

Concours BCPST 2017 – Écoles normales supérieures et ENPC

Épreuve écrite de sciences de la Terre – Rapport du jury

Ecoles concernées :

ENS Paris-Saclay, ENS de Lyon, ENS (Paris), Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC)

Coefficients (en pourcentage du total d'admission) :

- ENS de Paris-Saclay : 3,1 %
- ENS de Lyon : Option biologie : 6,6 % , Option ST : 13,2 %
- ENS (Paris) : Option biologie : 1,4 % , Option ST : 3,5 %
- ENPC : 3,8%

Membres du jury :

- Armelle Baldeyrou-Bailly, professeur agrégé, université de Strasbourg
- Sylvain Bernard, chargé de recherche CNRS, MNHN
- Matthias Delescluse, maître de conférence, ENS de Paris
- Olivier Dequincey, professeur agrégé, ENS de Lyon
- Laurent Remusat, chargé de recherche CNRS, MNHN
- Mathieu Rodriguez professeur agrégé, ENS de Paris
- Gérard Vidal, maître de conférence, ENS de Lyon

1. Remarques générales sur le sujet et les copies

Le sujet comprenait trois parties indépendantes. Dans chaque partie des questions introductives avaient été conçues pour permettre aux candidats de rappeler des bases sur lesquelles s'appuyer pour la suite. Ce ne fut pas toujours le cas tant certaines bases semblent loin d'être maîtrisées. L'essentiel des questions menaient à des estimations, les réponses devant expliquer des principes, expliquer les simplifications envisagées avant de quantifier et de réaliser des applications numériques.

En ce qui concerne les explications attendues, il semble bon de rappeler que réécrire une proposition interrogative ou impérative fournie dans le sujet en une proposition affirmative ne constitue en aucun cas une démarche d'argumentation, surtout lorsque cette réécriture s'avère approximative ou entachée d'erreur. De même, tout ne pouvant pas être redémontré, le fait d'expliquer, ou de tenter d'expliquer, un fait donné pour acquis dans l'énoncé ne rapporte aucun point. Le jury déplore encore les erreurs trop fréquentes lors des applications numériques. Les données doivent généralement, pour obtenir le bon résultat chiffré, être exprimées en unités du système international. Pour cela, il faut non seulement connaître ces unités (c'est le mètre pour les longueurs)

mais aussi maîtriser les multiples et sous-multiples. Nouveauté cette année, le jury a relevé de nombreuses erreurs concernant l'utilisation des températures. Si chacun semble avoir désormais compris qu'une température de 20°C correspond à une température de 293(,1)K (valeur à utiliser effectivement dans les calculs), il semble que certains candidats imaginent qu'un différentiel de température de 20°C correspond à un différentiel de 293K, ce qui revient en toute logique à affirmer qu'une température, exprimée en °C, stationnaire entre deux états (écart de 0°C) correspondrait, exprimée en K, à une augmentation de 273K ! Il ne s'agit nullement ici de faire un catalogue des « perles de correction », mais le jury souhaite rapporter les faits trop fréquemment rencontrés pour qu'ils puissent être seulement attribués au stress du concours.

Si quelques rares brouillons raturés persistent, les copies sont très majoritairement assez bien écrites et présentées. Des schémas sont parfois proposés même lorsqu'ils ne sont pas explicitement demandés. Cette démarche est à encourager, même s'il faut alors prendre soin à leur qualité qui reflète, pour le correcteur, la maîtrise du sujet.

Certains candidats ont cherché les questions « faciles » pour glaner des points, stratégie acceptable pour un concours mais qui a pour limite le fait que certaines questions ne se révèlent au final « accessibles » que lorsque d'autres, un peu plus ardues, ont été résolues auparavant. Sur l'ensemble des copies corrigées, des réponses exactes ou acceptables ont été données à toutes les questions. Les meilleures copies sont celles de candidats qui n'ont pas nécessairement traité l'intégralité du sujet, mais ont maîtrisé la cohérence d'une ou plusieurs parties du sujet en étant capable de répondre à des enchaînements de questions. Des démarches rigoureuses, parfois aussi inattendues que percutantes, montrent la maîtrise de contenus et de méthodes qui permettent à certains candidats d'aborder les questions avec sérénité.

