

4.3 Epreuve écrite du secteur C:

4.3.1 Le sujet proposé :

La subduction de la lithosphère océanique : de la caractérisation des processus récents à la recherche des subductions passées.

4.3.2 Commentaires

4.3.2.1. Commentaires généraux sur l'épreuve

Ce sujet traite d'un thème classique, en principe connu de la plupart des candidat(e)s. Il ne s'agissait pas de faire un étalage érudit de connaissances sous la forme d'un catalogue. Le but n'était pas non plus de raconter une histoire linéaire de l'évolution de la lithosphère océanique, de sa mise en place à sa disparition « inéluctable » dans les zones de subduction. Ce n'était par ailleurs ni un devoir de pétrologie, ni un devoir de géophysique, pas plus qu'un devoir de géochimie.

Le titre suggérait la recherche d'une démarche scientifique partant de l'analyse des caractéristiques des zones de subduction « actuelles » (il a été préféré le terme de récent pour permettre d'intégrer un peu de temps dans les processus) accessibles à partir d'observations et/ou de mesures mais aussi du modèle thermique sous-jacent qui n'est encore que partiellement vérifiable pour les subductions récentes.

A partir des caractéristiques actuelles, il fallait dégager quels marqueurs nous permettent de reconstituer des subductions passées, là où ce type de frontière de plaques a été inactivée ou a changé : de subduction à collision dans les Alpes ou l'Himalaya ; de la subduction à la faille transformante comme en Californie.

A ce titre, le métamorphisme de subduction n'est pas une évidence comme cela a été trop souvent présenté. Un axe important du devoir attendu consistait en une démonstration que ce métamorphisme est un marqueur des zones de subduction alors que nous n'avons qu'extrêmement peu de preuves directes (les clastes de faciès « schiste bleu » dans les diapirs de serpentine de l'avant-arc des Mariannes !). C'est une construction complexe qui, d'un côté, doit montrer que le gradient thermique HP-BT entre 6°C/km et 15°C/km est spécifique des zones de subduction, mais qui doit également démontrer que l'observation de certaines paragenèses métamorphiques, dépendant du protolithe et indiquant des conditions de pression et de température, ne nous intéressent qu'au sens de transformations intégrées dans un trajet PTt que l'on peut relier à un ou des gradients thermiques et donc *finalement* à un contexte géodynamique.

Le jury a souhaité que la correction soit une occasion de privilégier les copies qui montrent cette rigueur de construction scientifique par rapport à celles qui font étalage de connaissances sans démarche.

Par contre, il n'était ni suggéré, ni souhaitable de limiter les caractéristiques actuelles à celles utilisées comme marqueur du passé. Au contraire, il était intéressant de montrer, dans l'ensemble des éléments de caractérisation des subductions récentes, ce qui était utilisable et ce qui ne l'était pas en remontant dans le passé.

Commentaire global sur les copies :

Malgré un titre clair, beaucoup de copies sont largement hors-sujet en consacrant un paragraphe (jusqu'à 40% de la copie !) à la nature et la mise en place de la lithosphère océanique aux dorsales (certaines copies remontant même au rifting !). L'exposé des processus de collision (par ailleurs traités avec des schémas d'une naïveté sans rapport avec ce concours) n'avait aucun intérêt dans ce devoir. Seuls les processus d'exhumation, bien que le plus souvent hypothétiques, pouvaient donner lieu à des bonus. La recherche de moteurs souvent invoqués dans les plans (« moteur de la subduction », subduction « moteur de la tectonique des plaques ») n'était pas centrale dans ce sujet même si la notion de traction du panneau plongeant comme conséquence de la structure thermique de la subduction était attendue mais quasiment jamais expliquée. Dans les développements hors-sujet, on trouve aussi l'exposé de méthodes générales d'utilisation plus ou moins pertinente mais non centrale dans le cadre du sujet (sismique réflexion, différents types d'ondes sismiques, sources de chaleur interne du globe, différents modes de propagation de la chaleur sans discuter la compétition conduction-convection autour du panneau plongeant, ...). On trouve également un historique complet de la théorie de Wegener et de son rejet ou encore un exposé de cinématique générale des plaques avec l'exploit d'omettre les vecteurs-glissement des mécanismes au foyer des séismes de subduction. A l'opposé, la notion de subduction récente n'a quasiment jamais été explicitée et a souvent été source de confusion. Par exemple, le prisme de la Barbade (encore actif) présenté comme prisme fossile de la subduction Caraïbes alors que les schistes lustrés des Alpes ont souvent été traités comme si la subduction était encore présente. Signe des temps, beaucoup de copies commencent en expliquant les conditions de formations (par ailleurs largement hypothétiques) d'une zone de subduction plutôt que d'insister sur sa mise en évidence. Le sujet posé n'était pas : « La subduction de la lithosphère océanique, ses causes et ses effets » comme de nombreuses copies l'ont présenté en développant beaucoup les modèles globaux de convection.

