\text{DdOVA}[S, \gamma, C3], cT]$ où T12 est la position 1.2 de la Terre le 5 janvier 1587.

Le 17 février 1585 la direction de Mars est donnée par la demi-droite d'origine T11 faisant avec le vecteur $\vec{\gamma}$ un angle de mesure $D2 = 135,20^\circ$, Mars est donc sur la demi-droite $\text{DdOVA}[T11, \gamma, D2]$; de même le 5 janvier 1587 Mars est sur la demi-droite $\text{DdOVA}[T12, \gamma, D3]$. À ces deux dates, Mars est à la même position par rapport au Soleil, qui est donc l'intersection de ces deux demi-droites.

Soit :

$\text{Mars1} = \text{Intersection}[\text{DdOVA}[T11, \gamma, D2], \text{DdOVA}[T12, \gamma, D3]]$

De manière similaire, soit en utilisant les outils de GeoGebra, soit en saisissant les commandes directement, on construit les points T21, T22 et Mars2 à T51, T52 et Mars5.

Enfin l'outil "Conique passant par cinq points" permet de construire la projection de l'orbite de Mars sur le plan de l'écliptique.

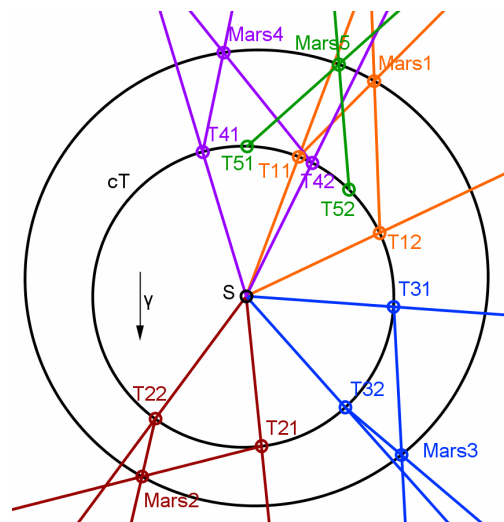


Fig. 3. Le résultat, l'orbite de Mars tracée.

Toutes les valeurs pouvant être modifiées il est tout à fait possible de refaire le tracé avec d'autres données, en reprenant par exemple celles utilisées par Béatrice Sandré.

Sources

- Les Cahiers Clairaut, bulletin du CLEA (comité de liaison enseignants et astronomes) n° 117, printemps 2007, article de Blaise Simon n° 118, été 2007, Les orbites de la Terre et de Mars : la première loi de Kepler, article de Béatrice Sandré.
- KEPLER par Philippe Depondt et Guillemette de Véricourt (Édition du Rouergue 2005).
- KEPLER, astronome, astrologue par Gérard Simon (Gallimard 1979).

<http://acces.inrp.fr/clea/lunap/Kepler>

OBSERVATION

La prochaine rétrogradation de Mars

Pierre Causeret, Esbarres

La dernière a eu lieu à l'automne 2007, la prochaine se produira cet hiver. Il s'agit bien sûr de la rétrogradation de Mars qui revient tous les 780 jours, sa période synodique.

L'observation à l'oeil nu

Quand l'observer ?

Fin septembre, la planète Mars est visible en deuxième partie de nuit et du côté est (elle se lève aux alentours de 1 h du matin en heure légale). En décembre, on peut l'observer à partir de 22 h. Fin janvier, elle est située à l'opposé du Soleil, elle se lève donc quand le Soleil se couche. A partir de février et pendant tout le printemps, Mars est visible le soir.

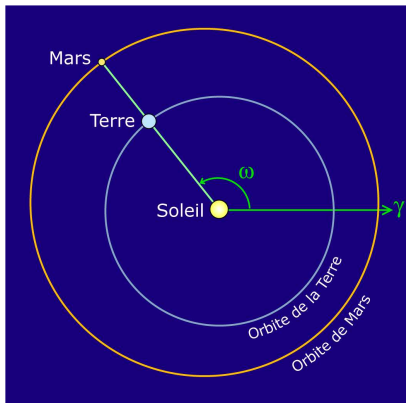


Fig 1. L'opposition de Mars du 29 janvier 2010. Soleil, Terre et Mars seront alignés. La distance Terre Mars sera alors de 99 millions de km.

