

**ÉCOLES NORMALES SUPÉRIEURES
ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES**

CONCOURS D'ADMISSION SESSION 2017

FILIÈRE BCPST

COMPOSITION DE SCIENCES DE LA TERRE

Épreuve commune aux ENS de Cachan, Lyon, Paris et de l'ENPC

Durée : 4 heures

L'épreuve est composée de 3 parties indépendantes. Dans chaque partie, de nombreuses questions sont indépendantes les unes des autres. La qualité de la rédaction, la précision des schémas et la concision des réponses seront prises en compte dans l'évaluation. L'usage d'une calculatrice est autorisé.

1 Énergie solaire, saisons, températures sur Terre

1.1 L'énergie solaire, l'atmosphère et l'eau

1.1.1 Expliquez, éventuellement à l'aide d'un schéma, comment l'apport énergétique solaire prédominant dans la zone équatoriale initie une convection atmosphérique qui induit des circulations atmosphériques séparées dans chaque hémisphère.

1.1.2 Expliquez comment ces circulations atmosphériques couplées au cycle d'évaporation-précipitation de l'eau sont à l'origine d'une redistribution latitudinale de l'énergie solaire reçue à la surface de la Terre.

1.1.3 Quel autre phénomène de redistribution énergétique de surface peut être relié à ces mouvements atmosphériques ?

1.2 Saisons et paramètres orbitaux

On considère pour les questions ci-dessous que l'énergie solaire reçue dans un hémisphère y reste cantonnée.

1.2.1 Représentez, par des schémas simples, le disque terrestre tel que vu depuis le Soleil (vue de face) et tel que vu par un observateur situé sur le plan de l'écliptique ayant une direction d'observation à 90° de la vue précédente (vue de profil) lors de l'équinoxe de mars et lors du solstice de décembre. Seront représentés la trace du plan de l'écliptique, l'équateur terrestre, les tropiques, l'axe de rotation de la Terre et, pour les vues de profil, on distinguera les zones éclairées (jour) ou non (nuit).

1.2.2 D'après les schémas précédents et les données fournies (cf. Tableaux et données, en dernière page), calculez la fraction d'énergie solaire incidente totale perçue par chaque hémisphère lors de l'équinoxe de mars et lors du solstice de décembre.

1.2.3 La température à la surface de la Terre, considérée comme un corps noir, est relié à l'énergie incidente par la loi de Stefan :

$E = \sigma \cdot T^4$, avec σ , la constante de Stefan ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$).

On suppose dans un premier temps que la température moyenne d'un hémisphère terrestre dépend de l'énergie perçue le jour considéré. En prenant une température moyenne terrestre de 15°C , calculez la température moyenne de chaque hémisphère à l'équinoxe de mars et au solstice de décembre.

1.2.4 L'orbite de la Terre autour du Soleil étant elliptique, la distance Terre-Soleil varie de part et d'autre de sa distance moyenne entre son périhélie (distance minimale, 147.10^6 km) et son aphélie (distance maximale, 152.10^6 km).

Le Soleil ayant un rayonnement à géométrie sphérique, expliquez comment varie l'énergie solaire incidente sur une surface donnée en fonction de sa distance au Soleil.

Calculez, par rapport à l'énergie solaire moyenne (pour une distance moyenne) reçue à la surface de la Terre, la quantité d'énergie solaire incidente au périhélie et à l'aphélie ainsi que la différence d'énergie reçue entre ces deux positions extrêmes.

Déduisez-en la température moyenne terrestre au périhélie et à l'aphélie, en gardant comme température moyenne terrestre (pour une distance moyenne) une température de 15°C.

1.2.5 Actuellement le périhélie est aux alentours du 4 janvier. D'après les résultats ci-dessus, expliquez comment cela influence le contraste saisonnier été/hiver pour les hémisphères Nord et Sud.

1.2.6 Les contrastes saisonniers observés sont plus faibles que les écarts estimés, les températures observées étant moins extrêmes que les températures calculées. De plus, les températures atmosphériques minimales et maximales ne sont pas observées lors des minima et maxima d'insolation mais environ 6 semaines après. Que signifient, énergétiquement parlant, ces observations ? Quel phénomène peut expliquer cette réduction de contraste et ce décalage temporel entre insolation maximale (minimale) et température maximale (minimale) ?

2 L'eau liquide dans le système solaire

La présence d'eau liquide permanente est l'un des critères d'habitabilité d'une planète ou de tout corps du système solaire. C'est pourquoi la recherche d'eau liquide est une préoccupation préliminaire dans la recherche de sites pouvant héberger la vie dans le système solaire.

2.1 L'eau sur Terre et sur Mars

2.1.1 « À la surface de la Terre, l'eau existe sous 3 états : solide, liquide et gazeux ». En vous appuyant sur vos connaissances et sur les diagrammes de phase de l'eau (Figure 1), confirmez cette affirmation en donnant un exemple de réservoir pour chaque état de l'eau.