Un travers très fréquent a été de commencer par opposer subduction sous une plaque continentale et subduction sous une plaque océanique, digne d'une « classification de tiroir » plutôt que de commencer par dégager les nombreux points communs et d'aborder ensuite les différences. Par ailleurs, le Japon n'est probablement pas le meilleur exemple pour un arc volcanique sur croûte initialement océanique (c'est un arc complexe et composite depuis le Paléozoïque avec peut-être des restes continentaux), les Antilles ou les Mariannes étaient plus

appropriées. De manière générale, très peu d'exemples régionaux corrects et bien décrits de subductions récentes ont été utilisés pour étayer les copies. De manière similaire, beaucoup de copies ont traité le métamorphisme des zones de subduction par la théorie sans référence à des exemples régionaux correctement présentés.

Très peu de copies argumentent les différents points sur des exemples réels, localisés et bien décrits. Par exemple, se contenter de citer les océans disparus ne démontrait pas des subductions du passé ! De même, les ophiolites ne sont que des indicateurs indirects et n'impliquent pas forcément des processus de subduction. L'exemple de l'Oman est un contre-exemple classique avec obduction, sans subduction au sens strict.

Liste d'erreurs importantes fréquemment trouvées dans les copies.

La différence entre modèles et observations ou mesures n'est pas toujours claire à la lecture des copies. Un exemple flagrant est « L'étude ou l'observation des courbes isothermiques (les isothermes) confirme l'existence d'une zone de subduction » sans que l'origine de ces courbes soit précisée.

L'association entre cordillère de subduction et présence (ou absence dans certaines copies) d'un prisme d'accrétion dans le vieux modèle d'opposition (type Chili et type Marianne d'Uyeda et Kanamori) n'a plus lieu d'être depuis les travaux statistiques de Heuret et Lallemand, bien exposés dans le livre « Convergence lithosphérique » édité chez Vuibert. Ceci ne semble malheureusement pas encore être passé dans la formation des maîtres.

Dans la même rubrique, la corrélation entre âge de la lithosphère océanique et pendage du plan plongeant proposée par Uyeda et Kanamori n'est pas validée par les études statistiques.

L'obduction est trop souvent présentée comme la transition entre subduction et collision avec « pincement » de la lithosphère océanique, aboutissant, dans plusieurs copies, à dire que l'obduction de l'ophiolite d'Oman implique une subduction !

Une erreur très courante est de considérer que les sédiments qui s'accumulent sur la croûte océanique augmentent sa densité et contribuent à la faire plonger. C'est un contre-sens majeur car s'ils contribuent à augmenter la masse totale, causant ainsi une subsidence, leur densité est largement inférieure à celle du manteau et donc, en termes de flottabilité, jouent un rôle opposé, similaire à la croûte, flotteur de la lithosphère ! Un autre contresens majeur a été trouvé dans de trop nombreuses copies considérant que l'hydratation de la croûte ou de la lithosphère océanique, à cause de l'apport d'eau, contribue à augmenter sa densité ! Dans ce domaine les confusions sont nombreuses : ex. « En s'éloignant de la dorsale océanique, la lithosphère se gorge d'eau subissant ainsi des modifications minéralogiques telles que à l'approche de la croûte continentale, sa densité est supérieure à celle de la lithosphère

continentale » ou « L'eau finit par s'infiltrer dans le basalte, alourdissant d'autant la plaque lithosphérique » ou pire « La serpentinisation augmente la densité de la croûte océanique » !

