ULC 543

SESSION 2005

Filière BCPST

SCIENCES DE LA TERRE

Epreuve commune aux ENS de Paris, Lyon et Cachan

Durée : 3 heures

L'usage de calculatrices électroniques de poche à alimentation autonome, non imprimantes et sans document d'accompagnement, est autorisé. Cependant, une seule calculatrice à la fois est admise sur la table ou le poste de travail, et aucun échange n'est autorisé entre les candidats.

PRÉAMBULE

La qualité de la rédaction, et la concision des réponses seront prises en compte dans l'évaluation.

Tournez la page S.V.P.

Partie 1 : Caractéristiques générales de la planète Mars

1) Situation de Mars dans le système solaire

La distance des planètes au soleil, exprimée en unité astronomique, suit approximativement une progression géométrique. C'est la loi de Titius-Bode (1778) :

$$a = 0{,}4 + x\, y^{n-1}$$

avec x et y respectivement des nombres rationnel et entier. Mercure occupe le rang 0.

L'unité astronomique (u.a.) est la distance moyenne qui sépare la Terre du Soleil,
1 u.a. = $149{,}6\ 10^6$ km

Tableau 1 : Distance moyenne des planètes (P) au Soleil (S)

Planète	$d_{P\text{-}S}$ (km)
Mercure	$57{,}91\ 10^6$
Venus	$108{,}2\ 10^6$
Terre	$149{,}6\ 10^6$
Mars	$227{,}9\ 10^6$
Jupiter	$778{,}5\ 10^6$
Saturne	$1432\ 10^6$
Uranus	$2889\ 10^6$
Neptune	$4518\ 10^6$
Pluton	$5970\ 10^6$

a. A partir du tableau 1, calculez la distance de chaque planète au soleil a en unité astronomique (u.a.)

b. Tracez un graphe représentant $\ln(a\text{-}0{,}4)$ en fonction du rang n de la planète, pour $n \geq 1$.

c. Quelle opération mathématique faut-il effectuer pour que ces points s'alignent sur une droite ? Quelles observations dans le système solaire permettent de justifier cette modification ?

d. Déterminez à partir du graphe les valeurs de x et y. Déduisez l'expression de la loi de Titius-Bode, et commentez sa validité.

e. Grâce à la loi Titius-Bode, Neptune fut découvert en 1846. Pourquoi attendit-on jusqu'à 1938 la découverte de Pluton ?

f. Finalement, commentez la place de Mars parmi l'ensemble des planètes du système solaire.

2) Propriétés globales de Mars

a. Dimension et forme de Mars

Le rayon équatorial de Mars Re, ainsi que son aplatissement ε sont connus depuis longtemps à partir de mesures radar. Les mesures récemment effectuées par l'altimètre laser MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter) en 1998-1999 ont amélioré leur précision.
Re = 3396,19 km et ε = 0,005886
Calculez le rayon martien moyen R_M, c'est-à-dire celui de la sphère de même volume que l'ellipsoïde décrit ci-dessus.

b. Calcul de la masse de Mars

Le théorème de Gauss indique que le champ de gravitation à une distance r du centre d'une distribution de masse à symétrie sphérique est identique à celui d'une particule matérielle confondue avec le centre de cette sphère, où serait concentrée la masse interne à la sphère de rayon r. Pour Mars, on peut donc écrire :

$$g_0 = G\frac{M_M}{R_M^2}$$

où M_M est la masse de Mars, R_M son rayon moyen, G la constante gravitationnelle, et g_0 l'intensité de la pesanteur mesurée à la surface de Mars.

$G = 6{,}67\ 10^{-11}$ N m^2 kg^{-2},
$g_0 = 3{,}73$ m s^{-2}

Calculez la masse de Mars M_M.

c. Calculez la densité de Mars ρ_M, et commentez cette valeur à la lumière de vos connaissances terrestres.

Partie 2 : Structure et dynamique interne de Mars

Le moment d'inertie d'une sphère homogène de masse M et de rayon R, en rotation autour d'un axe de symétrie est $I = 2/5\ M\ R^2$. Le moment d'inertie d'un objet composite est la somme des moments de ses différentes parties.