2.1.2 Un robot explorateur sur Mars à la recherche de traces de vie transporte un récipient hermétique contenant de l'eau maintenue à 15°C sous pression d'un dixième d'atmosphère terrestre. Un bras perforateur perce le récipient. D'après les données disponibles (voir Tableaux et données) sur les conditions à la surface de Mars, décrivez le devenir de cette eau qui passe à la pression ambiante martienne puis s'équilibre thermiquement avec son environnement.

2.1.3 En prenant un gradient géothermique superficiel martien égal au tiers du gradient géothermique superficiel terrestre et une température de surface de 210 K, estimez la profondeur et la pression auxquelles on peut trouver de l'eau liquide dans le sous-sol martien, en justifiant les étapes de votre raisonnement et les éventuelles approximations ou analogies utilisées.

2.2 Europe, satellite de Jupiter recouvert de glace

Europe est un satellite tellurique de Jupiter, de taille proche de celle de la Lune, de composition proche, pour sa partie ferro-silicatée, de celle de la Terre, et recouverte d'une couche d'eau salée d'une centaine de kilomètres d'épaisseur dont, au moins, la surface est gelée (température de surface de l'ordre de 100 K).

2.2.1 Les mesures de la sonde Galileo sur le champ magnétique de Jupiter montre que celui-ci est perturbé à proximité d'Europe, perturbation qui pourrait s'expliquer par l'existence d'un champ magnétique « européen » superficiel propre ou induit. Expliquez brièvement en quoi cette découverte est un argument en faveur de la présence d'eau liquide sur Europe.

2.2.2 En décembre 2013, le télescope Hubble a observé des geysers d'eau dans la région Sud d'Europe atteignant 100 à 200 km d'altitude. Les observations en janvier et février suivants n'ont pas permis de réobserver ce phénomène. Qu'apporte cette observation ?

2.2.3 La figure 3 est une photographie aérienne prise près des côtes de l'Antarctique (l'océan y apparaît noir), la figure 4 est une vue de la surface englacée d'Europe. Expliquez, à l'aide d'un schéma, les différentes

altitudes observées sur le cliché terrestre. Par analogie, estimez l'épaisseur H de la croûte de glace sur Europe en considérant une banquise d'épaisseur $B = 5$ km et une différence d'altitude moyenne de 2000 m entre les niveaux hauts et les niveaux bas. On prendra des densités de 1 et 0,93 pour, respectivement, l'eau liquide et la glace d'eau superficielle.

Dans le cas d'un océan liquide convectif, l'eau au contact de la roche silicatée peut-elle être à l'état liquide ?

De quelle situation terrestre ce type de contact eau-roche peut-il être rapproché ?

2.3 Énergie interne et effets de marée

L'existence d'eau liquide sur Europe malgré la température de surface nécessite un apport d'énergie interne dont on va essayer de préciser l'origine.

La Terre subit des effets de marée de la part du Soleil et de la Lune qui induisent des déformations de la Terre solide (on ne s'occupe pas, ici, des marées océaniques superficielles). Dans le cadre d'une déformation élastique elliptique, on peut montrer que la déformation radiale maximale d'un corps dans la direction du corps attracteur peut s'exprimer comme suit, ici pour le système Terre (T) - Soleil (S) :

$$h_{\max}(T-S) = h(T) \cdot \Gamma(T-S) \cdot R(T), \text{ avec } \Gamma(T-S) = M(S)/M(T) \cdot [R(T)/d]^3$$

$\Gamma(T-S)$ décrit le potentiel de déformation, lié aux forces de marée, du corps dont on étudie la déformation, qui dépend, entre autres, de d , distance entre les deux corps étudiés, et de R , le rayon du corps déformé.

$h(T)$ est le nombre de Love décrivant la réponse radiale élastique de la Terre à ce potentiel de déformation.

2.3.1 À l'aide des données fournies (voir Tableaux et données), comparez $\Gamma(T-S)$ et $\Gamma(T-L)$, les potentiels de déformation de marée du Soleil et de la Lune exercés sur la Terre et déduisez-en la part de la Lune dans la déformation de marée totale cumulée de la Terre.

La déformation radiale maximale mesurée sur Terre est d'environ 32 cm, quelle est la valeur de $h(T)$?

En première approximation, quel est l'ordre de grandeur de la périodicité des marées terrestres (dites aussi marées solides) en un point de la surface ?

2.3.2 Montrez que, pour les marées affectant la Lune, on peut négliger l'effet du Soleil par rapport à l'effet de la Terre. Pour une orbite lunaire circulaire, quel serait l'effet de marée terrestre en un point de la Lune ?

L'orbite lunaire autour de la Terre est très elliptique et la distance Terre-Lune est d'environ 360 000 km à son périégée et 405 000 km à son apogée. La différence de déformation radiale entre apogée et périégée est de l'ordre de 15 cm. Estimez $h(L)$ et comparez à $h(T)$.

