

## **RAPPORT SUR L'ÉPREUVE ECRITE DE SCIENCES DE LA TERRE**

Écoles concernées: ENS (Paris) – ENS de Lyon – ENS Paris-Saclay – ENPC

Coefficient (en pourcentage du taux d'admission):

ENS Paris: 1,4% (option biologie) | 3,5% (option Sciences de la Terre)

ENS Lyon: 6,6% (option biologie) | 13,2% (option Sciences de la Terre)

ENS Paris-Saclay: 3,1%

ENPC: 3,8%

Membres du jury: Alexandre Aubray, Armelle Baldeyrou-Bailly, Sylvain Bernard, Kristel Chanard, Olivier Dequincey, Pierre Dublanchet, Stéphanie Durand, Patrick Meunier, Simon Bufférol, Jean-Arthur Olive.

### **Remarques générales**

Le sujet portait sur la modulation exercée par l'hydrosphère sur différents processus clés de la Terre interne, allant de la production magmatique à l'activité sismique, en passant par l'orogénèse. Il couvrait ainsi de larges pans du programme de sciences de la Terre (magmatisme, gravimétrie, sismologie, cycle du carbone...), tout en privilégiant une approche quantitative incitant les candidats à mobiliser des compétences acquises en physique (thermodynamique, bilans de forces), chimie (solutions aqueuses), et mathématiques (équations différentielles). Les 3 parties étaient totalement indépendantes, cependant beaucoup de candidats ont traité les problèmes dans l'ordre du sujet. Par conséquent, les parties 3.2 et 3.3 ont été très peu abordées. Globalement, une grande majorité des questions a reçu une réponse correcte par au moins un candidat.

Les correcteurs saluent une meilleure compréhension et application du concept d'isostasie par rapport aux années précédentes. Les résolutions d'équations différentielles ont également été relativement bien menées. En revanche, les réponses ne sont pas toujours bien justifiées, et si certaines définitions vues en cours sont bien restituées, leur application et leur compréhension posent parfois question. C'est notamment le cas des mécanismes au foyer et des différentes anomalies de gravité. L'écriture de réactions chimiques équilibrées a posé problème à de trop nombreux candidats. Les correcteurs notent un niveau globalement faible en tectonique et géologie structurale, qui se reflète notamment dans la qualité des coupes, qui laisse particulièrement à désirer. Celles-ci manquent systématiquement d'échelle et/ou d'orientation, et n'ont souvent aucun sens au regard du contexte tectonique étudié.

Beaucoup de candidats manquent de distance critique vis à vis de leurs résultats numériques. Si une application numérique donne un résultat aberrant, comme par exemple une vitesse d'expansion océanique de 3 km/an ou une épaisseur de croûte de 500 mètres, mieux vaut en faire état dans la copie que de laisser le résultat tel quel. L'analyse dimensionnelle —un outil

puissant qui devrait aider les candidats à acquérir ce recul critique— a trop souvent été utilisée de façon abusive, c'est à dire en substitution d'un calcul rigoureux. Enfin, les correcteurs relèvent encore beaucoup d'erreurs quant aux noms standards des unités associées à différents ordres de grandeur ( $10^6 = \text{mega-}$ ,  $10^9 = \text{giga-}$ , etc...).

La présentation et le soin font encore trop souvent défaut. Si une réponse concise est souvent appréciée, elle ne doit pas se faire au détriment de la grammaire ni de la syntaxe (sans parler de l'orthographe...). Certains candidats se contentent de réponse "télégraphiques" sans verbe ni conjonction, ce qui ne facilite pas le travail des correcteurs. Beaucoup de schémas et coupes sont très approximatifs, et ne remplissent pas leur rôle premier qui est d'illustrer une information complexe pour la clarifier. Le jury envisage ainsi de davantage pénaliser les copies non soignées dans les années à venir.

## **Partie I: Remarques et éléments de correction**

Cette partie s'intéressait à l'hypothèse d'une amplification de l'activité magmatique islandaise par la dernière déglaciation (23–10 ka). Elle s'inspirait ainsi de l'étude de *Jull & McKenzie* (1996, *Journal of Geophysical Research*), qui modélisait l'impact d'un "surplus de décompression" lié à la fonte d'une calotte glaciaire sur le processus de fusion partielle par décompression adiabatique qui prévaut sous les dorsales océaniques.