2. Remarques partie par partie

2.1 Énergie solaire, saisons, températures sur Terre

Il s'agissait ici d'expliquer les mécanismes de redistribution latitudinale de l'énergie solaire. Cette redistribution est globalement comprise même si, dans les détails, l'existence de 3 cellules convectives atmosphériques et leur imbrication n'est pas toujours maîtrisée. Par la suite, on se proposait de quantifier les écarts de température moyenne entre les hémisphères en fonction de la saison (obliquité) et de la distance au Soleil (ellipticité). L'écueil majeur fut la représentation de l'éclairement du disque terrestre en fonction des saisons : très peu de candidats proposent 4 schémas demandés corrects, quelques-uns n'en sont pas loin, nombreux sont ceux qui n'ont pas répondu. Au final, la moitié des candidats propose au moins un schéma utile pour la suite des questions (solstice) mais peu l'utilisent correctement. En effet, l'erreur la plus commune commise par les candidats est de rappeler à juste titre que l'énergie solaire reçue par unité de surface varie selon la latitude, mais, malgré ce rappel pertinent, de comparer les surfaces éclairées pour en déduire les énergies reçues par chacun des hémisphères. Pour prendre une métaphore, cela revient à observer que les billets de banque n'ont pas tous la même valeur, mais à compter ensuite le nombre de billets contenus dans des portefeuilles pour en déduire la richesse contenue dans chacun d'eux. Par la suite, il était possible de comparer les écarts de température induits par l'obliquité à ceux, bien plus faibles, liés à l'ellipticité. Enfin, l'existence d'effets tampon (océans, sols) permettait d'expliquer en partie la faiblesse des contrastes de température observés par rapport aux écarts théoriques calculés.

2.2 L'eau liquide dans le système solaire

Cette partie étudiait les états de l'eau en fonction de pression et température et cherchait à déterminer les conditions de présence et de maintien d'eau liquide sur plusieurs corps du système solaire.

Rappelons que la présence d'eau liquide à la surface de la Terre d'eau sous les états solide, liquide et gazeux ne découle pas directement de la lecture du diagramme de phase, il est nécessaire de prendre en compte la notion de pression de vapeur saturante (dont la valeur peut être déterminée sur le diagramme). Pour expliquer la présence de vapeur d'eau, nul besoin de faire appel à des températures de surface supérieures à 100°C ou à la décompression avec l'altitude, auxquels cas nulle vapeur d'eau n'existerait sous 100°C ou à basse altitude (pas facile de faire sécher son linge en bord de mer). La petite expérience martienne devait montrer des changements de phase inhabituels, une ébullition à basse température suivie d'un passage à l'état solide avec passage préalable par l'état liquide en cas de pression supérieure à celle du point triple. La recherche de la profondeur à laquelle l'eau libre pouvait être à l'état liquide sur Mars nécessitait de remarquer que la température était le facteur principal (limite eau/glace quasi-« verticale ») donc que l'on cherchait la profondeur à laquelle on atteignait 0°C en suivant le gradient thermique de surface. Pour déterminer, la pression à la profondeur correspondante, la détermination préalable de « g » était nécessaire (formule et données fournies dans les annexes), comme plus loin pour Europe et Ganymède.

Sur Europe, la présence d'une couche d'eau liquide, molécule dipolaire, éventuellement salée (échange avec les roches silicatées) tout autour de ce satellite permet d'envisager l'existence d'un champ magnétique propre si cette eau est en mouvement ou bien sa mise en mouvement par le champ magnétique jovien induisant un champ magnétique induit. Ce corps pour lequel l'existence d'activité au moins temporaire est montrée par les geysers, montre une surface glacée avec deux altitudes moyennes analogue à une plateforme de glace fracturée dont les blocs flottent sur une mer elle-même gelée. L'épaisseur de la couche de glace permet de montrer qu'il y a de l'eau liquide qui, à 0°C et à faible pression (100km d'eau sur un corps de faible gravité) peut être liquide au contact des silicates, comme l'est l'eau océanique au contact des fonds marins terrestres.

L'étude des déformations liées à l'attraction des corps du système solaire les uns sur les autres permettait de mettre en évidence les effets combinés et relatifs de la masse et de la distance. Pour les corps en orbite synchrone (Lune autour de la Terre, Europe autour de Jupiter) les déformations seraient constantes en orbite circulaire et des effets de marée n'apparaissent que du fait de l'ellipticité des orbites des corps déformés. Rappelons que lorsqu'on étudie les marées sur Terre, on doit se poser la question de la position d'un point terrestre par rapport au corps attracteur et non pas la position de l'attracteur par rapport à la Terre. Ainsi, avec la Lune, un point terrestre se trouve deux fois par jour en position particulière : une fois « au plus proche » avec une attraction maximale et une fois « au plus loin » avec une attraction minimale. Proposer, en première approximation, deux marées terrestres par jour, voire une seule si on omet la position « au plus loin », montre qu'on a raisonné dans le bon repère alors que beaucoup proposent une marée terrestre par mois lunaire (position particulière de la Lune par rapport à la Terre... à considérer pour les marées lunaires dues à la Terre et pas l'inverse). Pour les comparaisons des énergies de désintégration radioactive, c'est la masse silicatée qui devait être comparée et non pas la surface des corps. Pour Ganymède, sa plus grande distance à Jupiter et son orbite moins elliptique expliquent une énergie de marée bien plus faible. La forte épaisseur de glace permet d'atteindre le domaine des glaces de haute pression au contact avec le cœur silicaté. Faible énergie disponible et épaisseur d'eau liquide limitée expliquent la surface peu active de Ganymède, plus proche de celle de la Lune que de celle d'Europe. Ici et ailleurs, certains candidats se perdent dans

des calculs ou s'engagent sur des voies erronées parce qu'ils n'ont pas fait appel à leur bon sens ou à leurs connaissances générales avant de se lancer dans une phase calculatoire.