2.3.3 Estimez l'effet de marée de Jupiter sur Europe, satellite en orbite synchrone, en déterminant $\Gamma(E-J)$. La variation de diamètre d'Europe au cours de son orbite est de l'ordre de 100 m. Sachant que la distance à Jupiter varie de 665 000 km au périastre à 677 000 km à l'apoastre, déterminez $h(E)$.

Comparez les effets de marées sur Europe aux marées solides sur Terre.

2.3.4 L'énergie interne liée à la désintégration des éléments radioactifs représente environ la moitié de l'énergie géothermique terrestre. Le flux géothermique à la surface de la Terre varie de 30 à 300 mW.m⁻² avec une moyenne de 80 mW.m⁻². En considérant que la partie silicatée d'Europe et de la Terre ont des

compositions chondritiques comparables, calculez le flux géothermique total $Q_{\text{rad}}(E)$ lié à la désintégration des éléments radioactifs à la base de la couche superficielle d'eau d'Europe.

2.3.5 Les déformations élastiques et les frictions dues aux déformations de marée s'accompagnent d'une libération de chaleur. Pour des satellites silicatés synchrones en orbite autour du même corps, l'énergie de marée, et donc sa part libérée sous forme de chaleur, peut être exprimée sous la forme :

$$Q_{\text{marée}} = A \cdot (R/P)^5 \cdot e^2$$

avec A une constante liée aux caractéristiques du corps central, R le rayon silicaté du satellite, P sa période de révolution et e l'excentricité de son orbite.

Des mesures spectrales à la surface d'Io, satellite de Jupiter, ont permis d'estimer son flux géothermique total à environ 75 TW, flux essentiellement dû aux effets de marée. ($1\text{TW}=10^{12}\text{W}$). Calculez le flux géothermique total lié aux effets de marée pour Europe.

2.3.6 Pour une épaisseur de glace H estimée auparavant et une conductivité thermique k de cette glace, exprimer le flux thermique traversant la croûte de glace supposée en état stationnaire, prise entre la surface à 100 K et l'océan liquide sous-jacent.

Calculez le flux géothermique minimal total d'Europe, $Q(E)$, correspondant à l'existence d'eau liquide sous une couche superficielle de glace. On prendra $k=5,4\text{ W/m.K}$ comme valeur moyenne sur la gamme de température de la glace superficielle.

Ce flux est considéré par la suite comme l'énergie minimale nécessaire au maintien d'une couche d'eau liquide sous la surface glacée d'Europe.

2.3.7 D'après les estimations ci-dessus, en ne considérant que les sources énergétiques étudiées, l'existence d'un océan liquide sous-glaciaire sur Europe nécessite-t-il réellement un apport d'énergie lié aux effets de marée autour de Jupiter ? Si les estimations sont du bon ordre de grandeur, la présence d'eau liquide au contact de la roche silicatée est-elle plausible ?

2.3.8 Ganymède est un satellite de Jupiter plus distal. Comme Europe, c'est un satellite silicaté recouvert d'une couche d'eau salée mais, ici, d'une épaisseur de 800 km, eau bien sûr gelée au moins en surface. Les observations du télescope spatial Hubble, confirmant celles, très brèves, de Galileo en 2002, montreraient aussi l'existence d'eau liquide « superficielle ».

Comparer les sources potentielles d'énergie de Ganymède par rapport à Europe (désintégration radioactive et énergie de marée).

En vous aidant de la figure 2, déterminez s'il est possible que de l'eau liquide puisse exister au contact eau-roche silicatée ?

À partir des vues de surface de ces deux satellites (Figure 6), expliquer les différences observées en vous basant sur les données précédentes et sur la comparaison avec la surface lunaire (Figure 5).

2.3.9 Sur la base de vos connaissances sur les conditions d'apparition de la vie sur Terre, des conditions favorables à l'apparition d'une vie de type « terrestre » est-elle envisageable sur Europe et sur Ganymède ?

3 Eau et fusion de la croûte continentale

L'eau agit comme un fondant. Son action est souvent étudiée pour la fusion du manteau terrestre, moins souvent pour la fusion de la croûte continentale.

3.1 Rappel sur le manteau

Dans quel contexte géodynamique la présence d'eau permet-elle d'expliquer la fusion de matériel mantellique ? D'où provient cette eau ? Dans quel « état » se trouve-t-elle et quelle en est la conséquence sur la composition chimique du magma obtenu ?

3.2 Conditions de fusion de la croûte continentale

La figure 7 présente les solidus hydraté (roche saturée en eau) et sec (absence d'eau dans la roche) d'un matériel granito-gneissique représentant une croûte continentale supérieure moyenne. Ces courbes sont en fait très proches des solidus du système eutectique "quartz + plagioclase + feldspath potassique" avec un peu de biotite (densité $\sim 2,7$).

