

# Concours BCPST 2017 – ENS et ENPC

## Épreuve écrite de sciences de la Terre – Éléments de correction

### 1 Énergie solaire, saisons, températures sur Terre

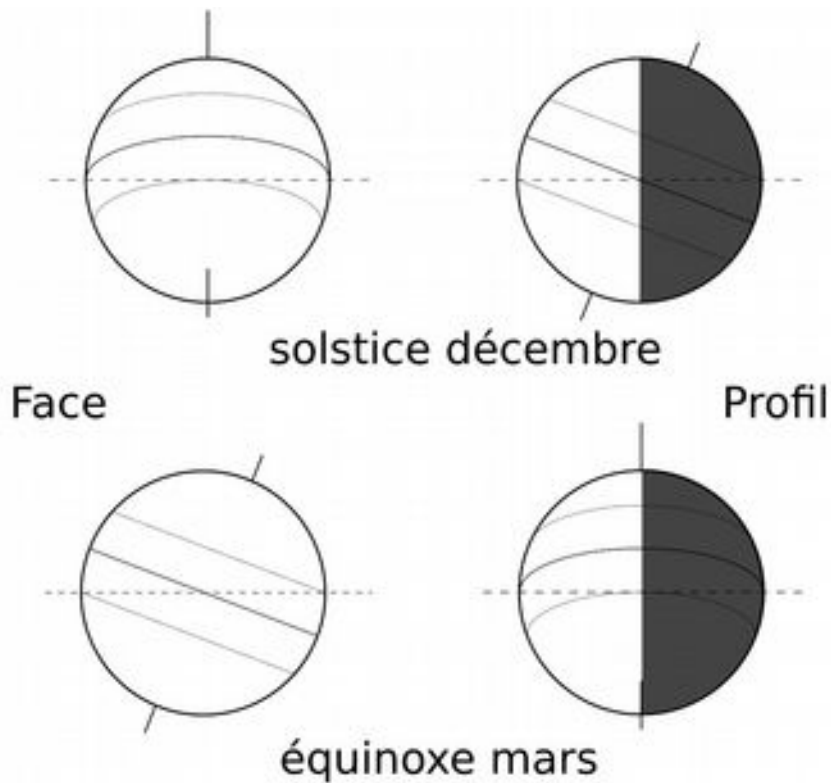
#### 1.1 L'énergie solaire, l'atmosphère et l'eau

L'insolation maximale en zone équatoriale (intertropicale) y explique une surface plus chaude, surface qui chauffe l'atmosphère à son contact, atmosphère réchauffée qui « monte » du fait de sa plus faible densité par rapport à l'atmosphère sus-jacente. Cette ascension atmosphérique équatoriale entraîne une aspiration latérale au sol. C'est le début de la convection atmosphérique qui sépare les deux hémisphères. L'existence de 3 cellules de convection latitudinales dans chaque hémisphère s'explique par l'effet Coriolis.

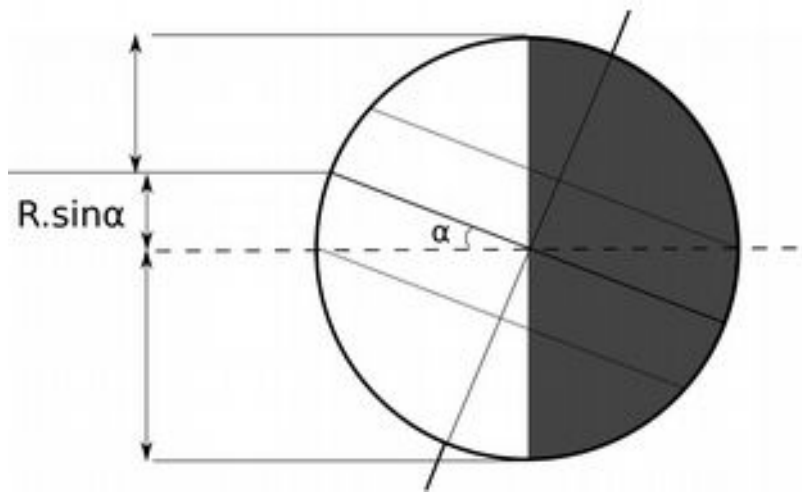
L'évaporation d'eau est un phénomène endothermique (endergonique). La précipitation, exothermique (exergonique), à plus haute latitude d'eau évaporée en zone intertropicale est donc à la fois un transfert de matière mais aussi un transfert d'énergie, en plus du transfert direct de chaleur par l'air « réchauffé ».

Les mouvements atmosphériques de surface (vents) entraînent une mise en mouvement de la surface océanique et expliquent l'organisation des courants de surface (en prenant en compte la déviation d'Eckmann) et certains mouvements verticaux et leur localisation (upwellings).

#### 1.2 Saisons et paramètres orbitaux



Avec des schémas corrects, on voit que les deux hémisphères reçoivent 50 % de l'énergie solaire incidente à l'équinoxe.