Beaucoup de copies considèrent que l'hydratation de la croûte océanique se fait progressivement à froid au cours de son éloignement de la dorsale alors que l'essentiel se fait principalement à chaud et à l'axe de la dorsale

Avec une moindre gravité, il est fréquent de voir écrit que c'est la différence de densité entre croûte océanique et croûte continentale qui détermine la différence de flottabilité et donc le fait que la L.O. passe sous la L.C. alors qu'au premier ordre, c'est l'épaisseur de la croûte par rapport au manteau lithosphérique qui est déterminante ! Une preuve pourrait être donnée dans la difficulté d'entrée en subduction des grands plateaux océaniques (par exemple Ongtong Java) et, à l'opposé, l'existence de subduction de marges continentales distales très amincies (métamorphisme des Massifs cristallins internes des Alpes franco-italiennes).

La présence de fossiles marins (comme les ammonites, les nautilus, ...) ou de faciès marins comme le Tithonique n'est en aucun cas un témoignage d'océan disparu, encore moins de subduction passée. Encore pire, les blocs basculés continentaux retrouvés dans des chaînes de montagne ont souvent été présentés comme argument pour des subductions anciennes ! C'est oublier que l'inversion tectonique d'un ancien rift continental (raccourcissement horizontal après une période d'extension) peut donner ce résultat sans ouverture d'un océan ni subduction.

Pour la géochimie des séries de subduction, il règne une imprécision : les spectres de terres rares des basaltes d'arc (IAB le plus souvent notés comme OIB et parfois même confondus avec !) sont décrits comme obtenus sur le « magma de subduction » et non sur les seuls basaltes. L'anomalie en Nb et Ta n'y est presque jamais indiquée. Les andésites sont souvent réduites à une contamination crustale par anatexie dans la croûte continentale (sans arguments géochimiques) et la dimension de cristallisation fractionnée est souvent ignorée. Enfin la série calco-alkaline est souvent décrite comme comprenant des trachytes et trachy-andésites !

Dans un domaine qui n'était pas attendu mais souvent évoqué, le concept de « poussée à la ride » ou « ridge push » des anglo-saxons est trop souvent interprété comme une force horizontale exercée par le manteau qui remonte, voire par le magma. Il s'agit de l'effet des forces de gravité sur les pentes des flancs de la dorsale, c'est-à-dire, en réalité, une traction depuis l'axe de la dorsale. Cette force gravitaire est vue comme une « poussée » depuis le cœur de la plaque océanique. Il y a une similitude avec la force de traction du panneau plongeant mais avec une magnitude beaucoup plus faible !

Les vitesses de plaques ou de retrait de la fosse sont souvent utilisées sans préciser quelle est la référence du vecteur-vitesse : vitesses relatives (dans ce cas, quelle est la plaque fixée ?) ou absolues (quel est le référentiel « absolu » : points chauds, NNR ou No Net Rotation, autre ?). Ceci affaiblit considérablement la portée des explications des cordillères et bassins d'arrière-

arc par exemple. Exemple faux : « Lorsque la vitesse du retrait du slab est supérieur (sic) à la vitesse de convergence, la zone d'arrière arc est en extension, ... ».

Forme du devoir

Un certain nombre de copies courtes se contentent d'un plan avec des titres. Ce n'est pas l'exercice demandé et un titre ne vaut pas explication et ne rapporte donc aucun point. Comble de l'humour, après un tel plan, une conclusion débute par : « Comme nous venons de le développer, il est évident » Une conclusion ne peut pas être remplacée par un schéma bilan même si celui-ci a son utilité dans le devoir.

Par ailleurs, de manière similaire, une évocation simple dans le texte n'apporte rien. Par exemple « Ces fossés sont par ailleurs les témoins d'un événement géologique particulier nommé prisme d'accrétion ». Une telle phrase sans autre information qu'un nom ne rapporte évidemment aucun point.

Le jury souligne des efforts, en général, pour essayer d'illustrer des copies. Cependant, nombre de schémas restent beaucoup trop imprécis, peu rigoureux et sans échelles, voire faux. La distinction entre croûte et lithosphère n'est pas toujours précisée. Certains schémas montrent une croûte océanique qui s'épaissit avec l'âge et des coupes ne montrent pas de différence entre épaisseurs des lithosphères océaniques et continentales ou entre croûte océanique et croûte continentale. De trop nombreuses copies ont perdu du temps à faire des dessins complexes mais hors sujet (planisphère avec continents et ensemble des frontières de plaques, coupe de la Terre avec modèle PREM complet détaillé,) au détriment des figures fondamentales (coupe d'un prisme d'accrétion, coupe détaillée d'une lithosphère à cordillère et à bassin d'arrière-arc, etc.).

