

Document 10 : Modèle Tectodidac © Pierron

Corrections et remarques concernant l'épreuve écrite de géologie

Eléments de correction

Partie I : le point sur les connaissances actuelles

1. Comparer les caractéristiques principales de la chaîne des Alpes et de la chaîne varisque en France.

Toutes les chaînes de montagnes correspondent à des **portions raccourcies et épaissies de la lithosphère**. Les orogènes se forment dans des **systèmes convergents**, dans lesquels le rapprochement des plaques lithosphériques provoque un serrage des éléments constitutifs de la croûte et du manteau. Les chaînes de montagnes peuvent se localiser soit en limite, soit à l'intérieur des plaques lithosphériques. La chaîne des Alpes et la chaîne varisque résultent de la fermeture d'une lithosphère océanique par subduction, puis de la collision des lithosphères continentales. On les appelle pour cela des **chaînes de collision continentale**. Chaque étape de l'évolution de la chaîne se traduit par la formation de structures tectoniques, d'un métamorphisme, d'un magmatisme et de phénomènes sédimentaires caractéristiques.

Il faut souligner qu'**une chaîne de montagne se construit essentiellement à partir de mouvements horizontaux de matière, liés à la convergence (forces aux limites)**. La subduction océanique est facilitée par **la gravité** (traction de la plaque plongeante ou slab pull) ; au contraire la subduction continentale est rendue difficile par sa faible densité, provoquant l'intense déformation de cette plaque continentale subduite. **Les forces de volume (pesanteur) interviennent tout au long de l'évolution orogénique** et elles facilitent le retour à l'équilibre pendant la phase tardi-orogénique de la lithosphère préalablement épaissie.

La formation des reliefs est la conséquence de ces mouvements horizontaux et verticaux qui provoquent une **modification progressive de l'équilibre isostatique** au cours des différents stades d'évolution de la chaîne. Des **réajustements isostatiques rapides** peuvent aussi se produire en réponse à des phénomènes profonds (délamination lithosphérique, détachement de la plaque plongeante).

L'**isostasie** est une théorie géophysique, qui permet d'expliquer les anomalies du champ de gravitation à la surface de la Terre liées à la topographie. Elle découle de l'application du principe d'Archimède, qui traduit l'état d'équilibre « lithostatique » d'une couche superficielle rigide, la lithosphère, par rapport à une couche profonde visqueuse, l'asthénosphère.

Deux modèles explicatifs du principe d'isostasie ont été proposés :

- l'existence d'un relief positif en surface est compensée par l'existence d'une racine crustale en profondeur (modèle d'Airy), l'excès de masse en surface (relief positif) étant compensé par un déficit de masse en profondeur
- la densité de la croûte varie en fonction de la hauteur du relief et il n'y a pas de racine crustale (modèle de Pratt).

La profondeur à laquelle l'équilibre isostatique est atteint est appelée surface de compensation.

En l'absence de contrainte tectonique, les roches se maintiennent dans un équilibre relatif simplement en fonction de leurs différentes densités. En contexte orogénique, les contraintes tectoniques s'opposent aux forces de volume, créant un déséquilibre isostatique au cours de l'enfouissement progressif des roches. Le système retrouve progressivement son équilibre à mesure que les contraintes tectoniques s'amenuisent. Ainsi, dans les chaînes de montagne, l'isostasie contribue à la remontée des racines et à l'érosion des reliefs.

1.1 Les Alpes

La toute première caractéristique de la chaîne des Alpes, comme toutes les chaînes jeunes, est de présenter des **reliefs positifs importants**.

On y observe de nombreuses **structures compressives** à différentes échelles, qui traduisent le raccourcissement et l'épaississement de la croûte :

- des **plis** avec des styles tectoniques particuliers, qui reflètent des conditions d'enfouissement différentes (plis de surface dans le domaine externe du Jura et plis profonds associés à la schistosité dans le domaine interne comme au Mt Rose),
- des **chevauchements** (Front de Chevauchement Pennique) et des **nappes de charriage**, soulignées par des klippes (Préalpes, Dent blanche) et des fenêtres (Massifs Cristallins Internes).
- des **décrochements** (Ligne du Canavèse), qui accompagnent les stades d'évolution tardifs de la chaîne (expulsion, rotation, etc.)