Les magmas potentiellement obtenus, légèrement moins denses que leur roche d'origine, sont plus visqueux que les magmas mantelliques car la viscosité d'un magma augmente lorsque la température diminue et lorsque l'acidité (teneur en silice) augmente.

Une croûte continentale stable, d'environ 30 km d'épaisseur, est sismiquement partagée en une croûte supérieure d'une vingtaine de kilomètres d'épaisseur et une croûte inférieure (20 à 30 % de l'épaisseur), montrant de nombreux réflecteurs sismiques subhorizontaux, dans laquelle les vitesses sismiques sont légèrement supérieures. Cette distinction est généralement expliquée par la présence d'intrusions de matériel basique issu de la fusion du manteau sous-jacent, qui forment des domaines mixtes plus basiques, et par une déformation plus ductile de cette partie inférieure généralement plus sèche.

3.2.1 Comment se comporte un matériau partiellement hydraté par rapport au même matériau saturé en eau ou « sec » ? À partir des données et de vos connaissances, déterminez les domaines possibles de fusion partielle (on précisera température, profondeur, nature de la croûte et état d'hydratation) pour une croûte continentale de 30 km d'épaisseur, dont 20 % de croûte inférieure.

3.2.2 Prenons une croûte soumise à une extension homogène et rapide (géologiquement parlant) dont l'épaisseur a été ramenée à 20 km. Quels sont les conséquences de cet amincissement sur les domaines potentiels et sur les conditions de fusion humide et sèche ?

3.2.3 Selon leurs conditions de formation, indiquer le devenir possible des magmas obtenus par fusion partielle de croûte continentale. On comparera un magma issu de la fusion de croûte supérieure quasi-saturée en eau, de croûte granito-gneissique sèche, et de croûte inférieure.