L'introduction doit mettre en perspective le sujet, en analyser les termes et poser une problématique en montrant comment le plan suivi (pas nécessaire de le détailler) va permettre d'avancer dans cette problématique. Une problématique ne saurait pas se réduire à une liste de questions sans liens entre elles ! La conclusion ne devait pas non plus être réduite à une liste de points abordés dans le devoir mais récapituler de manière concise et claire la démarche scientifique suivie tout au long du devoir.

Définitions

Subduction : C'est le processus dans lequel une plaque lithosphérique s'enfonce sous une autre et retourne dans le manteau. C'est l'un des processus rencontré dans les situations de convergence lithosphérique mais pas le seul (collision et obduction, autres phénomènes de convergence, ne devaient pas être traités dans ce sujet !).

Lithosphère océanique : Ensemble de nature rhéologique composé de croûte océanique (composition globale « basaltique » et épaisseur autour de 6km) et de la partie du manteau supérieur qui se déforme très peu de manière irréversible aux faibles contraintes tectoniques

(ou déviatoriques) au cœur des plaques lithosphériques par rapport à la déformation aux limites de ces plaques. Sa base est souvent limitée par l'isotherme 1200°C. La subduction de lithosphère continentale était donc également hors sujet.

Rares sont les copies ayant proposé des introductions informatives analysant les termes du sujet pour en tirer une démarche.

Introduction : La subduction de la lithosphère océanique est l'un des éléments incontournables de la théorie de la tectonique des plaques qui est apparue comme une conséquence logique de la théorie de l'expansion des fonds océaniques (Hess, 1962) lorsqu'elle a été couplée avec la rigidité des plaques lithosphériques dans le cadre de la théorie de la tectonique des plaques. C'est un phénomène maintenant largement documenté sur le globe dont les implications sociétales sont importantes, entre la source des séismes les plus destructeurs et des volcans les plus dangereux. On lui doit aussi la genèse de concentrations minérales utiles à l'homme.

Au-delà des intérêts de la connaissance des subductions dans notre culture du risque et de l'exploitation des ressources naturelles, il y a un intérêt conceptuel majeur dans la connaissance des zones de subduction autour de la reconstitution des mouvements passés des plaques lithosphériques. En effet, depuis l'avènement de la théorie de la tectonique des plaques, il a été clairement établi que l'origine de la plupart des chaînes de montagnes est à chercher dans les mouvements horizontaux de continents comme le proposaient Taylor et Wegener. Plus précisément, l'interprétation d'une chaîne de collision continentale comme conséquence de la convergence entre deux parties continentales de plaques lithosphériques séparées par un océan passe par la reconnaissance des témoins de cet ancien océan, les ophiolites, mais aussi et principalement par la mise en évidence des témoins de la subduction de cette lithosphère océanique en grande partie disparue.

Nous allons donc débiter par une mise en évidence des zones de subduction récentes accompagnée d'une description des principaux phénomènes qui l'accompagnent afin de déterminer quels sont les marqueurs qui nous permettront de reconstituer les subductions d'océans disparus. Nous appuierons cette démarche sur des exemples géologiques classiques en France et/ou dans d'autres parties du monde.

Le plan proposé s'articule suivant trois axes :

- (1) Mise en évidence des subductions actuelles
- (2) Les zones de subduction, lieux de déformations intenses
- (3) A la recherche des subductions passées : les indices pétrographiques.

(1) Mise en évidence des subductions actuelles

On pouvait partir des observations classiques de l'existence d'une fosse morphologique dont l'origine est flexurale et permet de tester l'épaisseur élastique de la plaque plongeante et qui, en position de bassin flexural, peut être un piège à sédiments turbiditiques. Il fallait aussi rappeler la mise en évidence des surfaces de Wadati-Benioff comme un domaine en déformation sismique plongeant depuis le domaine océanique. On pouvait aussi continuer sur l'observation d'un volcanisme associé, de nature particulière : la série calco-alcaline où domine le terme andésitique et les dynamismes explosifs. Il était judicieux à ce stade de rappeler que l'arc volcanique actif est toujours situé à l'aplomb d'une profondeur de 100 à 120 km pour le toit de la plaque plongeante, suggérant un contrôle par la pression plus que par la température. On pouvait discuter les signatures pétrologiques et géochimiques rattachant ce magmatisme à la subduction comme la richesse en fluides suggérant une fusion par hydratation, l'enrichissement en éléments incompatibles par rapport aux MORB, suggérant une contribution de la croûte, ou encore la présence de ^{10}Be qui implique une contribution des sédiments subduits.