La partie 1.1 avait pour but d'établir le contexte du problème et de discuter l'observation d'une amplification du magmatisme à partir de données de terrain. Aucune copie n'a parfaitement répondu à la toute première question. Le mécanisme de fusion partielle par décompression adiabatique d'un manteau péridotitique sec semble mal maîtrisé. Trop de candidats ont évoqué un mécanisme de fusion par hydratation du manteau, d'origine hydrothermale, ou en invoquant parfois une "plaque plongeante" en contexte de dorsale! Le schéma du géotherme et du solidus a également posé beaucoup de problèmes, sans que les candidats ne s'en rendent nécessairement compte. Ainsi, beaucoup de schémas suggéraient un manteau intégralement fondu au delà d'une certaine profondeur... L'exploitation des documents a également été source de confusion. Certains candidats ont proposé des méthodes de datation plus ou moins fantaisistes ("Carbone 16", "fossiles dans la lave", etc...). Beaucoup de copies se sont contentées de comparer l'étendue surfacique des coulées de laves présentées en Figure 1 en oubliant de mentionner leurs ages, information pourtant essentielle pour établir des flux d'effusion (surface ou volume de lave émise par unité de temps).

Les calculs de la partie 1.2, pourtant très guidés, ont posé problème dans de nombreuses copies, et ont donné lieu à des justifications peu rigoureuses. L'orientation imposée de l'axe vertical ( $z$  positif vers le bas) a conduit à des erreurs de signe. Ces difficultés sont également liées à une mauvaise compréhension de la fusion par décompression adiabatique, déjà apparente dans les réponses à la question 1.1.1. Peu de candidats ont par exemple compris la nécessité d'avoir  $dT/dz_a < dT_s/dz$  pour que la fusion puisse avoir lieu. Une autre étape clé de la partie 1.2 est la simplification du terme  $V$  (vitesse d'expansion) dans l'équation de l'épaisseur crustale  $Hc$ . Si la plupart des candidats ont correctement effectué ce calcul, très peu en ont compris le sens (question 1.2.7), qui est que l'épaisseur de la croûte océanique ne dépend pas du taux d'expansion. Encore moins font le lien avec le fait que la croûte océanique ait une épaisseur

quasi uniforme d'environ 6 km dans tous les océans, que la dorsale soit rapide ou lente (sauf à certains segments de dorsales lentes et ultra-lentes, une nuance non exigible).

Globalement, les valeurs de paramètres données dans la partie 1.2 devaient permettre d'estimer une épaisseur de croûte de 5,8 km en conditions "normales" ( $z_M = 60$  km), et de 19,6 km pour un manteau anormalement chaud qui commence à fondre à  $z_M = 110$  km (question 1.2.8). La question 1.2.9 permettait de relier  $z_M$  à  $T_M$ , et particulièrement de montrer que  $z_M = 60$  km correspond à  $T_M = 1394^\circ\text{C}$ , et que  $z_M = 110$  km correspond à  $T_M = 1479^\circ\text{C}$ . Ainsi une anomalie de température du manteau supérieure à  $1479 - 1394 = 85^\circ\text{C}$  implique  $z_M > 110$  km, ce qui garantit  $H_c > 19.6$  km. Une telle anomalie est cohérente avec la présence d'un point chaud sous l'Islande. La partie 1.3 permet de comparer le taux de décompression dû à la déglaciation ( $\rho_{\text{glace}} \cdot g \cdot \text{épaisseur}_{\text{glace}} / \tau_F = 2.0 \times 10^{-5}$  Pa/s) au taux de décompression dû à l'ascension du manteau ( $\rho_{\text{manteau}} \cdot g \cdot V = 1.0 \times 10^{-5}$  Pa/s). Pendant la déglaciation, le manteau subit ainsi une décompression "effective" deux fois plus rapide qu'en dehors d'une période de déglaciation. La production de magma supplémentaire (=2 fois la production moyenne) vient s'ajouter à la production moyenne. Le flux total de magma produit, qui est proportionnel au taux effectif de décompression est ainsi multiplié par  $\sim 3$  pendant la phase de déglaciation. Le modèle présenté en Figure 2 reflète ce comportement de premier ordre: les phases de déglaciation plus rapides (par exemple vers 11 ka) sont associées à un apport magmatique plus fort (question 1.3.4). Ce modèle inclut également l'effet du temps d'ascension du magma. Plus le magma met du temps à monter de la zone de production jusqu'aux chambres magmatiques crustales, plus le pic d'apport magmatique est décalé par rapport à la phase de déglaciation (question 1.3.5, Figure 2).

## **Partie II: Remarques et éléments de correction**

Cette partie portait sur différentes rétro-actions entre orogénèse et climat mettant en jeu différents processus de surface (érosion et altération des silicates).