1) Densité du manteau et du noyau martiens

a. Les mesures géodésiques indiquent que le moment d'inertie de Mars I_M vaut $2{,}665\ 10^{36}$ kg m^2 et s'exprime donc sous la forme $I_M = 0{,}361\ M_M R_M^2$. Quelles informations sur la structure interne de Mars apporte cette relation ?

b. On estime que le noyau de Mars a un rayon R_n = 1710 km. Quelles mesures permettraient de vérifier et/ou de préciser cette valeur. Vous indiquerez en particulier comment vous disposeriez les instruments de mesure à la surface de Mars.

Tournez la page S.V.P.

c. En utilisant la relation énoncée ci-dessus, exprimez la densité moyenne de Mars ρ_M en fonction de la densité du manteau ρ_m, de celle du noyau ρ_n, du rayon moyen de la planète R_M, et de celui du noyau R_n.

d. En effectuant un bilan de masse, déduisez une relation indépendante exprimant ρ_M en fonction de ρ_m, ρ_n, R_M, et R_n.

e. Donnez alors les expressions de ρ_m et ρ_n, et calculez leur valeur. Commentez ce résultat.

2) Structure du manteau martien

À partir de l'analyse chimique de météorites martiennes, on estime que le manteau martien est probablement composé de 25% d'olivine, de 64% de pyroxène, et de 11% de grenat (% massiques). On estime également que dans les roches du manteau martien, le rapport molaire Fe/(Mg+Fe) vaut 0,3.

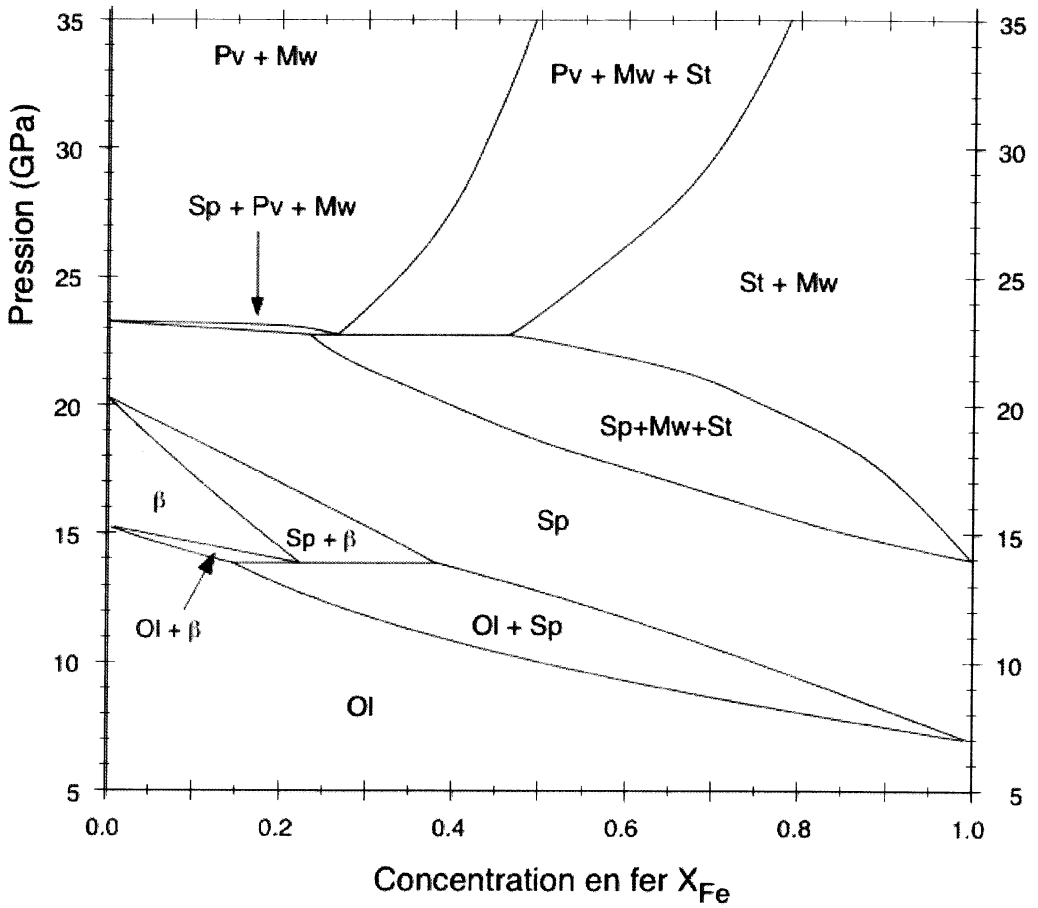

Figure 1 : Diagramme de phase du système $(Mg_{1-X},Fe_X)_2SiO_4$, en fonction de la pression et de la concentration en fer X_{Fe}. La température est fixée à 1873 K. Les phases stables à différentes conditions sont notées avec leurs abréviations : Ol = olivine phase α, β = phase β, Sp = spinelle ou phase γ, Pv = pérovskite, Mw = magnésiowüstite et St = stishovite (phase de la silice à très haute pression).