Figures

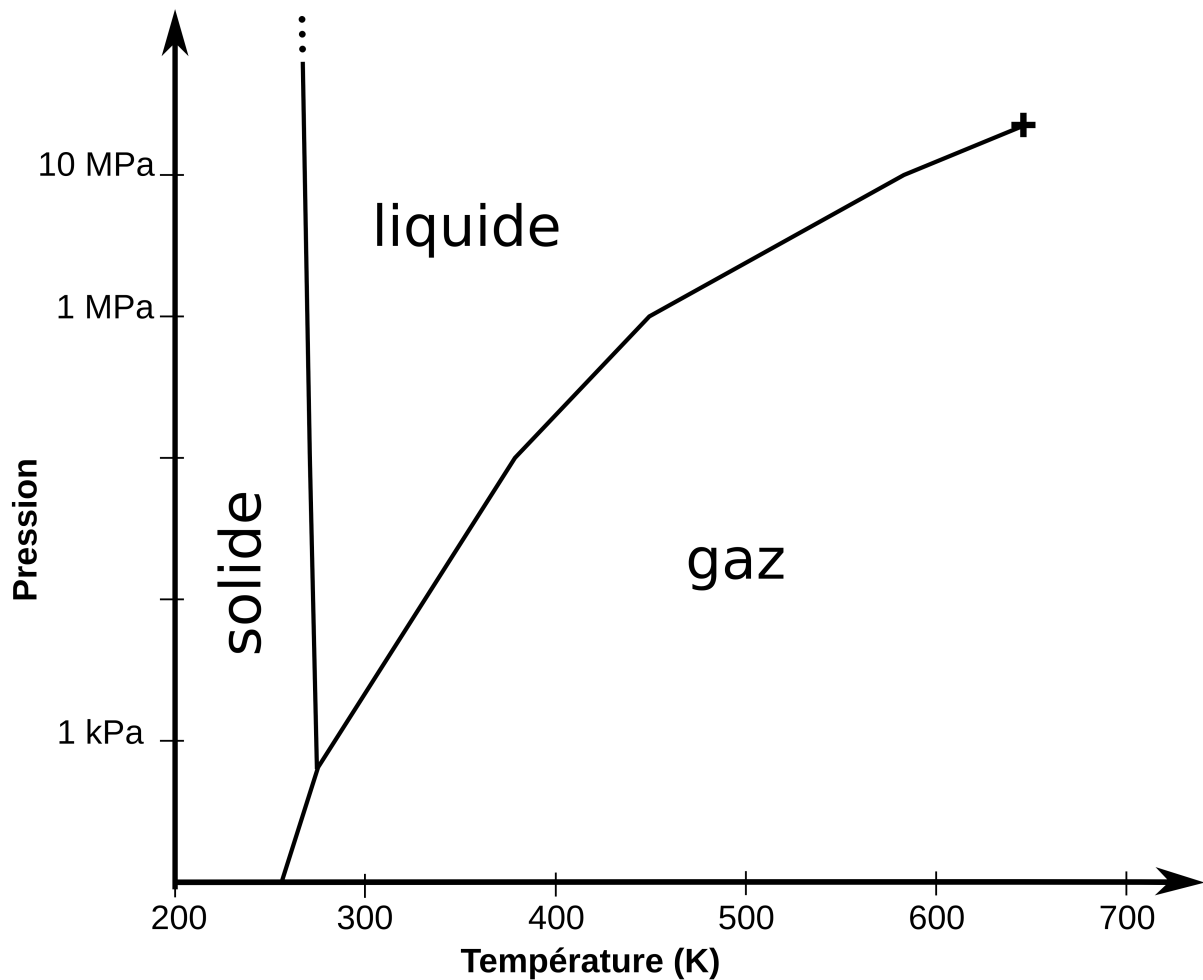


Figure 1. Diagramme de phases de l'eau à basse pression

Point triple : $T = 273,16 \text{ K}$, $P = 611 \text{ Pa}$ - Point critique : $T = 647,3 \text{ K}$, $P = 22,11 \text{ MPa}$

À l'état supercritique (P et T supérieures aux conditions du point critique), l'eau est alors un fluide dont les capacités de solubilisation sont très fortement augmentées.