La partie 2.1 portait sur la collision himalayenne, et permettait de tester la maîtrise de notions comme l'équilibre isostatique et les anomalies gravimétriques. La grande majorité des candidats ne pense pas à invoquer flexure élastique de la lithosphère pour expliquer d'éventuelles déviations par rapport à l'isostasie. Les concepts d'ellipsoïde de référence, géoïde et modèle PREM semblent également mal compris. Outre ces faiblesses en gravimétrie déjà évoquées plus haut, la partie 2.1 a exposé d'importantes lacunes en tectonique. Les notions de convergence, collision et compression semblent être des synonymes dans la plupart des copies, et leur implication en terme d'épaississement crustal est très rarement compris. Les candidats n'ont manifestement pas une idée claire de la structure de premier ordre d'une zone de collision, ni de la façon dont celle-ci peut évoluer dans le temps (par exemple par le développement d'un nouveau front de déformation qui élargit l'orogène, cf. question 2.2.14)

La partie 2.2 visait à utiliser le concept d'isostasie pour modéliser l'évolution temporelle d'un relief, en le combinant à un modèle d'érosion très simplifié inspiré du modèle de *stream power* (Whipple & Tucker, 1999, *Journal of Geophysical Research*). L'équation différentielle décrivant l'évolution du système (questions 2.2.4 et 2.2.6) s'écrit  $\partial R / \partial t = ((\rho_m - \rho_c) / \rho_m) \cdot (F_A / w - 2CR)$ . Le paramètre  $C$  peut s'écrire  $C = KP^m$  (question 2.2.5), et peut ainsi

augmenter si le taux de précipitation  $P$  augmente.  $C$  peut également augmenter si la tectonique porte à l’affleurement des roches plus faciles à dégrader et éroder, sans que le climat ne varie (question 2.2.10).

Enfin, la partie 2.3 évaluait des connaissances normalement acquises sur l’altération des silicates, et s’inspirait du débat entre *Raymo & Ruddiman* (1992, *Nature*) et *Molnar & England* (1990, *Nature*), qualifié de “l’œuf ou la poule”. Pour les premiers, l’orogénèse himalayenne a pu refroidir le climat global au Cénozoïque en portant à l’affleurement des silicates dont l’altération a piégé du CO<sub>2</sub> atmosphérique. Les seconds font remarquer qu’un refroidissement climatique, en favorisant notamment l’incision profonde du relief par des glaciers, peut accentuer le soulèvement isostatique des sommets montagneux. La réalité combine certainement des éléments des deux modèles dans différentes boucles de rétroaction. La connaissance de ce débat n’étant bien sûr pas attendue, la question 2.3.7 visait davantage à évaluer la capacité de réflexion des candidats. Elle a malheureusement trop souvent donné lieu à des développements peu clairs et parfois farfelus. Les questions moins ouvertes ont également posé problème dans un certain nombre de copies. Les notions d’altération et d’érosion sont rarement définies et distinguées de façon précise. Les équations chimiques sont trop souvent mal équilibrées.

### **Partie III: Remarques et éléments de correction**

Cette dernière partie s’intéressait à la modulation du taux de sismicité au front de l’Himalaya par les variations hydrologiques saisonnières. Cette modulation quasi-périodique est bien visible dans la Figure 6C, mais n’a pas été identifiée par de nombreux candidats. De nombreuses copies ont en effet interprété la variabilité de la sismicité en termes de “processus de collision” ou “d’effondrement”, ou à l’occurrence de répliques après un grand séisme, sans mentionner la périodicité du signal et sans s’interroger sur l’échelle de temps de l’observation.

Beaucoup de candidats semblent ignorer qu’un pendage de faille se mesure classiquement à partir de la direction horizontale, ce qui a conduit à des erreurs dans l’expression de la largeur de la faille et du moment sismique (question 3.1.5). Celui-ci devait donner une magnitude de moment  $M_w \sim 9.2$ , soit une magnitude comprise entre le séisme de Tohoku (2011) et celui de Sumatra (2004). De façon générale, les bases de sismologie et de rhéologie ne semblent pas bien acquises. La notion de contrainte est encore mal maîtrisée, et beaucoup de confusion subsiste entre ondes P et ondes S, et sur la définition d’une onde transversale et longitudinale. Si les formules des vitesses sont globalement bien restituées, les paramètres qu’elles mettent en jeu sont rarement compris.

L’objet de la partie 3.2 était d’utiliser l’analogie d’un bloc en contact frictionnel sur un plan incliné pour représenter une faille, et ainsi comprendre l’effet d’un chargement en surface sur la rupture. Le bilan de forces montre en effet qu’une augmentation de la masse du bloc (représentant une accumulation d’eau en surface pendant la saison des pluies) inhibe le glissement sur la faille. La partie 3.3 permet d’exploiter des données gravimétriques issues de la mission spatiale GRACE, qui témoignent d’une fluctuation saisonnière du champ de gravité (Figure 7) sur tout le front himalayen. Celle-ci est principalement liée à l’accumulation de masse d’eau à la surface et dans la sub-surface pendant la mousson asiatique.