Où l'observer ?

Mars passe dans les Gémeaux, le Cancer et le Lion. Elle se déplace d'ouest en est jusqu'au 20 décembre, rétrograde ensuite vers l'ouest jusqu'au 10 mars et repart ensuite en direction de l'est. Elle sera à son maximum de luminosité fin janvier, au milieu de la rétrogradation.

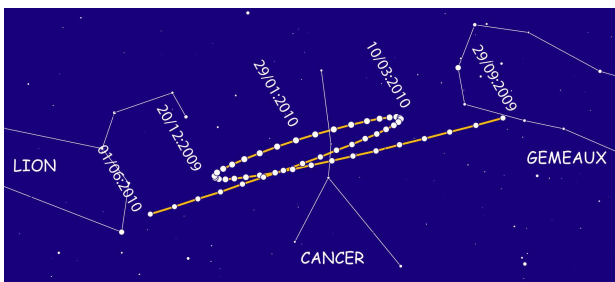


Fig 2. Mouvement de Mars au milieu des étoiles. La position de Mars est notée tous les 5 jours, du 29 septembre 2009 au 1er juin 2010.

L'explication

On a reproduit sur la figure 3a la position de la Terre et celle de Mars tous les 5 jours, du 29/09/2009 au 01/06/2010. Pour savoir dans quelle direction et à quelle distance on observe Mars depuis la Terre, on a tracé le segment Terre Mars tous les 10 jours et on a reporté ce segment à partir d'une Terre fixe (fig. 3b). Pour mieux visualiser le résultat, on a mis une couleur différente tous les 30 jours. Ce schéma explique la rétrogradation : la planète Mars rétrograde quand la Terre la double. On peut aussi vérifier que c'est au milieu de cette rétrogradation que Mars est au plus près et donc la plus lumineuse, à l'époque de l'opposition.

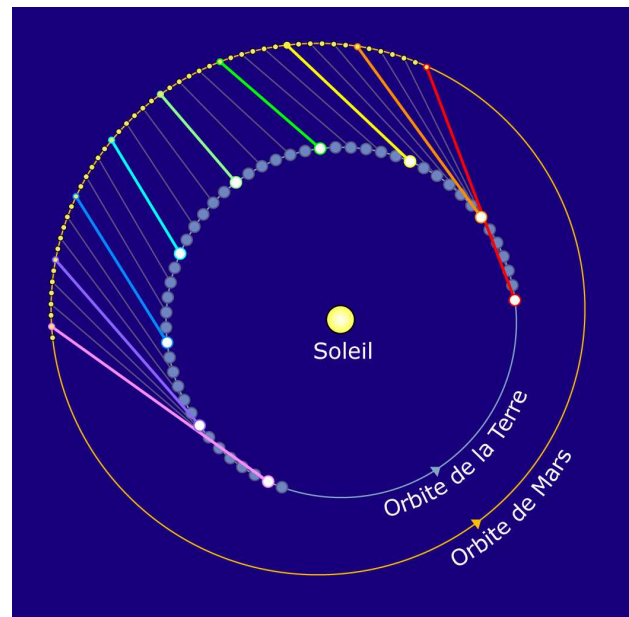


Fig. 3. a. ci dessus : positions de la Terre et de Mars autour du Soleil tous les 5 jours.

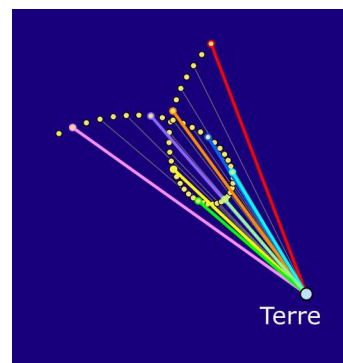


Fig. 3 b. à droite : on a reporté la position de Mars par rapport à la Terre.

Les données

Si vous désirez construire ou faire construire ces deux schémas, le tableau ci-dessous vous donne tous les renseignements nécessaires. La colonne ℓ donne la longitude écliptique héliocentrique, c'est à dire l'angle ω de la figure 1 mesuré à partir du point vernal γ (l'origine des longitudes). La colonne d donne la distance du Soleil à la planète mesurée en Unité Astronomique (distance moyenne Terre Soleil soit 149 600 000 km environ).