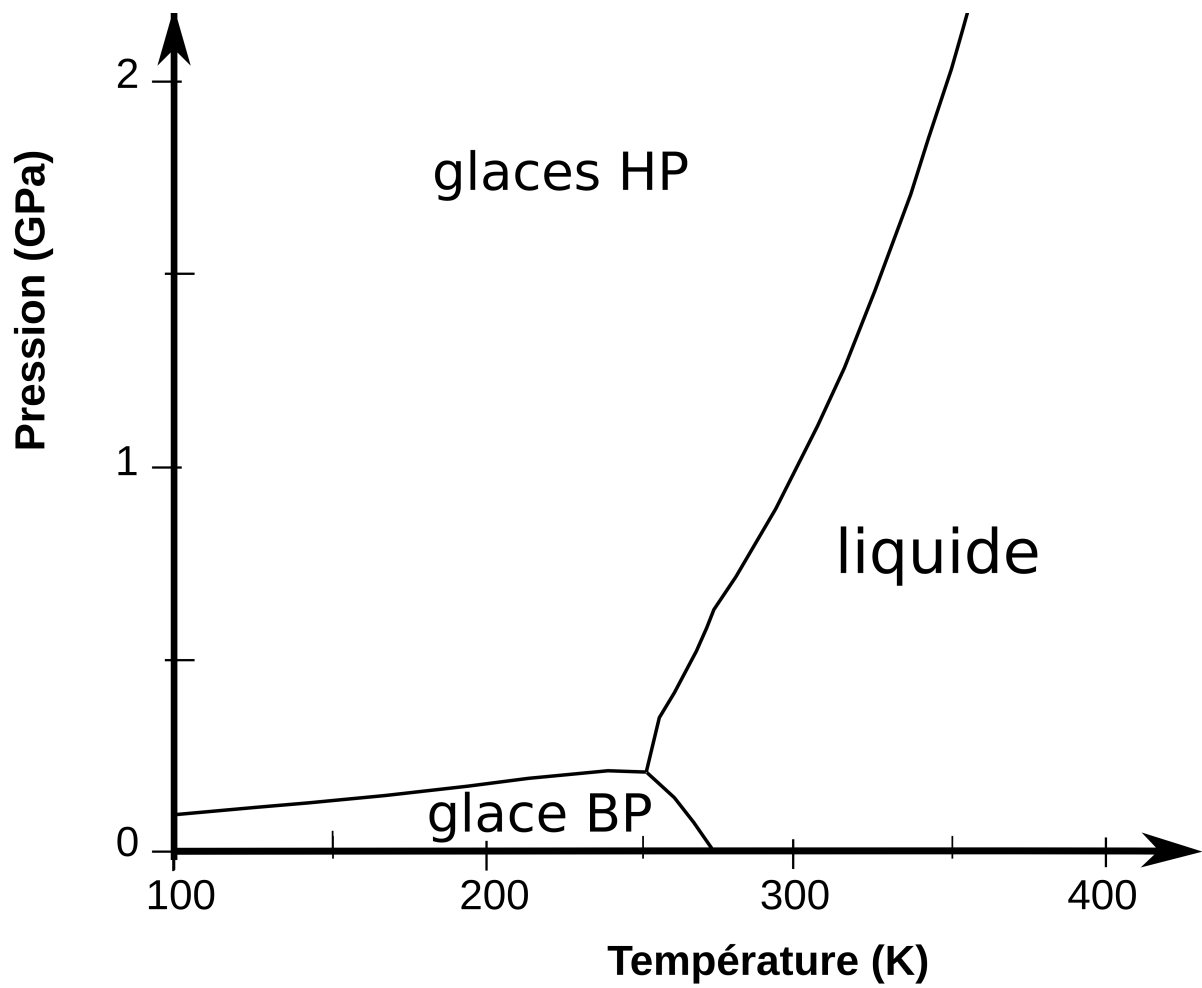


Figure 2. Diagramme de phases de l'eau à haute pression

Point triple : $T = 251 \text{ K}$, $P = 0.21 \text{ GPa}$

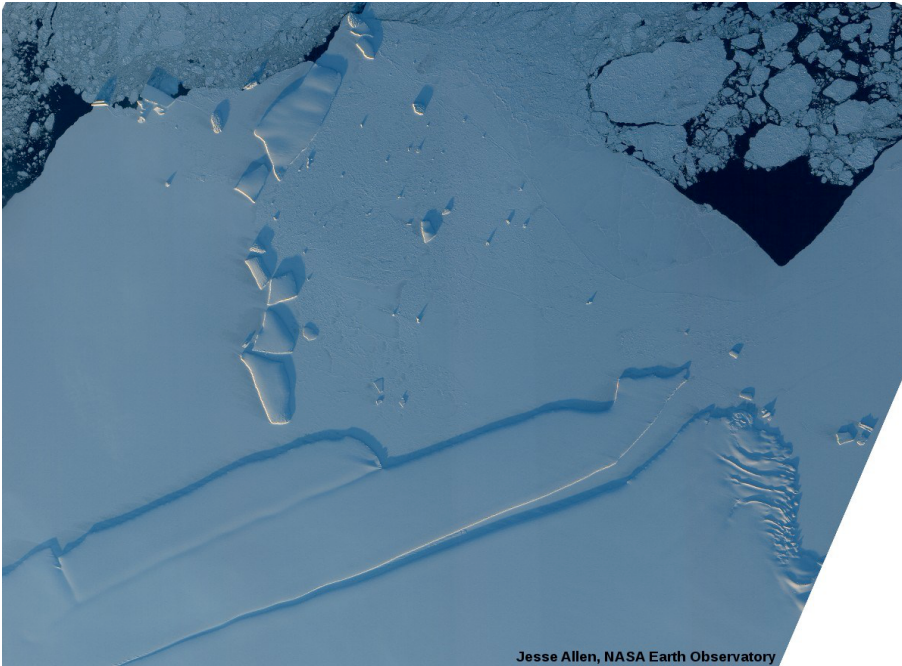


