

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 total d'admission) :

ENS Paris-Saclay : 3,1%

ENS Lyon : 6,6% en option bio – 13,2% en option ST

ENS Paris : 1,4% en option bio – 3,5% en option ST

ENPC : 3,8%

MEMBRES DU JURY : Alexandre Aubray, Armelle Baldeyrou-Bailly, Sylvain Bernard, Kristel Chanard, Olivier Dequincey, Pierre Dublanquet, Stéphanie Durand, Patrick Meunier.

Remarques préliminaires

L'épreuve de sciences de la Terre a été marquée par une erreur de consigne sur la page de garde. Il y était en effet indiqué que les calculatrices n'étaient pas autorisées, alors que le sujet avait été conçu en considérant que les candidats auraient accès aux calculatrices. Lors de la correction, nous avons constaté que cette erreur de consigne n'avait que peu impacté les performances des candidats (la conséquence principale ayant été de ralentir les candidats lors des calculs à faire à la main) et n'avait pas rompu le principe d'égalité entre candidats.

Face à cette situation, les candidats ont développé une stratégie tout à fait efficace. Ils ont effectué les calculs jusqu'aux expressions littérales, puis ont décidé de faire ou non l'application numérique en fonction de la situation. Certains calculs étaient très simples (addition, moyenne pondérée, multiplication et division simples...) et ont donc été effectués par l'immense majorité des candidats. Quand le candidat l'estimait nécessaire, il a procédé aux simplifications et arrondis permettant de réaliser son calcul à la main et d'obtenir des ordres de grandeur raisonnables. Deux questions étaient irréalisables sans calculatrice, et n'ont été traitées par aucun candidat.

Le jury a bien entendu tenu compte de cette situation dans l'évaluation des copies, en ayant l'objectif de ne léser ni les candidats ayant pris du temps à faire les calculs, ni les candidats les ayant sauté. Cela a été possible pour plusieurs raisons :

- la longueur importante du sujet, qui a permis à tout candidat qui ne savait pas faire les calculs à la main de ne pas être désœuvré. Les candidats ont pu se déporter sur des questions plus valorisantes pour eux. On remarque toutefois qu'aucun candidat n'a sauté les calculs les plus simples (opérations arithmétiques de base) et qu'ainsi tous ont traité à peu près les mêmes questions.
- le barème était bien sûr construit pour valoriser d'abord les expressions littérales. Ainsi l'on pouvait s'arrêter aux expressions littérales et bénéficier des points afférents.

- enfin les simplifications, approximations et arrondis effectués par les candidats ont bien sûr été acceptés, et ont permis, en cas de calcul fait et d'approximation raisonnable, d'obtenir la totalité des points afférents à l'application numérique.

Le jury tient à féliciter les candidats pour les compétences que certains ont démontrées sur les aspects calculatoires. En plus d'être capables de faire la plupart des calculs demandés à la main, les candidats ont usé de toutes les stratégies possibles pour simplifier et adapter leurs calculs tout en obtenant des résultats très proches de ceux attendus. À l'autre bout du spectre, certains candidats ont au contraire été incapables de faire les calculs les plus simples. On s'étonne ainsi de lire que 6×3 fasse 6, que $20 + 6 + 0.5 + 1.5$ fasse 31.5, que $4/100$ donne 25 %, ou encore que $30 \times 120 = 360 \dots$ La calculatrice, rendue indisponible, n'a donc pas permis cette année à ces candidats de masquer cette difficulté.

Remarques sur le sujet et les copies

Le sujet avait pour objectif de s'intéresser aux enveloppes terrestres et plus particulièrement à la lithosphère, sous des angles variés. Plusieurs parties du programme était ainsi couvertes, en particulier la sismologie, la gravimétrie, la géochimie, le magmatisme, l'isostasie, la rhéologie. Le sujet avait par ailleurs l'ambition de montrer que les problèmes géologiques sont souvent des problèmes de physique et de chimie classiques mais appliqués à un système complexe, le domaine naturel. Enfin, il a été choisi de donner, quand c'était possible, un éclairage historique sur la construction des connaissances en sciences de la Terre.