a. Comparez la composition minéralogique du manteau martien avec celle du manteau terrestre.

b. Calculez la pression à la base du manteau martien, en faisant l'hypothèse d'une densité constante pour le manteau.

c. Comment évolue la minéralogie du manteau martien en fonction de la profondeur, à l'aide de la *figure 1* et de vos connaissances sur le manteau terrestre. Y-a-t-il des discontinuités sismiques dans le manteau martien ?

3) Dynamique du manteau martien

La convection est caractérisée par le nombre de Rayleigh *Ra* :

$$Ra = \frac{\alpha \rho g \Delta T h^3}{\kappa \mu}$$

où α est la dilatation thermique du fluide en convection, ρ sa masse volumique, g l'accélération de la pesanteur, ΔT la différence de température entre la base et le sommet du système convectif, h est l'épaisseur du système convectif, κ sa diffusivité thermique et μ sa viscosité dynamique.

a. Montrez que le nombre de Rayleigh est sans dimension.

b. Expliquez pourquoi le nombre de Rayleigh mesure la vigueur de la convection, en précisant quels sont les termes moteurs et freins de la convection dans l'expression de *Ra*.

c. Calculez le nombre de Rayleigh du manteau martien, sachant que
$\alpha = 2\ 10^{-5}\ K^{-1}$
$\Delta T = 220\ K$
$\kappa = 1{,}1\ 10^{-6}\ m^2\ s^{-1}$
$\mu = 10^{21}\ Pa\ s$

d. En comparant une à une les grandeurs martiennes et terrestres impliquées dans l'expression du nombre de Rayleigh, comparez la vigueur de la convection sur Mars et sur Terre.

e. Quelles peuvent être les conséquences sur la dynamique de la surface martienne ?

Partie 3 : Dynamique de la croûte martienne

1) météorites martiennes

Les météorites de la famille des Shergottites sont des basaltes qui proviennent de la croûte martienne. Leur origine martienne est prouvée en particulier par le fait que de petites bulles de gaz piégées dans ces météorites ont une composition chimique identique à celle de l'atmosphère martienne telle qu'échantillonnée par les sondes Viking.

Tournez la page S.V.P.

a. Qu'est ce qu'un basalte ? Présentez ses principales caractéristiques géochimiques, pétrographiques. Citez les principaux minéraux constitutifs d'un basalte.

b. Quel(s) processus pétrogénétique(s) est(sont) impliqué(s) dans la formation des basaltes ?

c. Dans quel(s) contexte(s) géodynamiques les basaltes terrestres se forment-ils ?

2) Age des météorites martiennes

L'âge des météorites martiennes est très variable, compris entre 4,5 Ga et 180 Ma. Vous allez dater par radiochronologie deux exemplaires de shergottites tombées dans le Sahara. La météorite *Dar al Gani 476* récoltée en Lybie en 1998, sera datée par la méthode Samarium/Néodyme et la météorite *NWA1460* récemment récoltée au Maroc sera datée par la méthode Rubidium/Strontium.

Tableau 2 : Rapports isotopiques mesurés dans les météorites *Dar alGani 476* et *NWA1460*

Dar al Gani 476	$^{147}Sm/^{144}Nd$	$^{143}Nd/^{144}Nd$
Plagioclase	0.81489	0.515624
Olivine	0.64795	0.515122
Fe-pyroxène	0.96017	0.516110
Mg-pyroxène	0.93813	0.516000
Roche totale	0.49090	0.514685

NWA1460	$^{87}Rb/^{86}Sr$	$^{87}Sr/^{86}Sr$
Pyroxène	0.607547	0.711671
Plagioclase	0.075472	0.709313
Roche totale	0.158490	0.709681

a. Énoncez la loi générale de désintégration radioactive.

b. À quels processus de désintégration correspondent ces deux chronomètres ?