Figure 3. Fragmentation du front d'une plateforme de glace antarctique

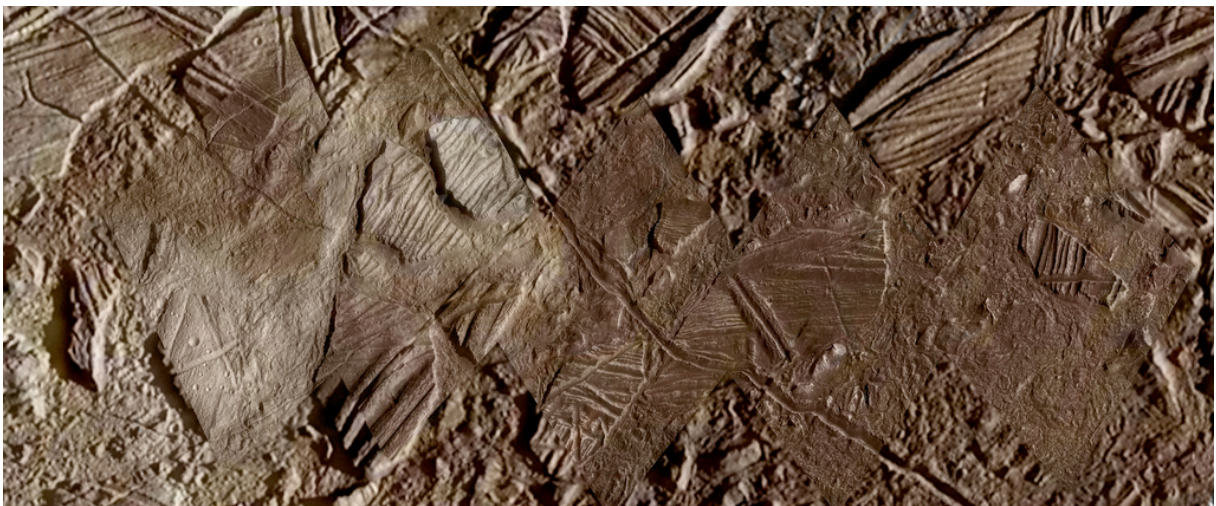


Figure 4. La surface gelée d'Europe

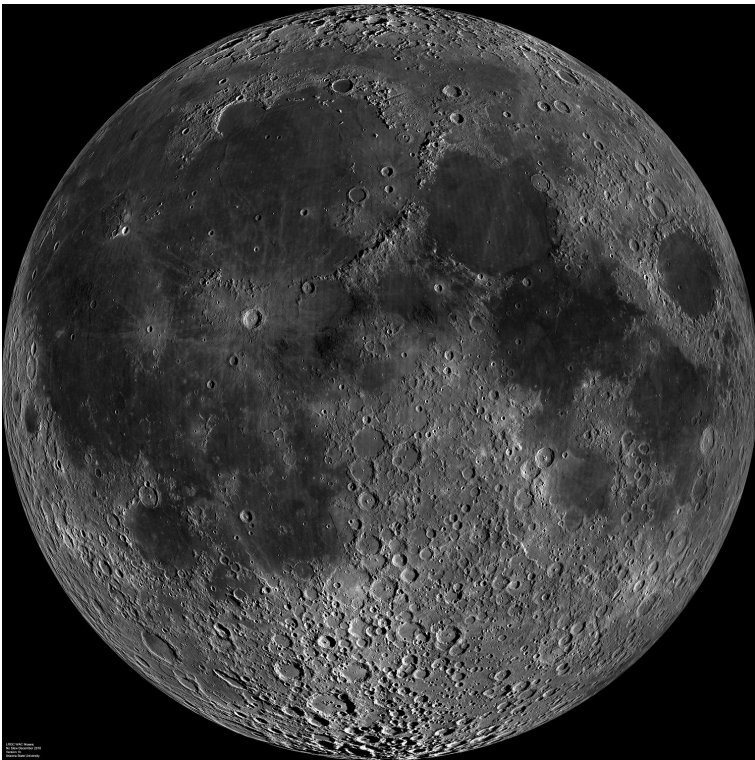


Figure 5. La surface de la Lune (face visible depuis la Terre)