L'ensemble des candidats avait visiblement des connaissances à partager sur la totalité des thématiques abordées. Ainsi, toutes les parties ont été traitées, et toutes les questions se sont vu attribuer le maximum de points dans différentes copies, à l'exception des deux questions irréalisables sans calculatrice (sur lesquelles nous revenons plus bas) et de la toute dernière question. Il est à noter que la majorité des candidats ne s'est pas laissé impressionner par le fait de faire les calculs à la main, et que beaucoup ont su appliquer leurs compétences en physique et en mathématiques pour résoudre les problèmes géologiques qui leur étaient proposés. Le jury a rencontré quelques excellentes copies, complètes et rigoureuses à la fois sur l'analyse de documents géologiques, sur le vocabulaire utilisé, et sur les aspects physiques.

Le jury a regretté toutefois que les erreurs lues les années précédentes soient toujours présentes dans les copies, y compris sur des questions tombées plusieurs années de suite. Il est à noter également que les candidats ne semblent pas tous savoir tirer profit de la longueur du sujet ni de la diversité des thématiques abordées. Le jury tient à rappeler que les sujets du concours n'ont pas vocation à "piéger" les candidats, mais au contraire à leur offrir de multiples opportunités de montrer leurs connaissances et leurs compétences dans les domaines qui leur agrément le plus. Il est étonnant à ce titre de voir que des candidats, peu à l'aise sur les aspects physiques du début du sujet, ne se sont pas intéressés aux dernières parties, pourtant plus "géologiques". Le jury ne peut qu'encourager les candidats à traiter en priorité les parties qui les valoriseront le plus.

Le jury tient aussi à encourager les candidats à proposer plus d'illustrations, souvent plus efficaces et claires qu'un long discours approximatif. Afin d'améliorer l'efficacité et la rigueur de leurs réponses, le jury invite aussi les candidats à s'appuyer sur des principes de physique et de mathématiques de base pour décrire les documents (en particulier les graphiques). Cela éviterait que dans de nombreuses copies les réponses ne soient que de vagues reformulations de la question.

Partie 1: objectifs et éléments de correction

Cette partie revenait sur l'établissement d'un modèle radial de Terre interne, et avait comme objectif de faire aboutir les candidats au modèle PREM publié en 1980. Cette partie a été la plus abordée, probablement en raison de son placement en début de sujet.

Les deux premières sous-parties cherchaient à faire démontrer aux candidats la présence et la profondeur de deux grandes discontinuités sismologiques : la discontinuité manteau-noyau et le Moho. Si la plupart des candidats ont vite compris ce que l'on cherchait à démontrer, la mise en œuvre a été souvent laborieuse, avec des confusions assez fréquentes sur les enveloppes concernées et les discontinuités associées. On a trouvé ainsi régulièrement une LVZ séparant l'asthénosphère du noyau ou un Moho séparant la croûte du manteau inférieur. Le jury a regretté le peu de lien qui est fait entre les questions, par exemple entre les lois de Descartes et l'existence de la zone d'ombre, ou encore entre les formules des vitesses des ondes et l'allure de l'hodographe.

De la même façon, les candidats ont du mal à adapter leurs connaissances au cas qui leur est proposé. Si beaucoup connaissent les lois de Snell Descartes, très peu les adaptent à la sismologie et donnent une formule avec les indices de réfraction alors qu'on pouvait espérer y voir les vitesses de propagation sismique. Quant aux formules de vitesse des ondes sismiques, certains candidats les connaissent "par cœur" mais ne savent pas leur donner du sens physique. On constate sur l'hodographe que la vitesse des ondes de volume augmente avec la distance au foyer. En faisant l'interprétation que les formules de vitesse représentent la racine carrée du rapport "rigidité / densité", on en déduisait que les ondes de volume traversent des milieux de rigidité croissante, donc de pression croissante. Ainsi les ondes de volumes traversent des milieux d'autant plus profonds que les trajets sont longs, et sont donc les ondes appropriées pour étudier les enveloppes profondes terrestres.

Le petit calcul de la profondeur de la limite manteau-noyau n'est pas toujours traité, alors que l'expression littérale est atteinte très facilement, le schéma permettant de poser la relation étant donné dans le sujet. Les candidats ayant posé l'équation ont su faire une approximation raisonnable du cosinus pour effectuer l'application numérique (pour un rayon terrestre de 6370 km par exemple, on obtenait une profondeur de 2492 km). Le jury a été très déçu des dessins de la zone d'ombre, souvent fantaisistes, et dans lesquels les rais sismiques sont souvent représentés de manière linéaire.