L'**enfouissement** des ensembles rocheux est marqué par :

- la subduction du socle européen sous les Massifs Cristallins Externe (document 1).
- le métamorphisme lié à la subduction (unités internes métamorphiques de Haute Pression et de Ultra Haute Pression). Dans le Queyras (document 2) les unités métamorphiques (Schistes lustrés et méta-ophiolites) ont subi un enfouissement croissant en direction de l'Est, qui reflète la polarité de la zone de subduction. La subduction océanique se déroule entre 60 et 40 Ma.

Des **bassins sédimentaires syn-tectoniques**, associés au dépôt caractéristique de **flyschs** et de **molasses**, marquent les différents stades d'édification de la chaîne.

L'âge de ces dépôts successifs et leur progression d'Est en Ouest au cours du temps témoigne de l'évolution de la chaîne pendant la convergence : âge Crétacé supérieur pour le flysch le plus interne (flysch à Helminthoïdes), Eocène pour le flysch briançonnais, Oligocène pour le flysch externe (Champsaur, Annot) et Miocène pour la molasse péri-alpine.

Les **flyschs** sont des formations sédimentaires détritiques que l'on trouve dans les chaînes de montagne, très souvent transportés dans les nappes de charriage. Ce sont des dépôts turbiditiques composés d'alternances rythmiques (séquences) de bancs grossiers (grès, conglomérats) et de bancs fins (pélites, argiles). Les flyschs se forment dans des contextes de forte instabilité gravitaire dans les **prismes d'accrétion sédimentaire** liés à la phase de subduction d'abord océanique, puis continentale. Les **molasses** correspondent également à des formations sédimentaires détritiques plus ou moins grossières. Elles sont caractérisées par un environnement de type deltaïque (marin peu profond) ou fluvial (continental). Elles proviennent de l'érosion des reliefs formés pendant la collision et se déposent en position externe dans les sillons péri-alpins, interprétés comme des **bassins flexuraux** liés à l'avancée des nappes internes sur l'avant-pays.

La présence d'**unités ophiolitiques** témoigne de l'existence d'un paléo-océan au Jurassique supérieur (stade de divergence). Les fragments de lithosphère océanique ont été incorporés soit par **obduction** sans enfouissement et donc sans métamorphisme (Mont Chenaillet), soit par **subduction** suivi d'une **exhumation** (Mont Viso), qui se traduit par une évolution métamorphique P, T, t caractéristique de ce trajet (facies schistes bleus, éclogite).

Les **blocs basculés** observés dans la zone externe sont les témoins de l'extension de la marge continentale européenne au cours du Jurassique. Les failles normales sont **inversées** pendant la phase de compression.

Les **complexes ophiolitiques** sont caractérisés par une succession de roches (péridotites serpentinisées, gabbro, filons et coulées de basaltes sous-marin, radiolarites) qui correspondent à des restes de lithosphère océanique.

Dans les Alpes occidentales, la géométrie de la chaîne est marquée par une **structure à double déversement** avec le chevauchement des unités externes vers l'Ouest et le chevauchement des unités internes vers l'Est (**rétro-charriage**). Située au cœur de ce dispositif la zone briançonnaise présente une structuration **en éventail** résultant de la déformation tardive de la chaîne après la mise en place des nappes internes.

Après la subduction de la lithosphère océanique, le passage en subduction de la lithosphère continentale est rapidement bloqué du fait de sa faible densité. Un **prisme orogénique** se développe au contact entre les deux plaques en convergence. Cette géométrie « en coin » de la chaîne se construit à partir de la segmentation de la croûte et du redressement des unités de la marge continentale contre le butoir de la plaque chevauchante.