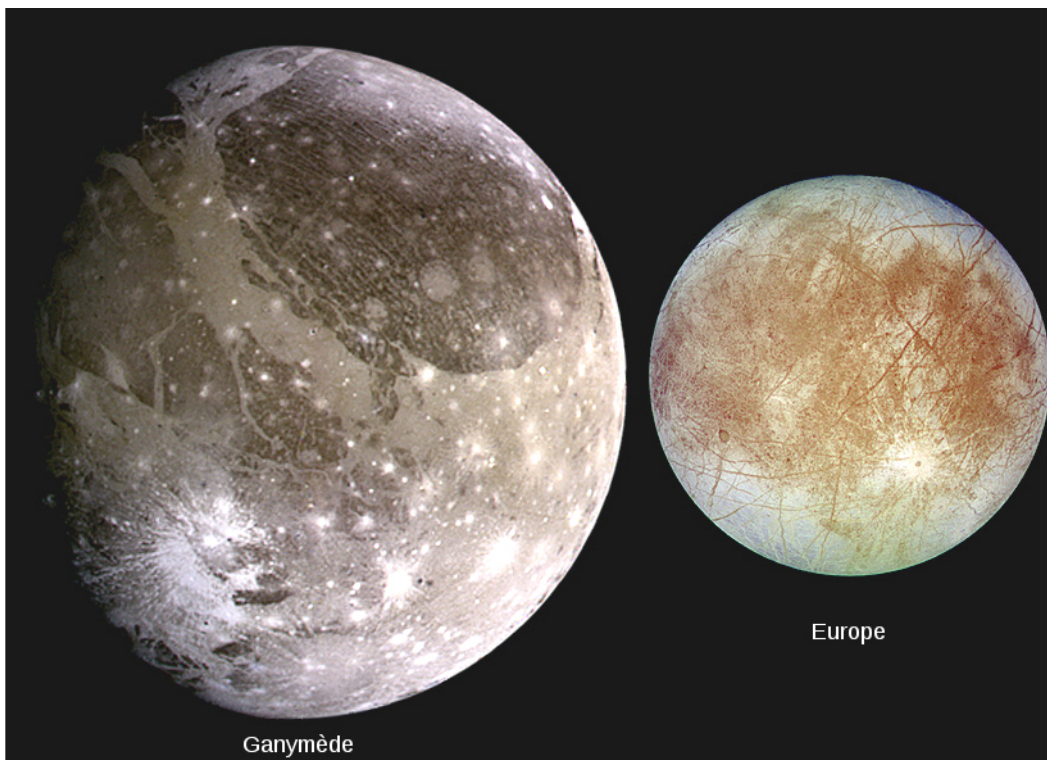


Figure 6. Les surfaces de Ganymède et d'Europe, deux satellites de Jupiter

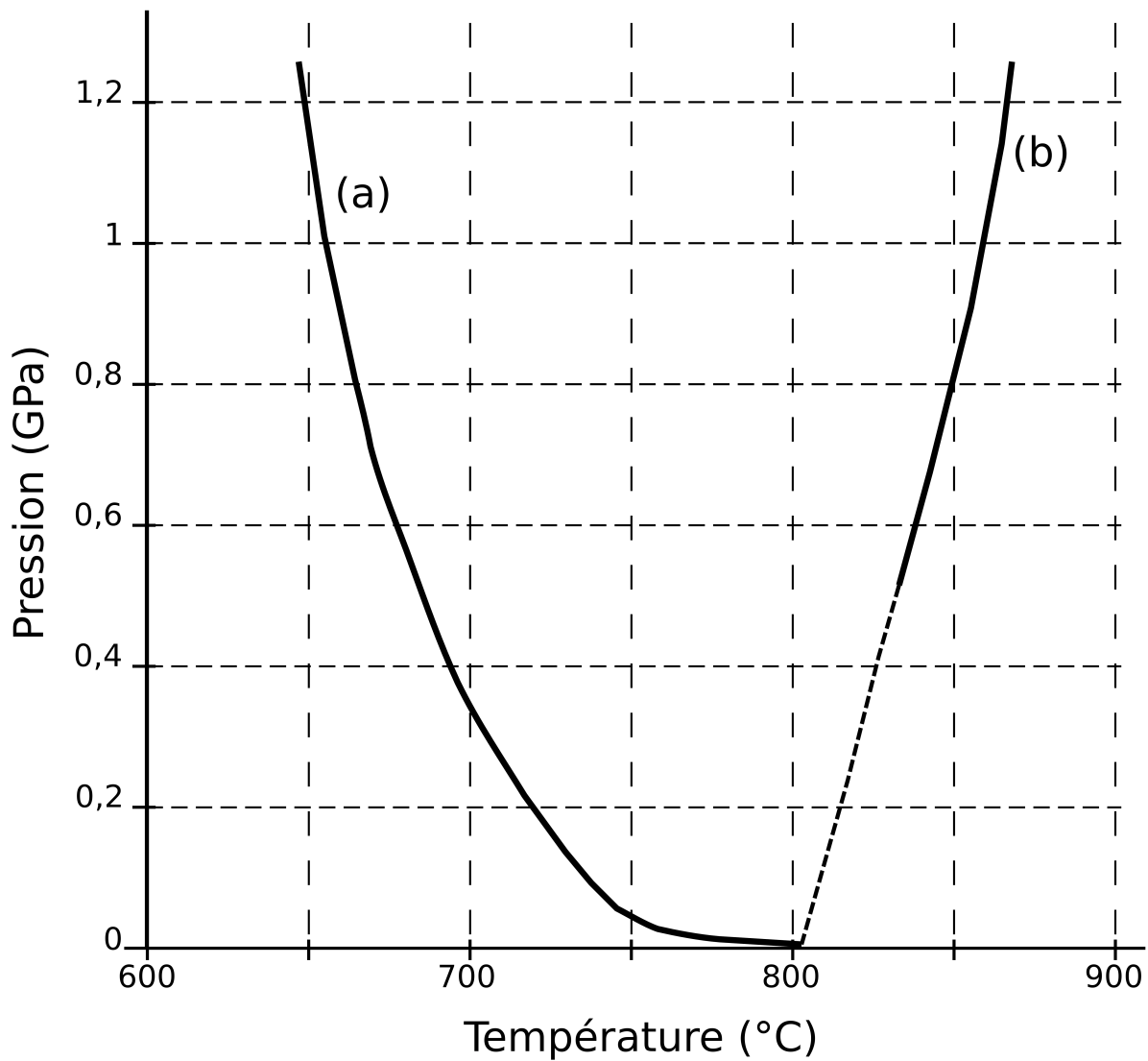


Figure 7. Solidus hydraté (a) et sec (b) d'une croûte continentale de type granito-gneissique

L'ajout d'une composante basique décale les solidus de 50°C (solidus sec) à 100°C (solidus humide) vers les plus hautes températures.

Tableaux et données

Certaines valeurs et formules utiles, jugées classiques, ne sont pas rappelées.

La norme, F , de la force d'attraction exercée sur une masse ponctuelle de masse m posée à la surface d'un corps de masse M et de rayon R est donnée par la formule :

$F = (G.m.M) / R^2$, avec G la constante de gravitation universelle.

L'obliquité de la Terre est de $23,4^\circ$.

La masse du Soleil est de $1,99.10^{30}$ kg

La pression atmosphérique à la surface de Mars varie de 400 à 870 Pa et la température moyenne est de 210 K.

Tableau 1. Données astronomiques de trois planètes du système solaire

	Terre	Mars	Jupiter
Masse (10^{24} kg)	5,97	0,642	1898
Rayon (km)	6371	3391	71490
distance au Soleil (10^6 km)	150	228	279
période de révolution (j)	365,2	687	4331
période de rotation (h)	23,9	24,6	9,9
excentricité	0,017	0,094	0,049

Tableau 2. Données astronomiques de la Lune et de trois satellites de Jupiter

	Lune	Io	Europe	Ganymède
Masse (10^{20} kg)	730	893	480	1482
Rayon (km)	1738	1822	1560	2631
distance à la Terre (10^3 km)	384	-	-	-
distance à Jupiter (10^3 km)	-	422	670	1070
période de révolution (j)	27,32	1,77	3,55	7,15
période de rotation (h)	655,7	42,5	85,2	171,6
excentricité	0,055	0,004	0,010	0,0015