Avant de présenter la tomographie sismologique et ses résultats dans les zones de subduction, il fallait impérativement rappeler le modèle thermique des zones de subduction avec la compétition entre transport de chaleur convectif dans le plongement de la plaque avec le transport conductif par échange avec le manteau encaissant plus chaud. Les isothermes résultantes, calculées et non obtenues par mesure, dépendent de la vitesse de subduction et de l'état thermique de la plaque à son entrée dans la subduction, donc de son âge. Le principe de la tomographie sismologique devait être clairement exposé (en rappelant que les données de base ne sont pas des vitesses mais sont des mesures de temps d'arrivée d'ondes sismiques comparés à des temps théoriques dans le modèle PREM) ainsi que le principe de son utilisation en supposant une composition constante du manteau et des variations de vitesses liées à la température (densité et propriétés élastiques). L'observation de panneaux froids permettait de conforter les modèles thermiques décrits précédemment et leur corrélation avec les surfaces de Wadati-Benioff légitimait l'interprétation de ces dernières. On pouvait aussi discuter l'implication de l'observation de tels panneaux froids se prolongeant parfois dans le manteau inférieur sur les modèles de convection du manteau à une ou deux couches. Il était également attendu de discuter l'implication de ces structures thermiques sur la distribution des transitions de phases dans le panneau plongeant ainsi que sur les forces de traction sur la plaque lithosphérique qui plonge. L'étude critique des signatures géophysiques de surface (gravimétrie et flux de chaleur) trouvait sa place dans cette partie.

Cette partie a été le plus souvent traitée *a minima*, avec une réduction trop fréquente du volcanisme aux simples andésites. L'aspect thermique, lorsqu'il n'a pas été oublié, a été présenté comme un fait d'observation et non comme le résultat de calculs dans des modèles physiques « simples ». La variabilité des structures thermiques du panneau plongeant qui en résultent n'a quasiment jamais été évoquée.

(2) Les zones de subduction, lieux de déformations intenses

Cette partie avait vocation à rappeler des caractéristiques fondamentales des zones de subductions actives que l'on retrouve peu dans les subductions passées. Elle était l'occasion de détailler un peu l'hétérogénéité des plans de Benioff avec des séismes de mécanismes et de signification variée. Sans être exhaustif, on pouvait insister sur les séismes majeurs interplaques en soulignant qu'avec leurs magnitudes entre 8 et 9, ils représentent largement plus de la moitié de l'énergie sismique dissipée sur Terre avec les conséquences que l'on connaît sur les populations humaines, en particulier les tsunamis. On devait également rappeler que ces séismes ne sont numériquement qu'une toute petite partie des séismes des surfaces de Wadati-Benioff. On pouvait évoquer les séismes d'intrados et d'extrados du plongement de la plaque, les séismes intermédiaires souvent en double plan de Benioff et le lien possible avec la traction du panneau plongeant. Il était attendu enfin de discuter le paradoxe mécanique des séismes profonds impossibles à expliquer par la déformation cassante mais interprétés depuis quelques décennies comme liés aux transitions de phase de l'olivine sous contrainte. Ces aspects n'ont quasiment pas été traités dans les copies.

Cette partie permettait également de décrire et de tenter d'expliquer les modes de déformation de la plaque supérieure tant à l'échelle lithosphérique (cordillère et raccourcissement crustal versus bassins d'arrière-arc et divergence lithosphérique au-dessus de la subduction) qu'à l'échelle crustale sur les marges (prisme d'accrétion versus marges érosives). A ces deux échelles, il était attendu une description statique (coupe actuelle) ainsi qu'une discussion sur l'évolution des structures avec à l'échelle lithosphérique, une dimension cinématique.

Le jury a noté sur cette partie l'indigence du niveau de représentation graphique de ces éléments comme une méconnaissance profonde des mécanismes et des causes possibles.