Au solstice de décembre (ci-dessus), l'hémisphère Nord reçoit  $1/2.(1- \sin\alpha)$  (~30 %) de l'énergie solaire incidente et l'hémisphère Sud  $1/2.(1+ \sin\alpha)$  (~70 %).

Soit  $E_T$  l'énergie incidente totale reçue par la Terre, à l'équinoxe, chaque hémisphère reçoit autant d'énergie, soit  $E_T/2$ , chaque hémisphère est donc à la même température, la température moyenne de la Terre. Donc pour un hémisphère on peut écrire qu'une énergie reçue égale à  $E_T/2$  induit une température  $T_{moy}$  égale à 15°C.

Au solstice de décembre, l'énergie reçue par l'hémisphère Nord est de  $1/2.(1- \sin\alpha)$ .  $E_T$ , soit seulement  $(1- \sin\alpha)$  de l'énergie reçue à l'équinoxe. Cette baisse d'énergie reçue entraîne une baisse de la température selon la loi de Stefan (la puissance 4 de la température (en K) au solstice n'est plus que  $(1- \sin\alpha)$  la puissance 4 de la puissance à l'équinoxe). On procède de même pour l'hémisphère Sud.

L'ellipticité de l'orbite terrestre fait varier la distance Terre-Soleil, or l'énergie solaire surfacique reçue à une distance donnée varie avec le carré de la distance (l'énergie est conservée sur la surface de la sphère centrée sur le Soleil). La différence de distance engendre donc une différence d'énergie reçue (environ 7 % de différence) et donc une différence de température (toujours selon la loi de Stefan).

Le périhélie étant en janvier, la Terre reçoit alors un peu plus d'énergie que 6 mois plus tard, la température moyenne y est donc légèrement supérieure. Dans l'hémisphère Nord, l'hiver est donc plus chaud / moins froid que s'il se produisait à l'aphélie. Inversement, 6 mois plus tard, l'été de l'hémisphère Nord est moins chaud / plus froid que s'il se produisait au périhélie. Hiver moins froid et été moins chaud, le contraste saisonnier est donc plus faible dans l'hémisphère Nord qu'avec une orbite circulaire. À l'opposé, le contraste saisonnier est accentué dans l'hémisphère Sud (été plus chaud + hiver plus froid).

Le décalage temporel et les écarts de température moindres par rapport aux calculs théoriques indiquent l'existence d'un effet tampon de redistribution temporelle de l'énergie solaire.

## 2 L'eau liquide dans le système solaire

### 2.1 L'eau sur Terre et sur Mars

À la surface de la Terre, à une pression de l'ordre de 0,1 MPa et pour une gamme de température de l'ordre de -50 à +50°C, on peut trouver de l'eau stable à l'état solide (glaciers) et liquide (océans). L'existence d'eau liquide en contact avec une atmosphère gazeuse permet la mise en place d'évaporation (et non pas ébullition) d'eau passant de la phase liquide à la phase gazeuse jusqu'à une pression partielle maximale égale à la pression de vapeur saturante (pression dépendant de la température et lisible sur le diagramme de phase sur la courbe séparant les domaines liquide et gazeux).

Le percement du récipient à la surface de Mars fait passer l'eau initialement liquide à l'état gazeux suite à la baisse de pression, puis à l'état solide suite à équilibrage thermique. Un bref passage par l'état liquide est possible quand la pression atmosphérique martienne est supérieure à la pression du point triple de l'eau.

La recherche de la profondeur à laquelle l'eau libre peut être à l'état liquide sur Mars revient à rechercher la profondeur à laquelle on atteint 0°C, soit 6,3 km (passage de -63 à 0°C en gagnant 10°C par km). La pression correspondant à cette profondeur nécessite de prendre une masse volumique vraisemblable pour les roches martiennes et de déterminer  $g_{\text{Mars}}$ , gravité à la surface de Mars, connaissant le lien entre  $g$ , masse et rayon de la planète, et à partir des données connues pour la Terre (formule et données fournies en annexe). La détermination de la gravité par le même moyen est aussi nécessaire plus loin pour Europe et Ganymède pour déterminer la pression en profondeur.

## 2.2 Europe, satellite de Jupiter recouvert de glace

L'eau liquide est un milieu conducteur. Un tel milieu peut produire un champ magnétique s'il est animé de mouvements et peut aussi être mis en mouvement sous l'action d'un champ magnétique externe et produire un champ induit. Les geysers indiquent l'existence d'eau liquide, soit de manière temporaire lors d'évènements particuliers aboutissant à des geysers, soit de manière permanente avec des pics d'activité expliquant les geysers.