c. À partir de la loi de désintégration radioactive, démontrez l'expression générale de l'isochrone :

$$F = F_0 + (e^{\lambda t} - 1)P$$

Vous expliciterez les grandeurs P, F et F_0.

d. Ecrivez alors l'expression complète de l'isochrone de chaque chronomètre. Pourquoi les données se présentent-elles sous la forme de rapports isotopiques?

e. Tracez les isochrones des météorites *Dar al Gani 476* et *NWA1460*.

f. Calculez leur âge. On donne les valeurs des constantes de désintégration du samarium 147 λ_{147Sm} et du rubidium 87 λ_{87Rb}.
$\lambda_{147Sm} = 6{,}54\ 10^{-12}\ a^{-1}$
$\lambda_{87Rb} = 1{,}42\ 10^{-11}\ a^{-1}$

g. Montrez *a posteriori* que les chronomètres choisis sont bien adaptés à la gamme des âges obtenus.

h. Quelles sont les conséquences des âges obtenus pour la dynamique interne de Mars ?

3) Caractéristiques de la croûte martienne

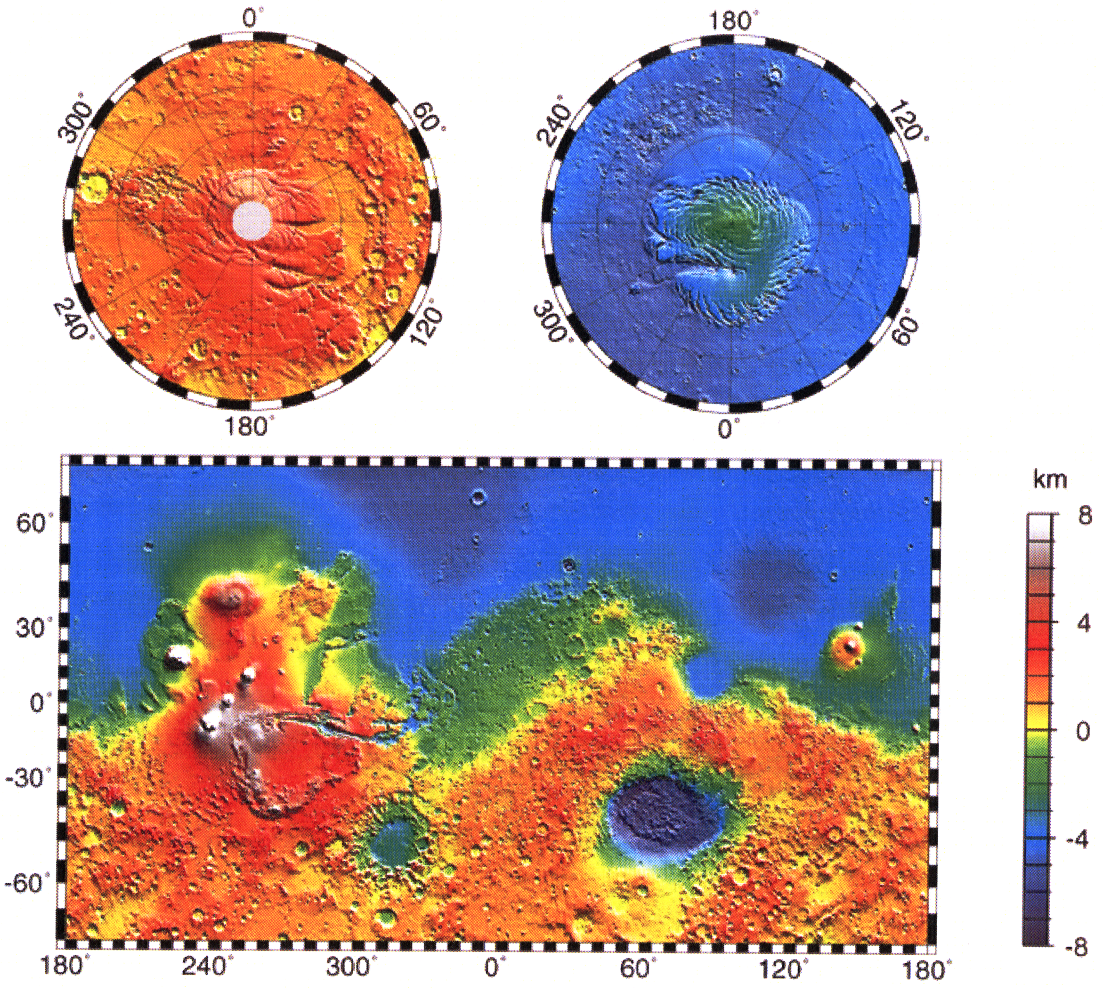

Figure 2 : Carte altimétrique globale de Mars, obtenue à partir des données de l'altimètre laser MOLA. Les projections polaires sud (en haut à gauche) et nord (en haut à droite) sont complémentaires de la carte générale en projection Mercator jusqu'à 70° de lalitude. Le complexe de Tharsis est centré près de l'équateur entre 220 et 300° de longitude ; il contient le canyon géant de Valles Marineris, ainsi qu'un certain nombre de volcans boucliers, dont Olympus Mons. (document GSFC/NASA)

Tournez la page S.V.P.

a. À partir de la *figure 2*, décrivez les grands ensembles géologiques mis en évidence par la topographie martienne. Notez que l'amplitude de la topographie martienne est de 30 km.

b. S'il y a eu un océan à la surface de Mars, où était-il situé ?

c. Proposez une localisation plausible pour le site originel des météorites *Dar al Gani 476* et *NWA1460*, étudiées dans la question précédente.