2.3 Eau et fusion de la croûte continentale

Après un rappel sur l'apport d'eau supercritique enrichie en éléments mobiles au manteau par la déshydratation de la lithosphère océanique hydratée entrée en subduction et soumise au métamorphisme, il s'agissait de s'intéresser à la possible fusion de la croûte continentale.

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 hydratés.

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.

Cette partie a favorisé les candidats qui l'ont traitée avec attention, mais elle a souvent été négligée ou abordée superficiellement probablement par manque de temps.

Concours BCPST 2017 – ENS et ENPC

Épreuve écrite de sciences de la Terre – Éléments de correction

1 Énergie solaire, saisons, températures sur Terre

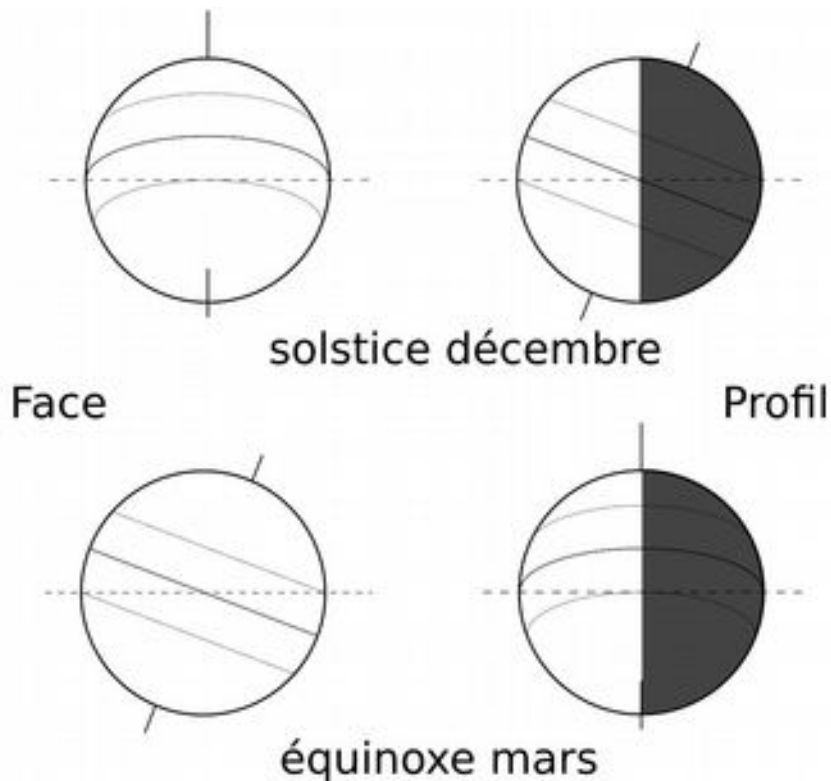
1.1 L'énergie solaire, l'atmosphère et l'eau

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.

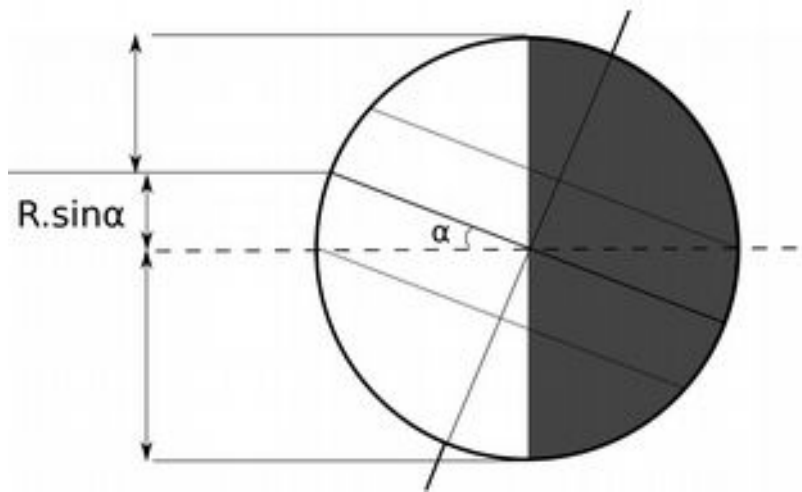
L'évaporation d'eau est un phénomène endothermique (endergonique). La précipitation, exothermique (exergonique), à plus haute latitude d'eau évaporée en zone intertropicale est donc à la fois un transfert de matière mais aussi un transfert d'énergie, en plus du transfert direct de chaleur par l'air «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