(3) A la recherche des subductions passées : les indices pétrographiques

Cette partie était le cœur du devoir en s'appuyant sur les deux premières parties. Son but était de retrouver des **indices de subduction dans des régions où la subduction a été inactivée, où plus fréquemment a fait place à un autre type de frontière de plaque** : de subduction à collision (dans les Alpes, l'Himalaya ou l'Hercynien, liste non limitative) ou de subduction à faille transformante (cas de la Californie). On pouvait la subdiviser en deux sous-parties : une première sous-partie pouvait chercher des témoins de surface préservés comme le magmatisme de surface (volcanisme calco-alcalin de subduction : l'exemple de la migration de l'arc volcanique ouest-méditerranéen depuis la Provence à l'Oligocène jusqu'à l'ensemble actuel calabro-tyrrhénien en passant par le volcanisme corso-sarde) ou du plutonisme de subduction associé (par exemple, le batholithe trans-himalayen ou celui de la Sierra-Nevada de Californie). Cela donnait l'opportunité de discuter, à partir d'exemples précis, les minéralisations spécifiques (porphyres cuprifères) typiques de ces environnements. La recherche de structures préservées comme d'anciens bassins d'arrière-arc ou d'anciens prismes d'accrétion pouvait être proposée.

L'essentiel de cette partie était la démonstration que les metabasites (roches métamorphiques à protolithes « basiques » ou mafiques) dans les faciès « haute pression-basse température ». Considérant l'importance de la démarche scientifique, il était indispensable de rappeler les grands principes de l'obtention des grilles pétrogénétiques métamorphiques dépendant du protolithe. L'association des paragenèses et faciès devait s'appuyer sur la notion de gradient métamorphique. L'ensemble de la démonstration devait s'appuyer sur la description de metabasites, localisées précisément dans au moins une chaîne de collision comme les Alpes. L'analyse rigoureuse des relations chronologiques dans les minéraux métamorphiques et les structures qui les portent (couronnes réactionnelles, foliations, fentes de tension, etc.) devait permettre de définir les trajets progrades et rétrogrades et de les inscrire dans les grilles pétrogénétiques.

Une comparaison d'exemples comme les Alpes et l'Hercynien permettait de montrer des évolutions rétrogrades différentes : en régime de subduction dans les Alpes franco-italiennes et en régime de collision plus chaude dans la chaîne hercynienne. Les processus d'exhumation, largement hypothétiques, pouvaient bien évidemment être proposés mais leur absence n'était pas pénalisée.

Il était intéressant de se pencher sur les spécificités des subductions dans l'Archéen avec la genèse des TTG, interprétée comme liée à une fusion partielle de la croûte océanique entrée en subduction en contexte global beaucoup plus chaud que l'actuel. La démonstration passait par la signature adakitique dont il fallait soigneusement montrer le lien avec la fusion crustale dans les exemples récents (adakites du Chili par exemple). On pouvait également présenter les processus de sagduction dans l'Archéen dont les éléments de similitude avec les subductions récentes étaient à discuter.

Conclusion : La démonstration de la réalité de la subduction de la lithosphère océanique a été l'un des éléments décisifs dans la mise en place de la théorie de la tectonique des plaques et dans son acceptation par la communauté scientifique.

La reconnaissance des subductions actuelles est principalement basée sur l'intense activité tectonique et magmatique qui lui est associée. Les surfaces de Wadati-Benioff montrent l'intense déformation sismique liée à l'enfoncement d'une lithosphère sous l'autre jusqu'à l'interface manteau supérieur – manteau inférieur. Le magmatisme lié aux zones de subductions de lithosphère océanique est assez caractéristique pour lui être associé : il est représenté exclusivement par des laves subalcalines et principalement par des laves de la série calco-alcaline avec éventuellement des séries tholéiitiques d'arc. Une des roches emblématiques de ces arcs volcaniques de subduction est l'andésite vraie (on ne devrait pas utiliser le terme d'andésite pour les autres séries magmatiques). Des indices minéralogiques et géochimiques militent pour une origine dans la fusion partielle du coin mantellique au-dessus du panneau plongeant.

Une des conséquences majeures prévisibles de la subduction d'une lithosphère océanique est l'existence d'un panneau plongeant plus froid que le manteau voisin. Les modèles thermiques calculés sont souvent représentés par des isothermes en coupe. De tels panneaux froids ont été confirmés par la tomographie sismologique qui permet de les visualiser comme des panneaux de vitesse sismique supérieure aux valeurs du modèle PREM.