Abordée par tous, mais peu comprise, la découverte du Moho (et le calcul de sa profondeur) était pourtant un exercice classique (et historique) d'exploitation de données de propagation sismique. Le double train d'ondes de compression-dilatation montrait que l'on enregistrerait des ondes ayant acquis des vitesses différentes pendant leur propagation, donc ayant traversé des milieux de rigidité différente. On voyait sur l'hodographe historique que les ondes notées "P" par Mohorovicic ne sont pas enregistrées à proximité de la source, et qu'elles ont une vitesse plus élevée que l'autre train d'ondes de compression-dilatation. Ce sont donc celles ayant été réfractées dans le milieu plus rigide (donc de pression plus élevée, donc plus profond, ici le manteau), c'est-à-dire les ondes coniques, ou réfractées, ou encore Pn. On voyait également que les ondes notées " p " ont un temps d'arrivée non nul à proximité de la source (18 secondes), qui correspond au temps nécessaire à leur réflexion sur la limite croûte-manteau. Ce sont donc les ondes réfléchies ou encore PmP. La détermination de la profondeur demandait simplement d'appliquer Pythagore, et l'on trouvait une profondeur de 45,6 km pour le Moho, ce qui était acceptable pour des ondes ayant en partie traversé les Alpes.

Une troisième sous-partie cherchait à déterminer les proportions entre trois grands réservoirs terrestres : la croûte, le manteau dit supérieur et le manteau inférieur. Les candidats ont soit abandonné cette partie dès la première question (alors que les deux petits calculs sont très faciles, une addition et une moyenne pondérée...), soit ont poursuivi jusqu'au bout et ont ainsi récolté beaucoup de points. Les difficultés de certains candidats sur cette partie ont été essentiellement liées

à leur incapacité à écrire l'expression littérale d'une moyenne pondérée, d'une fraction massique ou d'un bilan de masse. On a ainsi rencontré des concentrations moyennes obtenues en additionnant les concentrations des différents réservoirs, ou encore des concentrations données en ppb.g^{-1} . Si la notion de compatibilité/incompatibilité est connue, son application au calcul d'un taux de fusion partielle est souvent peu rigoureuse.

Enfin une dernière question permettait de synthétiser ce qui précédait en demandant de commenter le modèle PREM publié en 1980. Abordée par tous, elle a pourtant produit des résultats très variables. On constate que les candidats, cherchant à coller au cours, s'obstinent à voir des choses qui n'y sont pas. Ainsi l'échelle du document 4 ne permettait pas de distinguer clairement la limite croûte / manteau. Du coup, dans le doute, certains placent le Moho à 100 ou 200 km de profondeur. Le jury s'étonne de la quasi-absence de la zone de transition du manteau dans les copies, alors que les changements de phase qui y surviennent sont explicitement au programme.

Partie 2: objectifs et éléments de correction

La deuxième partie se concentrait sur la lithosphère et quelques-unes de ses propriétés.

Une première sous-partie s'intéressait à la mise en évidence sismologique de l'existence de la LVZ. Ces questions n'ont pas posé de problème majeur aux candidats, bien que l'on regrette que les causes de l'existence de la LVZ soient très rarement abordées et discutées.

Dans la deuxième sous-partie, on cherche à établir le gradient thermique conductif dans la lithosphère. Après un petit calcul de proportionnalité très simple en première question, il n'y avait pas besoin de la calculatrice pour poursuivre puisqu'on demandait les expressions littérales du flux puis du gradient thermique. Il était nécessaire pour cela de savoir intégrer $u \cdot \exp(u)$, au programme de mathématiques de première année. Les candidats étant allés au bout de ces questions ont récolté beaucoup de points et sont souvent allés jusqu'à donner une estimation tout à fait pertinente du résultat chiffré (environ 1200°C), malgré la présence de l'exponentielle qu'ils ont su approximer. Sur les dernières questions, de nombreux candidats confondent croûte et lithosphère, et affirment que la croûte s'épaissit en s'éloignant de la dorsale. Très peu de candidats s'étonnent de trouver une épaisseur de lithosphère conductive de 30 km à l'axe de la dorsale (pour 0 Ma), résultat pourtant bien plus élevé que les 5 à 10 km sous les dorsales lentes. On s'attendait à ce que les candidats déduisent de ce résultat que le transfert conductif seul ne rendait pas compte de l'intégralité du transfert de chaleur près de la dorsale. En effet une grande partie de celle-ci est transférée par convection via la circulation hydrothermale.