d. L'analyse statistique des altitudes de la surface de Mars est présentée sur la *figure 3*. Calculez l'épaisseur moyenne de la croûte associée aux deux pics de la distribution, sachant que la croûte martienne a une épaisseur moyenne globale h_c de 47 km, et une densité moyenne de ρ_c de 2819 kg m^{-3}. On fera l'hypothèse que la surface de Mars est à l'équilibre isostatique.

e. Comparez les croûtes martienne et terrestre, en termes d'âge, de densité, d'épaisseur.

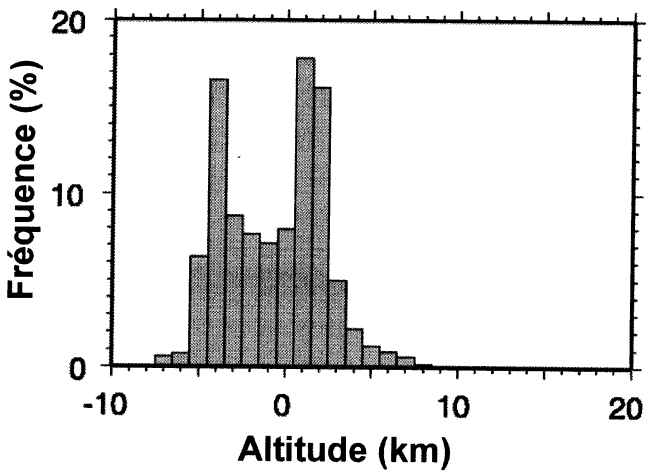

Figure 3 : Distribution des altitudes à la surface de Mars

Partie 4 : L'eau à la surface de Mars

1) Caractéristiques générales de l'atmosphère martienne

A la surface de Mars, la pression atmosphérique est de 560 Pa, et la température moyenne de 210 K. La masse de l'atmosphère actuelle est estimée à 2,1 10^{16} kg.

a. À l'aide des données présentées dans le tableau 3,comparez la composition chimique de l'atmosphère martienne avec celle de la Terre.

Tableau 3 : Composition chimique de l'atmosphère moyenne en pourcentage massique

Constituant	Teneur (%)
CO_2	95,3
N_2	2,7
Ar	1,6
O_2	0,13
CO	0,07
H_2O	0,03
Ne, Kr, Xe, O_3	$< 2\ 10^{-4}$

b. La température moyenne de la surface de Mars est très proche de la température d'équilibre de la planète, c'est-à-dire de la température qui régnerait à la surface sans atmosphère. Pourtant, celle-ci est relativement enrichie en CO_2. Proposez une explication à cette observation apparemment paradoxale.

c. Calculez la masse d'eau contenue dans l'atmosphère martienne.

2) Les calottes polaires martiennes

Aux pôles sud et nord de Mars, on observe deux calottes glaciaires de forme quasi-circulaire (*Figure 2*). Elles sont constituées de glace de H_2O pour leur partie permanente, et de glace de CO_2 pour la partie saisonnière.