La reconnaissance des subductions passées, démarche fondamentale pour reconstituer les disparitions de domaines océaniques anciens lors des mouvements des continents, est une construction scientifique plus complexe. Contrairement aux subductions actives, nous ne disposons plus des marqueurs liés à la déformation sismique et pour les cas les plus anciens, nous n'avons plus aucune trace en tomographie sismologique des panneaux froids retournés dans le manteau. Les marqueurs tectoniques, comme l'existence de prismes d'accrétion ou les déformations à l'échelle lithosphérique, sont souvent difficiles à retrouver lorsqu'ils ont été repris dans des déformations ultérieures comme par exemple dans la collision continentale.

Les marqueurs les plus utilisés sont donc les marqueurs pétrologiques puisque les roches, même en quantité limitée, peuvent garder une trace non ambiguë de leur lien avec une zone de subduction. De tels marqueurs pétrologiques sont de deux types : les produits magmatiques équivalents aux roches produites par les subductions actuelles et les roches métamorphiques liées à la pénétration dans la zone de subduction de la croûte océanique. On trouve fréquemment dans les chaînes de montagne des roches mafiques de la croûte océanique ayant subi un métamorphisme dans les faciès « schiste vert », « schiste bleu » et « éclogite », soit dans le sens prograde, soit dans le sens rétrograde, soit les deux. Ces histoires métamorphiques traduisent une évolution dans un gradient thermique « froid » ou « haute pression – basse température » dont le contexte géodynamique possible est la subduction de cette lithosphère océanique. Il est donc logique de les utiliser comme marqueur.

La subduction n'a pas toujours fonctionné de manière identique à l'actuel et dans la période archéenne, des subductions plus chaudes ont permis une fusion importante de la croûte océanique plongeante et la création de roches plutoniques caractéristiques : les TTG, fondamentaux dans la croissance initiale des continents.

4.3.2.2. Grille de notation

Une version simplifiée de la grille d'items utilisée pour la notation des copies est présentée ci-dessous. Elle ne constitue en aucun cas un plan type ou un corrigé, mais elle balaye avec quelques exemples non exhaustifs les notions qui pouvaient être abordées.