Le **métamorphisme barrovien** Moyenne Pression - Moyenne Température caractéristique de la collision continentale n'est connu que localement au niveau du dôme lépontin (Alpes suisses) pendant la période oligo-miocène, où il se surimpose à un métamorphisme précoce de subduction (Haute Pression – Basse Température).

Un **magmatisme calco-alkalin** d'âge Oligocène (Adamello, Bergell) se met en place en bordure de la ligne insubrienne, qui correspond à une grande structure décrochante. Ce magmatisme tardif est interprété comme résultant du détachement de la lithosphère européenne plongeante.

L'évolution actuelle de la chaîne de Alpes est caractérisée par un **aléa sismique important** et une activité tectonique marquée par de l'extension dans les zones internes et de la compression dans les zones externes. Ce champ de déformation est diversement interprété : effondrement gravitaire, expulsion latérale, rotation de l'Apulie.

1.2 La chaîne varisque

La chaîne varisque (ou hercynienne) est un vaste orogène, qui s'étend sur plusieurs milliers de kilomètres de l'Oural à l'Amérique du Nord et à l'Afrique de l'Ouest. Elle résulte globalement de l'assemblage de la plaque **Gondwana** au Sud et de la plaque **Laurussia** au Nord, qui va conduire à la formation de la **Pangée** à la fin du Paléozoïque. La plaque Laurussia résulte elle-même de l'accrétion des plaques Laurentia, Baltica et Avalonia au Paléozoïque inférieur (orogénèse calédonienne). Les microplaques **Armorica** et **Iberia** issues de la fragmentation du Gondwana vont participer à la construction de la chaîne varisque au Paléozoïque supérieur. Le terme varisque est réservé aux événements orogéniques qui se déroulent du Silurien au Carbonifère, dans lequel on distingue une évolution précoce, éovarisque, et tardive, hercynienne.

En Europe, l'édifice varisque est constitué de deux chaînes diachrones :

- **la chaîne Nord**, qui résulte de la subduction de l'**océan rhéique** au Dévonien, puis de la collision de la microplaque Avalonia avec la microplaque cadomienne (Armorica) au Carbonifère inférieur. En France, cette chaîne affleure principalement dans le massif paléozoïque des **Ardennes** qui correspond au domaine externe avec une tectonique en plis et chevauchements. La faille du Midi correspond au chevauchement frontal de la chaîne sur le bassin d'avant-pays d'âge Carbonifère. La suture océanique affleure au **Cap Lizard** au SW de l'Angleterre sous forme d'un complexe ophiolitique. La chaîne est masquée vers le Sud par le recouvrement des formations sédimentaires du bassin de Paris, mais des chevauchements importants impliquant le socle sont visibles sur le **profil ECORS**.

- **la chaîne Sud**, qui résulte de la subduction au Silurien de l'**océan centralien (ou galice)**, puis de la collision au Dévonien du Gondwana sous la microplaque cadomienne (Armorica). Elle affleure principalement dans le Massif Armoricain et dans le Massif Central. Une association particulière de roches métamorphiques, nommée **Complexe (ou Groupe) Leptyno-Amphibolitique** (CLA ou GLA) correspond à des roches magmatique acides (leptynites) et basiques (amphibolites) métamorphisées dans le faciès « Amphibolite », souvent associées à des péridotites serpentinisées. Les CLA sont interprétés comme des vestiges d'un rift plus ou moins évolué d'âge Cambro-Ordovicien correspondant au stade précédant l'ouverture océanique et considérés comme la zone de suture océanique de la chaîne Sud. Les amphibolites des CLA renferment des

reliques éclogitiques, mémoires d'un épisode de subduction. On trouve également à l'île de Groix et en Vendée des assemblages caractéristiques du faciès « Schiste Bleu » et « Eclogite », témoins également d'un épisode de subduction océanique.