Leur diamètre minimum actuel est de 1100 km au pôle nord, et de 400 km au pôle sud ; l'épaisseur de glace est de 2,5 km environ.

a. Calculez la masse d'eau stockée dans les calottes polaires martiennes, sachant que la masse volumique de la glace est de 920 kg m^{-3}.

b. L'analyse de la glace des calottes glaciaires pourrait-elle nous renseigner sur l'évolution récente du climat à la surface de Mars ?

3) Le pergélisol martien

L'existence d'éjectats lobés fluidisés autour des cratères d'impact, de zones fluidisées en avant des éboulis de pentes indique la présence de glace dans le sous-sol de Mars, sur une épaisseur moyenne de 4 km environ. La teneur en glace de la partie superficielle de la croûte martienne est élevée ; elle est estimée à 40%.

Calculez la masse d'eau stockée dans la croûte martienne.

4) L'océan de Mars

a. Sachant que la température maximale à l'équateur de Mars atteint 293 K, peut-il y avoir de l'eau liquide à la surface de Mars, actuellement ? Référez-vous au diagramme de phase de H_2O présenté sur la *figure 4*.

Tournez la page S.V.P.

b. Dans quelles conditions aurait-il pu y avoir globalement de l'eau liquide à la surface de Mars? De telles conditions ont-elles existé récemment, au moins localement ?

c. Calculez la hauteur d'eau moyenne à la surface de Mars, si toute la glace était mobilisée en surface sous forme liquide. Comparez cette valeur à la masse d'eau disponible à la surface de la Terre.

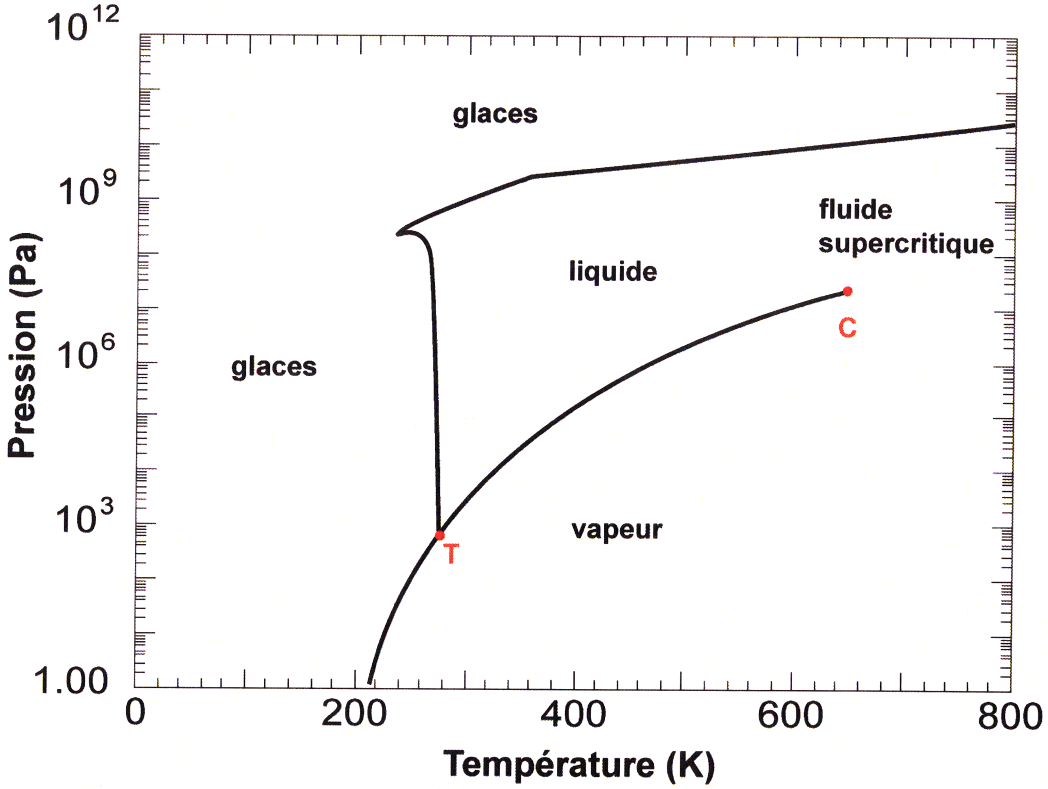

Figure 4 : Diagramme de phase de H_2O. T représente le point triple, C le point critique.

5) Paysages martiens

Décrivez et interprétez les structures visibles sur les photographies et schémas des *figures 5* et *6*. Quelles informations apportent ces structures sur l'histoire de l'atmosphère de Mars ?