	Terre		Mars	
	ℓ (°)	d (UA)	ℓ (°)	d (UA)
29/09/2009	6,35	1,0016	71,18	1,5231
29/10/2009	36,07	0,9932	86,45	1,5612
28/11/2009	66,25	0,9865	101,03	1,5958
28/12/2009	96,75	0,9834	115,04	1,6248
27/01/2010	127,3	0,9847	128,62	1,6468
26/02/2010	157,64	0,9901	141,9	1,6607
28/03/2010	187,56	0,9981	155,03	1,6659
27/04/2010	216,98	1,0065	168,15	1,6622
27/05/2010	245,96	1,0132	181,39	1,6497

Positions de la Terre et de Mars données tous les 30 jours, du 29 septembre au 27 mai. Vous trouverez un tableau plus précis sur le site du CLEA avec les coordonnées données pour chaque jour.

Mars est à l'opposition le 29 janvier 2010. Elle est

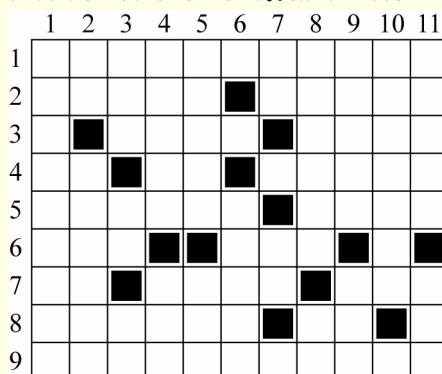
alors située à 99 300 000 km de la Terre. Son diamètre apparent est de 14,1" et sa magnitude est de -1,3. C'est une opposition peu intéressante puisqu'elle se produit quand Mars est presque au plus loin du Soleil.

L'observation au télescope

Étant donné la distance de la planète, il ne faut pas s'attendre à voir beaucoup de détails à sa surface. Il faut quand même noter qu'elle sera haute dans le ciel pour les observateurs de l'hémisphère nord, ce qui réduit la turbulence. Autre particularité intéressante, la calotte polaire nord sera orientée vers la Terre et on peut espérer qu'elle sera visible dans un petit instrument.

Nous avons reçu de Bernard Gonsette un long article d'une trentaine de pages sur la rétrogradation de Mars. Nous n'avons pas la place de le passer ici mais vous le trouverez sur le site du CLEA www.ac-nice.fr/clea/SommCC127.html. Il aborde divers problèmes liés à cette rétrogradation : positions particulières des planètes par rapport à la Terre, origine du phénomène de rétrogradation (avec des exercices de calculs de période, de distance, de diamètre apparent, de magnitude), observation du phénomène (boucle de rétrogradation, circonstances locales d'observation), photographie. ■

Mots croisés martiens



Verticalement

- Ses observations de Mars ont infirmé l'existence des canaux.
- A dû couler sur Mars. Là où Mars rétrograde cet hiver.
- A dû couler aussi sur Mars. Nombre d'astres connus actuellement abritant la vie. Sa présence dans les couches géologiques de la fin du Crétacé a été un des arguments en faveur de la thèse de la météorite pour expliquer la fin des dinosaures.
- Ils ressemblent à Saturne. 2009.
- Peut se joindre à la parole. Renvoi.
- Paris est celui de l'ESA mais dans le désordre ici.
- Tout début d'activité solaire. Plutôt rose que rouge.
- Satellite de Mars. Il dure 687 jours sur Mars.
- Il étend la calotte polaire de Mars. Un allemand.
- Comme Thalès et Philolaos.
- Allongé. Pour relever.

Horizontalement

- Étude de Mars.
- On peut en trouver dans le ciel de Mars, mais pas autant que chez nous. Comme la constellation de Procyon.
- Elle a envoyé la première sonde Mars1 vers la planète rouge. Mars a sûrement déjà été pris pour ça.
- Langue du Sud. Martien peut-être. Suivre.
- Un des problèmes des voyages en apesanteur. Limite.
- Il se jette dans le Danube. Pour se repérer grâce aux satellites.
- En pleine face. Mars. Elle organisera peut-être prochainement un voyage vers Mars.
- Satellite de Mars. Possède.
- Comme en partie l'engouement pour les Martiens de Percival Lowell.

Solution page 40

Pierre Causeret