Fond	Introduction	Contexte : il doit servir d'ancrage clair à l'introduction			
		Analyse des termes du sujet à partir du contexte			
		Problématique clairement posée et justifiée par l'analyse du sujet			
		Axe directeur de la composition explicité et bien justifié			
	Mise en évidence des subductions actuelles	Quelques marqueurs des zones de subduction	Des morphologies particulières : les fosses de subduction	Fosses et bombements externes : des témoins de la déformation élastique des plaques lithosphériques océaniques. Signature gravimétrique de la fosse	
			Les surfaces de Wadati-Benioff	Les fosses de subduction comme pièges à sédiments : les turbidites de fosse	
			Le volcanisme actif de subduction	De la mise en évidence au Japon à la généralisation à la ceinture de feu du Pacifique	
				Angle et profondeur maximale des séismes sont variables (exemples)	
		Un modèle thermique simple et ses conséquences	Le modèle thermique et son résultat : la distribution des isothermes	Nature pétrologique et séries magmatiques de subduction	
				Dynamique éruptive des volcans de subduction	
				Les minéralisations associées (porphyre cuprifères)	
				principe du calcul : compétition entre conduction et convection	
			La tomographie sismologique	distribution des isothermes - prédiction d'un panneau plongeant froid, variations avec la vitesse de subduction et l'âge du panneau plongeant	
				Principe de la méthode : inversion des temps de trajet - cartographie 3D des écarts au modèle PREM - vitesses dépendent de la température	
			Subduction et convection globale du manteau	Implications sur les modèles de convection du manteau	
				Observations des panneaux froids au dessous de 670km : la convection ne peut pas être simplement à deux couches.	
		Structure thermique des zones de subduction et forces agissant sur les plaques	panneau plongeant froid donc plus dense : forces de gravité		
			transition de phase de l'olivine et noyau dense au cœur de panneau plongeant		
	traction du panneau plongeant et cinématique				
	Distribution des flux de chaleur				
	Des signatures gravimétriques et thermiques ?	signatures gravimétriques classiques et altimétriques			
		Position de l'arc volcanique actif - relative indépendance des températures			
	Origine du magmatisme de subduction	Eléments de signature géochimique et pétrologique			
		Origine de la fusion par métagéotisme (solidus "hydraté" de la péridotite).			
	Les zones de subduction, des lieux de déformations intenses	Les déformations sismiques	Séismes interplaques	Définition - importance sur le globe - risque sismique - La zone sismogène et ses limites	
				Les tsunamis - origine, propagation, risque	
				Mécanismes au foyer des séismes interplaques et cinématique des plaques	
			Séismes intermédiaires	Double plan de Wadati Benioff - déshydratation de la serpentine	
		Séismes profonds		Des séismes paradoxaux : transitions de phase de l'olivine sous contraintes	
				L'échelle lithosphérique : cordillères et bassins d'arrière-arc	Chaînes (cordillères) de subduction
			Cinématique relative de l'arc qui se rapproche de la plaque supérieure		
		Bassins d'arrière-arc	coupe crustale et lithosphérique		
			Cinématique relative de l'arc qui s'éloigne de la plaque supérieure		
		Déformation intégrée à l'échelle de la marge : prismes d'accrétion et marges érosives	Répartition globale et déterminisme	Distribution sur le globe	
				Déformation de la plaque supérieure et cinématique de la subduction. Hypothèses	
			Prisme d'accrétion	coupe et description. La notion de décollement basal est impérative.	
				Raccourcissement horizontal et épaississement - soulèvement et croissance latérale de matière (sédiments) qui passe de la plaque inférieure à la plaque supérieure	
Marge érosive		coupe d'une marge érosive (description ou dessin)			
	Subsidence et raccourcissement horizontal (la fosse se rapproche de l'arc. Du matériel de la marge est entraîné dans la subduction)				
	Répartition globale et déterminisme	à peu près 50% de chaque type. Aucune corrélation avec la déformation à l'échelle lithosphérique. Lien avec la quantité de sédiments dans la fosse			
		Exemples possibles (flyschs à helminthoïdes - turbidites d'Ecosse,)			
A la recherche des subductions passées : les indices pétrographiques magmatiques et métamorphiques	Magmatisme des subductions passées	Volcanisme	Exemple documenté et argumenté de volcanisme de subduction passée		
		Plutonisme	Exemple documenté et argumenté de plutonisme de subduction passée		
	Le métamorphisme HP-BT, marqueur de la subduction	Notions fondamentales sur le métamorphisme comme marqueur des subductions	Paragénèses et protolithe. Faciès métamorphique - grille pétrogénétique et droites de réactions		
		Trajets PTt et gradients thermiques HP-BT et structure thermique des subductions			
		Séquence de transformation d'un gabbro ou basalte océanique dans le gradient HP-BT			
	Métamorphisme de subduction passée dans une chaîne récente : exemple de la chaîne alpine	Lien avec le magmatisme	Séquence prograde et déshydroxylation des minéraux		
		Exemples : Queyras -Viso (Chenaillet comme "témoin")			
	Métamorphisme de subduction passée dans une chaîne ancienne : exemple de la chaîne hercynienne	Bilan : Datation et interprétation des trajets PTt			
		Le complexe de subduction hercynien de l'île de Groix et/ou écolites coronitiques du GLA groupe leptyno-amphibolique			
	Avant la subduction moderne	Les témoins supra-subduction dans le massif central (Morvan - Brévenne)			
Signature adakitique et fusion crustale					
Qualité générale de la construction de la copie	Conclusion	Adakites et TTG : la mise en place de la croûte continentale	TTG et subduction archéenne		
		Sagduction Archéenne	Description du phénomène - discussion sur analogie avec la subduction ou non		
	Plan et démarche	Transitions	Logique, cohérence, titres informatifs, adéquation entre titres et contenus des paragraphes		
			Rigueur de la démarche et de la construction scientifique - distinction CLAIRÉ entre processus actuels et marqueurs du passé		
		Approches expérimentales et observations	Les transitions sont globalement : absentes (0), artificielles (1), logiques (2), logiques et bien justifiées (3)		
			à apprécier par rapport à la richesse de la copie		
		Illustrations	Pertinence, qualité : à apprécier par rapport à la richesse de la copie		
		Forme	Rédaction	Clarté, concision	
	Présentation		Orthographe, syntaxe		
	Présentation et soin				
Total de la forme					
TOTAL de la copie					