Partie 5 : Synthèse - Comparaison Terre - Mars

En vous appuyant sur des schémas, établissez une comparaison entre la Terre et Mars, à partir des éléments de géologie de Mars mis en évidence dans le parties précédentes ainsi que de vos connaissances.

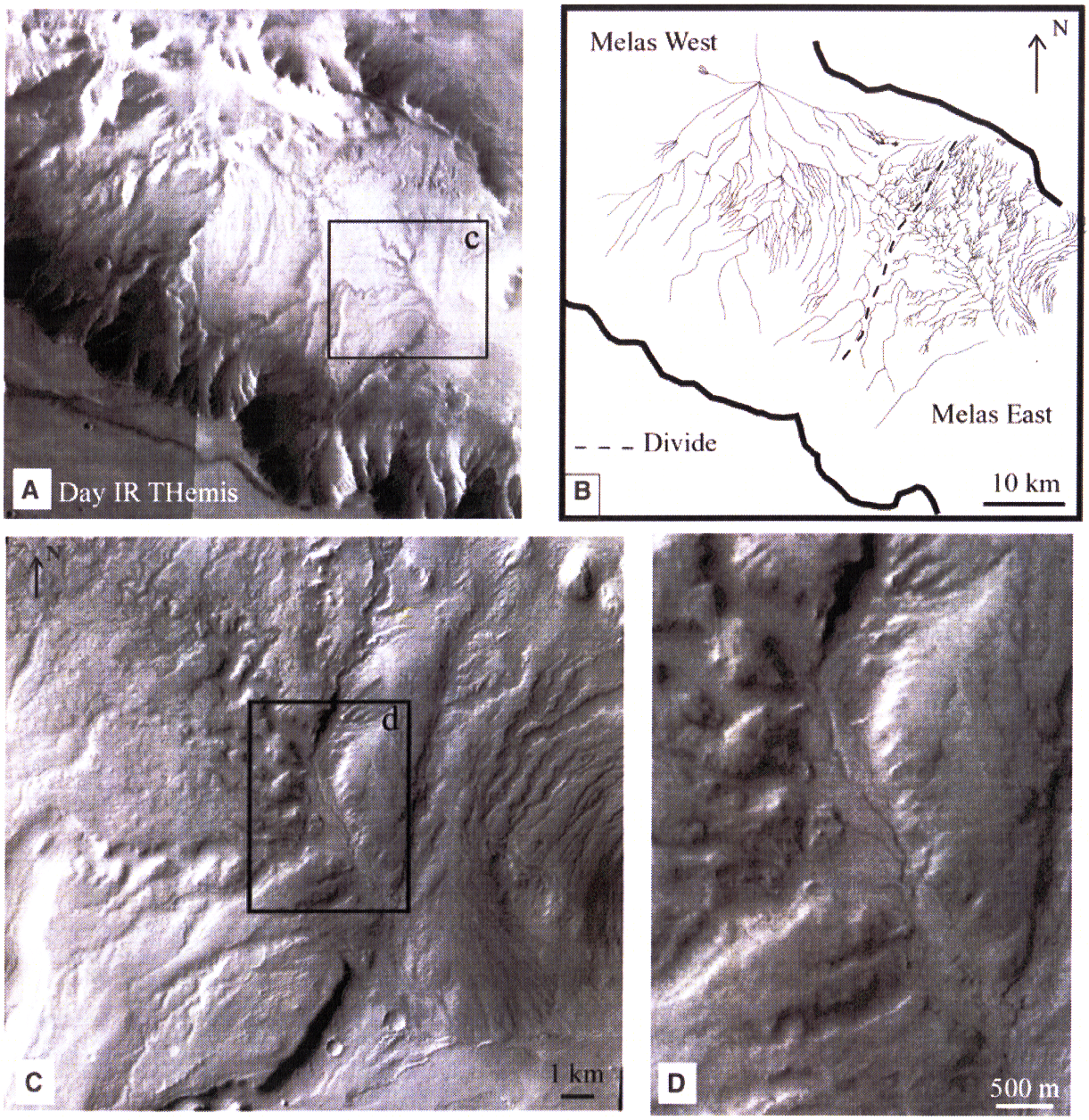

Figure 5 : Images prises par le spectromètre THEMIS (Thermal Emission Imaging System) de la mission Mars Odyssey. La région observée ici est le plateau interne de Melas Chasma (77.5°W, 10°S), situé dans la région de Valles Marineris. (**A**) Image infrarouge diurne. (**B**) Schéma interprétatif. (**C et D**) zooms successifs.