Le Massif Central est structuré par un empilement de nappes métamorphiques plissées (**nappe des Gneiss Supérieurs, nappe des Gneiss Inférieurs**, etc.). Les roches de ces unités sont affectées par un métamorphisme barrovien Moyenne Pression – Moyenne/Haute Température associé à la collision continentale et marqué par une **importante fusion partielle** avec formations de migmatites et de plutons granitiques. Le chevauchement de l'unité supérieure des gneiss à reliques éclogitiques sur l'unité inférieure des gneiss sans relique de HP est à l'origine de la notion de **métamorphisme inverse**.

L'évolution tardi-orogénique est caractérisée par la formation de **dômes anatectiques** comme le dôme du Velay associé à un métamorphisme de Haute Température – Basse Pression. Le fonctionnement de **failles normales ductiles**, synchrones du remplissage de **bassins intra-montagneux** d'âge Carbonifère supérieur (Stéphanien) traduit un contexte localement extensif (document 4).

Dans le Massif Armoricaire, l'évolution tardi-orogénique est surtout marquée par le jeu de grandes **zones de décrochement ductiles** (Zones de Cisaillement Sud et Nord armoricaines) associées à la mise en place de granites syntectoniques et l'ouverture de **bassin Carbonifère en « pull-apart »**.

1.3. Comparaison entre la chaîne des Alpes et la chaîne varisque

La chaîne varisque a terminé son évolution et a été pénéplanée depuis le Permien alors que les Alpes présentent encore des reliefs très importants et sont toujours en pleine évolution. Ainsi l'étude de ces deux chaînes offre l'opportunité d'observer directement les structures de surface et la racine profonde d'une chaîne de montagne. On constate des **processus identiques** dans les deux chaînes (raccourcissement, enfouissement, exhumation, etc.), qui correspondent à l'évolution classique des **chaînes de collision continentale**.

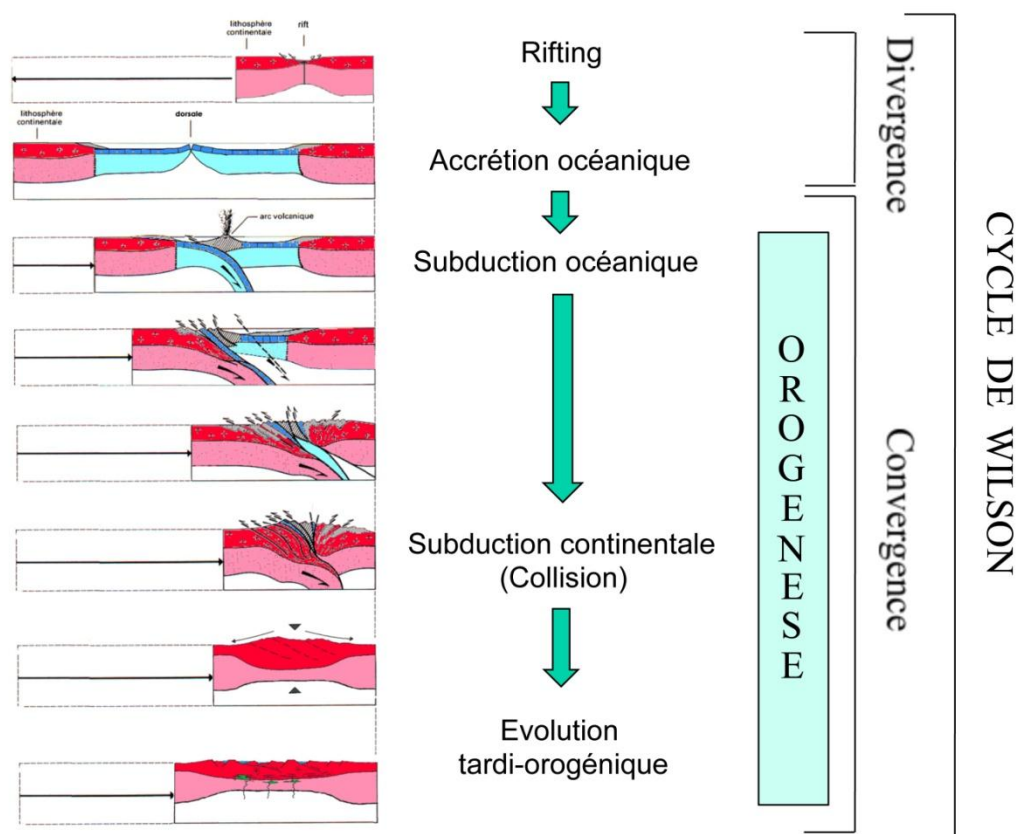
Toutefois les deux chaînes se distinguent par des conditions thermiques différentes :