Enfin, la troisième sous-partie cherchait à faire redémontrer aux candidats le raisonnement ayant permis historiquement de proposer l'existence d'un équilibre isostatique. Pour cela il était nécessaire de calculer les anomalies gravimétriques et de constater qu'effectuer la correction de Bouguer éloigne du modèle au lieu de nous en rapprocher comme c'est son intention. On pouvait alors conclure que l'inégale répartition des masses visibles en surface n'avait pas "besoin" d'être corrigée, donc qu'elle était déjà compensée naturellement en profondeur. Cette sous-partie, la plus difficile du sujet, a souvent été abandonnée à la première question, très difficile à réaliser sans calculatrice. Il était nécessaire de faire un calcul à quatre chiffres significatifs (via un \sin^2) à la première question pour pouvoir traiter la question 7, ce qui était évidemment inaccessible sans calculatrice. On pouvait toutefois poursuivre sans avoir fait ce calcul (les questions 2 à 6 et les questions 8 à 10 en étant indépendantes).

Il n'était pas nécessaire, pour traiter la suite de l'exercice, de connaître au préalable l'équation de l'anomalie à l'air libre, l'intention étant de la démontrer. Il suffisait pour cela de connaître la loi universelle de la gravitation, $F=G.M_1.M_2/d^2$, et de penser que la distance est ici représentée par le rayon terrestre plus l'altitude. Quant à l'anomalie de plateau, sa démonstration n'avait pas à être

connue au préalable non plus, il suffisait de connaître l'expression du volume d'un cylindre pour répondre à la question, le dessin étant fourni. Les candidats s'étant attaqués à ces questions ont en général trouvé l'expression de l'anomalie à l'air libre, mais ont rarement fait le développement limité permettant de la simplifier. Ils ont également réussi à déterminer le volume du cylindre dans l'expression de l'anomalie de plateau, mais ont souvent oublié de projeter suivant la verticale, ce qui rendait l'expression incomplète. Cela n'avait pas d'importance pour la suite, puisque l'expression à laquelle il fallait aboutir était donnée dans le sujet.

La plupart des candidats n'ayant pas traité les questions relatives aux anomalies gravimétriques ont repris la sous-partie à la fin, quand il leur était demandé d'énoncer le principe et les modèles d'isostasie, et de les appliquer. On s'étonne ici de la mauvaise maîtrise du principe même de l'équilibre isostatique, la profondeur de compensation étant régulièrement représentée avec une profondeur variable. L'application à des situations très classiques (bimodalité des altitudes -pourtant au programme de lycée-, élévation des chaînes de montagnes) a été très rarement réussie.

Partie 3: objectifs et éléments de correction

La troisième et dernière partie du sujet s'intéressait à la dynamique de la lithosphère et aux conditions rhéologiques dans lesquelles cette dynamique pouvait se produire.

Dans une première sous-partie, les candidats étaient invités à déterminer le déplacement de certaines plaques par différentes méthodes (séries temporelles de géodésie, anomalies magnétiques). Si la construction de modèle cinématique de plaque à l'échelle globale (NUVEL, MORVEL...) n'est pas au programme, l'utilisation de données géodésiques est explicitement au programme de deuxième année. Les valeurs (et les unités) des composantes N-S et E-W des vitesses étaient données dans le document fourni, il était donc inutile de les recalculer. On pouvait appliquer tout simplement Pythagore pour trouver que la vitesse de divergence entre les stations GUSK et HOFN était de 25,6 mm/an. Pour aller plus loin et déterminer l'azimut de cette divergence, il fallait passer par la construction du triangle, et l'on obtenait un azimut N102.

La détermination d'une vitesse de divergence à la dorsale à partir d'une carte ainsi que l'étude géométrique de la cinématique des plaques est par ailleurs au programme de lycée (classe de 1^{re} S, "ancien" programme suivi par les candidats actuellement en BCPST). Il est regrettable de constater que la grande majorité des candidats, face à un tableau de données de distances et d'âges, n'ait pas le réflexe de produire un graphique, alors qu'on demande de déterminer une vitesse c'est-à-dire la pente du dit graphique. En effectuant un tel graphique, on obtenait directement une vitesse de divergence de 4 cm/an entre les plaques Afrique et Amérique du Sud.