Sur le cliché terrestre, on observe la surface de l'océan, la banquise (glace de mer) et de la glace issue des glaciers antarctiques formant des plateformes glaciaires au débouché des glaciers dans l'océan, plateformes desquelles se détachent parfois des icebergs. On a donc deux glaces différentes, la banquise de faible épaisseur issue du gel de la surface de l'océan et des blocs de glace issus de glaciers continentaux, chacune dépassant pour partie de la surface de l'océan et comprenant une partie immergée dans des proportions respectant la loi d'Archimède. Sur Europe on a une surface englacée qui peut se craqueler et mettre à nu la surface liquide qui va alors geler. On observe une différence d'altitude entre deux glaces d'épaisseurs différentes, analogues des icebergs et de la banquise terrestres. La différence d'altitude permet d'estimer l'épaisseur de la croûte de glace à 33,6 km, soit moins que les 100 km de la couche d'eau à la surface d'Europe. Il existerait donc de l'eau liquide à 0°C sous la glace. Connaissant l'épaisseur de la couche d'eau et après calcul de la gravité la surface d'Europe on en déduit la pression à la limite eau / roche, pression à laquelle de l'eau à 0°C (hypothèse de convection donc de faible écart de température) est liquide. Ce contact eau liquide / roche rappelle le contact eau / roche au fond des océans terrestres.

## 2.3 Énergie interne et effets de marée

L'application de la formule pour le Soleil et la Lune montre que cette dernière est responsable de 68 % de la déformation radiale sur Terre.

Sur la Lune l'effet du Soleil est négligeable (0,55%) par rapport à l'effet de la Terre. Pour une orbite circulaire de la Lune autour de la Terre, la Lune serait déformée mais on n'observerait pas de phénomène cyclique de marée du fait de la révolution synchrone (la Lune montre toujours la même face à la Terre).

L'ellipticité engendre un effet de marée du fait de forces variables entre périégée et apogée. L'écart de potentiel de déformation entre périégée et apogée permet le calcul du nombre de Love pour la Lune.

Sur Europe, la variation radiale de 50 m permet, après détermination de l'écart de potentiel de déformation entre périastre et apoastre, de calculer un nombre de Love de 1,23.

Le potentiel de déformation sur Europe dû à Jupiter est plus élevé que ce potentiel de déformation sur Terre, même si on prend en compte non pas le potentiel mais l'écart de potentiel lié à l'ellipticité de l'orbite d'Europe. Le nombre de Love sur Europe est environ 2 fois celui sur Terre mais la déformation absolue est beaucoup plus importante, même avec un rayon plus faible, car la couche superficielle d'eau de 100 km est bien plus déformable que les roches terrestres.

On calcule un flux terrestre d'origine radioactive de l'ordre de 20,4 TW. Après calcul de la masse silicatée d'Europe (on enlève la masse de la couche d'eau superficielle), en considérant un même flux massique, on obtient un flux géothermique de 154 GW pour Europe à la base de la couche d'eau.

Le flux géothermique liés aux effets de marées peut être estimé, par comparaison avec Io et en prenant bien le rayon de la seule partie silicatée d'Europe, à 4,8 TW. Le flux géothermique minimal nécessaire au maintien d'eau liquide et déterminé avec une croûte de glace de 33,6 km sur Europe est de 850 GW.

Le flux géothermique lié à la désintégration radioactive est donc largement insuffisant pour expliquer la présence d'eau liquide sur Europe alors que l'effet de marée exercé par Jupiter sur les roches d'Europe génère un flux de friction largement suffisant. Ceci conforte l'idée de présence d'eau liquide sur Europe.

Pour Ganymède, un flux géothermique d'origine radioactive de l'ordre de 333 GW peut être calculé mais le flux lié à l'effet de marée de Jupiter est bien plus faible que pour Europe (9,6 GW) car Ganymède est plus loin de Jupiter et a une orbite moins elliptique.

Après calcul de la gravité sur Ganymède, on détermine une pression à 800 km de profondeur incompatible avec la présence d'eau liquide au contact de la roche, on est dans le domaine des glaces de haute pression.

Sur Europe, l'absence de cratère est le signe d'un renouvellement de la surface ce qui est cohérent avec l'existence d'eau liquide et d'une activité de surface de type geysier.

La présence d'eau liquide au contact de roches silicatées est compatible avec l'apparition d'une vie chimolithotrophe.

### **3 Eau et fusion de la croûte continentale**

La déshydratation de la lithosphère océanique hydratée entrée en subduction et soumise au métamorphisme apporte de l'eau supercritique enrichie en éléments mobiles au manteau et en favorise la fusion.

En reportant le géotherme sur le diagramme des solidus sec et hydraté de la croûte et en distinguant croûtes supérieure et inférieure, on en déduisait une possible fusion hydratée en base de croûte supérieure ainsi que dans la croûte inférieure à condition qu'elle soit bien hydratée et granito-gneissique. Pour les domaines plus basiques de la croûte inférieure la fusion est moins probable car ces domaines nécessitent des températures plus élevées et/ou sont généralement bien moins hydratées.

Avant rééquilibrage thermique, l'amincissement de la croûte amène à un nouveau géotherme décalé vers les basses pressions. Ce décalage défavorise la fusion hydratée mais rend plus facile la fusion « sèche » de la croûte inférieure.

Les magmas obtenus ont des viscosités variables selon leur origine plus acide ou plus basique et selon leur température de formation. De plus, en fusion hydratée, une baisse de pression fait recouper le solidus et favorise donc la recristallisation en profondeur.