- la chaîne des Alpes est surtout caractérisée par des **gradients métamorphiques HP-BT et un magmatisme orogénique peu abondant**. Elle est qualifiée de chaîne « froide »
-
- la chaîne varisque présente des **gradients métamorphique à M/HT-BP, avec une importante fusion partielle et la production d'un grand volume de granites**. Elle est qualifiée de chaîne « chaude »

Cette différence peut s'expliquer d'un manière simple par le fait que la chaîne des Alpes est une chaîne jeune qui n'a pas encore été suffisamment érodée pour révéler la présence en profondeur de manifestations métamorphiques et magmatiques, aujourd'hui observables dans la racine de la chaîne varisque.

D'autres explications plus complexes peuvent néanmoins être envisagées : quantité de lithosphère océanique subductée, implications de croûtes plus ou moins radiogéniques dans la collision, contribution de magmas mantelliques à l'apport de chaleur, etc.

Marqueurs	Alpes	Chaîne varisque
Reliefs	Reliefs positifs importants	Indices de reliefs positifs importants aujourd'hui érodés (racine)
Structures en compression	Plis, chevauchements, nappes de charriage	
Bassins sédimentaires	Prisme d'accrétion, bassins flexuraux (flysch et molasses)	
Métamorphisme	HP-BT (ultra HP), MP-MT localisé (dôme lépontin)	Reliques de HP-BT (ultra HP), puis MP-MT et HT-BP très développé
Magmatisme	Absent (non observé) pendant la subduction, très localisé pendant la collision.	Important à tous les stades d'évolution de la chaîne



2. Modélisation analogique

Comment la modélisation expérimentale répond à une démarche scientifique rigoureuse et permet de mieux comprendre les processus géologiques ?

Dans une démarche scientifique, réaliser une modélisation ne consiste pas à imiter la réalité d'un phénomène, mais à projeter le phénomène étudié dans un **espace dimensionné à l'échelle du laboratoire** et réalisé sur de **courtes durées**. L'observation du **comportement du modèle en fonction de la variation de certains paramètres** permet de tirer des enseignements sur un phénomène naturel.

Deux méthodes complémentaires sont classiquement utilisées en modélisation, soit la modélisation numérique, à partir de calculs et de résolution d'équations, soit la modélisation analogique en laboratoire à partir d'une maquette.

Pour réaliser une modélisation analogique en laboratoire, il faut réaliser le **dimensionnement de la maquette** et trouver des **matériaux analogues** dont les propriétés sont parfaitement connues. Le dimensionnement permet de vérifier que le phénomène observé est l'exacte représentation du phénomène géologique se déroulant sur des durées géologiques. Pour effectuer ce dimensionnement, on calcule des nombres sans dimension caractéristiques de l'objet naturel. Il faut que les rapports soient identiques (rapport de viscosité, de densité, etc.).

La modélisation analogique proposée permet de comprendre les différentes modes d'interactions entre la tectonique, l'érosion et la sédimentation dans la structuration de l'avant-pays de la chaîne des Alpes. Les conditions initiales tiennent compte de l'hétérogénéité rhéologique liée à **l'héritage structural, sédimentologique ou mécanique**.

Les **matériaux analogues** (sable, poudre de silice et de perles de verre) ont été **choisis en fonction des propriétés des unités géologiques** présentes sur la coupe transversale des Alpes occidentales étudiée (cohésion, résistance, etc.). La **géométrie du prisme** orogénique correspond à celle proposée dans les coupes géologiques (surface, plongement).