Tournez la page S.V.P.

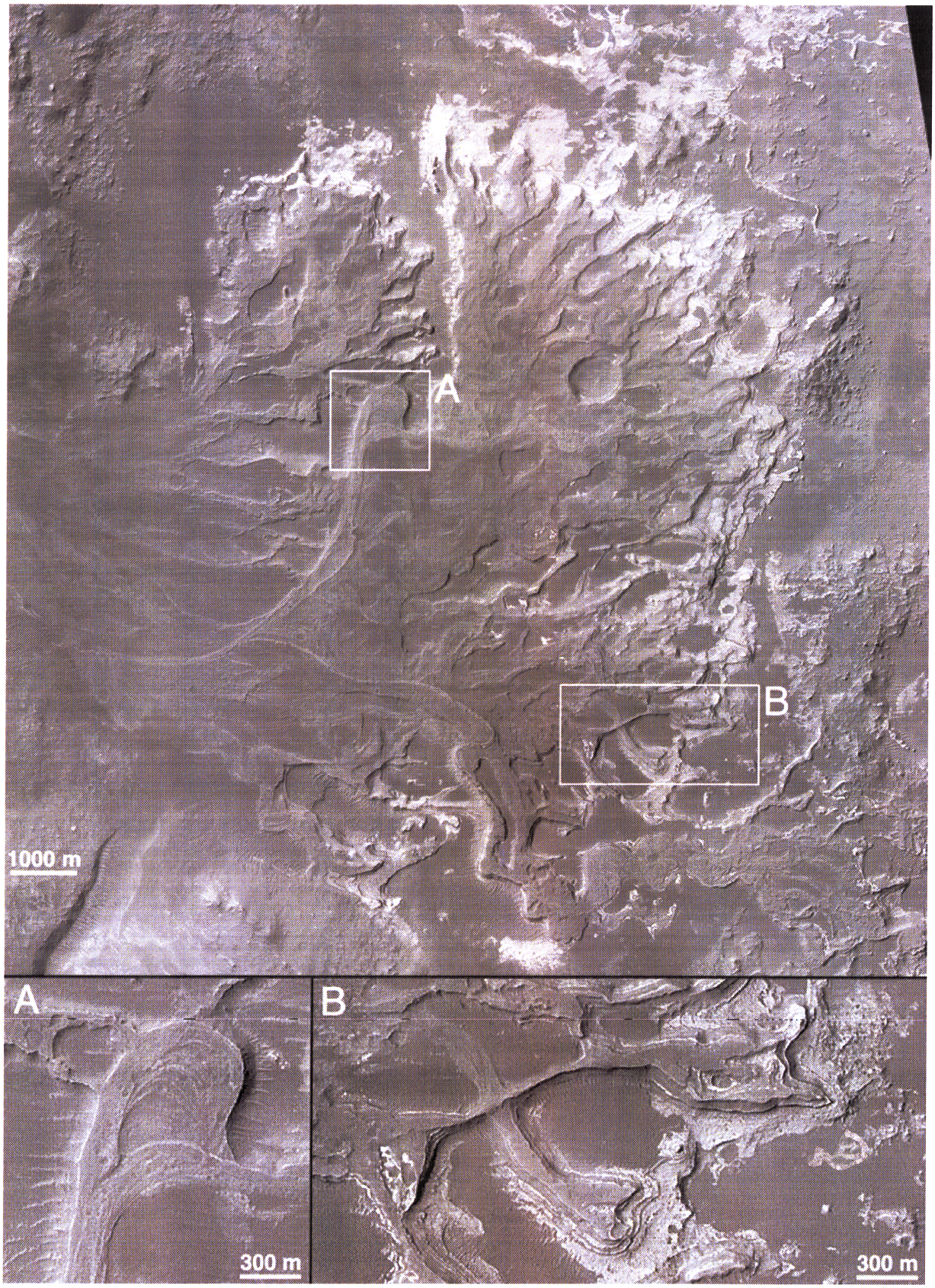

Figure 6 : Mosaïque d'images prises par la caméra de Mars Orbiter (Mars Global Surveyor), dans le cratère de Holden (24°S, 34°W). (**A** et **B**) sont deux vues de détail.