La deuxième sous-partie s'intéressait aux mouvements verticaux de la lithosphère, que l'on demandait de nommer (types de subsidences...) et de quantifier. Si la plupart des candidats ont traité cette partie qui a souvent rapporté des points, le jury s'étonne que les candidats se compliquent la tâche en reproduisant des dessins qui ne sont pas demandés (et qui ne sont pas indispensables) ou en plaçant la profondeur de compensation en plein milieu du manteau, ce qui rajoute des termes dans l'expression et l'alourdit inutilement. De la même manière, on déterminait dans la première question un rapport de 4,5 ($\rho_c/(\rho_c-\rho_m)$) entre le relief et la racine (4km vs 18km), que l'on pouvait directement appliquer à la question suivante, le cas étant identique. Les erreurs de calcul littéral ont été fréquentes dans cette partie, et étaient en général des erreurs de report de signe d'une ligne à la suivante.

Le rebond élastico-visqueux post-glaciaire est visiblement connu des candidats, même s'il est rarement nommé. On peut toutefois regretter que le raisonnement des candidats ne soit pas rigoureux. En effet les candidats affirment que l'observation des plages surélevées est due à un rebond suite à la disparition de glace, mais ne prennent pas la peine de faire des hypothèses (baisse du niveau marin ou surrection du continent) et de les confronter aux données (âge des plages, corrélation avec date du DMG et période de hausse du niveau marin) pour enfin conclure. Le jury

regrette également que la viscosité du manteau ne soit que très rarement évoquée pour expliquer la cinétique du rebond.

La troisième sous-partie s'intéressait à la rhéologie de la lithosphère, et devait aboutir à faire constater aux candidats que la résistance de celle-ci devenait négligeable à la base de la lithosphère, en relation avec le découplage mécanique lithosphère/asthénosphère. Cette sous-partie, proche du contenu des cours dispensés en deuxième année, a été traitée par la majorité des candidats, malgré son placement en deuxième moitié du sujet, avec des résultats fort variables. Les difficultés des candidats sur cette partie tiennent essentiellement à un manque de rigueur sur le vocabulaire. Ainsi, les confusions entre déformations et comportements rhéologiques sont très nombreuses (plastique/ductile, plastique/visqueux, ductile/élastique...), ce qui empêche de répondre précisément aux questions posées. Le jury remarque que la résistance est un paramètre qui n'est pas connu des candidats, alors qu'il est représenté via l'axe des abscisses des profils rhéologiques. Les candidats ne sont donc pas en mesure de dire à quoi correspondent les lois de fluage et de Byerlee.

La quatrième sous-partie montrait comment le profil rhéologique établi dans la sous-partie précédente pouvait être modifié lors d'événements magmatiques de grande ampleur (provinces magmatiques géantes ou LIP) et ainsi favoriser la fragmentation de la lithosphère continentale. On pouvait constater que l'installation de provinces magmatiques géantes précédait à chaque fois de peu l'océanisation des différents transects de l'océan Atlantique, permettant de faire l'hypothèse d'un processus de type "rifting actif" avant la fragmentation continentale. Cette sous-partie n'a été que peu traitée, malgré l'absence totale d'aspects calculatoires. Les candidats n'ayant pas défini correctement la résistance de la lithosphère continentale dans la partie précédente, il leur était difficile de constater que celle-ci diminuait drastiquement quand le flux thermique augmentait. On s'étonne par ailleurs des difficultés des étudiants à lire la carte géologique de l'océan Atlantique, outil pourtant classique.

Enfin, la cinquième sous-partie traitait de la pétrologie de la lithosphère océanique. Le log proposé par les candidats a souvent surpris le jury, qui s'étonne en particulier de l'absence quasi systématique d'une échelle verticale. Les candidats ayant abordé la pétrographie ont en général bien reconnu un basalte à enclaves de péridotites, mais ont rarement exposé leurs observations et arguments. Le traitement des quatre dernières questions demandait d'avoir traité la question 1.3.7, mais les candidats n'ont en général pas atteint ces ultimes questions. En faisant l'hypothèse d'un coefficient de partage nul pour le sodium (comportement idéalement incompatible), on obtenait un taux de fusion partielle moyen de 10,2 %. Dans la dernière question, une moyenne pondérée permettait d'obtenir un coefficient de partage réel du sodium dans les péridotites de 0,0275 (env 0,3), ce qui donnait un nouveau taux de fusion de 7,41 %. Ainsi on démontrait que l'approximation du comportement idéalement incompatible conduit à surestimer les taux de fusion partielle mantellique.