Plusieurs solutions ont été envisagées en faisant varier les **caractéristiques des niveaux de décollement**, les **taux de sédimentation** et **l'érosion**. Le résultat obtenu montre la formation d'un **système de chevauchements imbriqués** dans la partie externe (accrétion frontale) et l'**empilement antiforme de nappes** dans la partie interne (sous-placage) provoquant la surrection des unités profondes. Cette géométrie peut être comparée à celle de la coupe schématique des Alpes centrales (Document 1).

Partie II : une approche historique

Dès le début du XX^{ème} siècle, certains géologues avaient découvert, dans les chaînes de montagnes, des charriages impliquant des déplacements horizontaux importants (jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres). Ces observations étaient en contradiction avec l'idée que l'on se faisait généralement de la tectonique, car on supposait, alors, que les déplacements étaient essentiellement verticaux.

*A partir de l'étude des **documents 6, 7 et 8** et de vos connaissances, expliquez comment les idées ont évolué au cours de l'histoire des sciences sur la question de l'orogénèse.*

L'épistémologie de la question de l'orogénèse se confond en grande partie avec celle de la connaissance de l'histoire de la chaîne alpine. C'est dans les Alpes qu'est née la tectonique et que fut mise en évidence l'existence de mouvements horizontaux.

1. De la fin du 18^{ème} au début du 20^{ème} siècle, l'observation des structures géologiques conduit à l'idée de l'existence d'un lien entre mouvements verticaux et mouvements horizontaux de l'écorce terrestre.

Un certain nombre de géologues ont émis l'idée, dès la fin du 18^{ème} siècle, de l'existence de mouvements latéraux pour expliquer la formation de structures géologiques alpines.

- Le Suisse Horace-Bénédict de Saussure, dans ses Voyages dans les Alpes (1779-1796), parle le premier de plis, de déformations, et de déplacements.
- Le Français Déodat de Dolomieu (1798), explique ces déformations par des mouvements latéraux.
- L'Autrichien Eduard Suess (1875) interprète la chaîne alpine comme issue d'un déplacement tangentiel général depuis les zones internes vers un avant-pays, par une poussée venant du sud ou du sud-est
- Le Français Marcel Bertrand met en évidence entre 1884 et 1887, l'existence de nappes de charriage.
- Maurice Lugeon en 1902 dans un célèbre discours à Paris présente la « théorie des nappes »
- Le français Pierre Termier en 1907 décrit des nappes dans la zone briançonnaise qu'il attribue par la suite à l'effet d'un « traineau écraseur » déplaçant l'ensemble des structures de l'est vers l'ouest.
- Le suisse Emile Argand dont les travaux sont reproduits au travers des documents 6 et 7, fait partie de ces précurseurs se basant sur une observation très fine du terrain pour affirmer l'existence de nappes rocheuses dans l'ensemble alpin.

La coupe du Mont Cervin (document 6), est particulièrement révélatrice de structures incompatibles avec une tectonique uniquement verticale mais témoignant d'un déplacement horizontal. On peut en effet y reconnaître :

- une **disposition anormale des terrains** (terrains mésozoïques recouverts par les terrains pré-triasiques) ;
- la notion de **nappes de charriage**, de **surface de recouvrement** : recouvrement de la zone de Sesia (nappe de la Dent Blanche) sur la zone piémontaise.
- des **plis couchés** avec des charnières bien marquées.

Cette notion de nappes de recouvrement est très clairement affirmée dans le document 7 qui présente l'interprétation faite par Emile Argand en 1909 de la géologie de la zone pennique au cœur même de la chaîne alpine.

Il place la zone des nappes penniques entre des « massifs obstacles » à l'ouest et une « zone interne » à l'est. Son interprétation montre une déformation des terrains du sud-est vers le nord-ouest. Les déformations visibles en surface s'enracinent en profondeur. On retrouve les plis couchés, les renversements, typiques d'une tectonique tangentielle.

Plusieurs nappes différentes de grande ampleur sont mises en évidence, le mont Cervin (document 6) appartient à la nappe de la Dent Blanche.

Sur le plan cartographique, les travaux d'Argand sont donc de véritables chefs-d'œuvre. Au plan de la description géométrique des structures tectoniques, les observations et interprétations d'Emile Argand sont pour leur très grande majorité toujours valables aujourd'hui.

2. La recherche d'une explication aux mouvements horizontaux au cours du 20^{ème} siècle.

A l'époque des précurseurs de la géologie alpine, on explique la formation des chaînes de montagnes et l'existence de mouvements latéraux par la théorie des géosynclinaux (document 8). Les déplacements horizontaux observés sont expliqués par un léger raccourcissement au niveau de la croûte, consécutivement à la contraction thermique de la Terre sous l'effet de son refroidissement. La contraction de l'écorce terrestre conduit à la formation d'une immense ride, le géanticlinal, et d'un large sillon parallèle, le géosynclinal, dans lequel s'accumulent d'épais sédiments. Lors d'une nouvelle contraction, même légère, ces sédiments se plissent puis remontent verticalement pour former les chaînes de montagnes.

Selon cette conception, le métamorphisme est dissocié de la formation des reliefs puisqu'il se produit dans le géosynclinal.

Dès 1912, les idées concernant la mobilité horizontale vont évoluer. On pense bien sûr aux idées d'Alfred Wegener et à sa théorie de la dérive des continents (1912), aux controverses qu'elle suscitera jusqu'à l'élaboration du modèle de la tectonique des plaques dans les années 1960.

La théorie du géosynclinal ne survivra pas à l'avènement de la tectonique des plaques mais elle sera mise à mal bien avant les années 1970 par des travaux sur le métamorphisme qui montreront son caractère synorogénique (Eskola, 1915 ; Demay, 1931 ; Stille, 1936).

3. Des mouvements horizontaux aux mouvements verticaux, vers une approche moderne de l'orogénèse.

Le sujet étant focalisé sur les processus orogéniques, il ne s'agissait pas de développer tout l'historique du modèle de la tectonique des plaques. Un court résumé de l'évolution du modèle et des débats scientifiques en fonction des découvertes pouvait néanmoins être développé brièvement par le candidat (de Wegener à aujourd'hui) :

- Arthur Holmes (1945) : existence de mouvements de convection, moteur des mouvements horizontaux
- Harry Hess (1962) (topographie des fonds océaniques), programmes de forages DSDP (Deep Sea Drilling Project, 1970) et ODP (Ocean Drilling Project, 1979), Fred Vine et Drummond Matthews (bandes d'anomalies magnétique) : expansion des fonds océaniques.
- Kiyoo Wadati, 1935 et Hugo Benioff (1945) : zone de subduction déduite de la répartition de la sismicité.
- **Jason Morgan** (1967), Dan McKenzie (1967), puis **Xavier Le Pichon** (1968) énoncent la théorie synthétique de la tectonique des plaques avec découpage de la surface du globe en plaques lithosphériques.

Aujourd'hui grâce à l'apport de nouvelles techniques (tomographie sismique, géodésie spatiale, modélisation numérique, pétrographie expérimentale) : discussion sur les moteurs, sur la dynamique du manteau.

Partie III : « de la science qui se fait à la science en classe »

Remarques préliminaires à la correction du sujet de géologie concernant la partie didactique (partie III de ce sujet).

La troisième partie du sujet de géologie permettait de tester la faculté des candidats à prendre du recul vis-à-vis de leurs connaissances universitaires afin d'envisager des éléments propices à une démarche de transposition efficace dans le cadre de l'enseignement au collège et au lycée. Il ne s'agit pas dans cette partie de l'épreuve de demander aux étudiants de maîtriser des compétences nécessitant une professionnalisation importante (savoir bâtir une progression pédagogique, connaître précisément la cohérence verticale des programmes, construire une séance d'apprentissage,...) mais de tester la capacité à identifier des éléments bloquants ou facilitateurs pour adapter un discours scientifique à un niveau donné. C'est donc la notion de « points de vigilance » qui est abordée dans le sujet. Il convient pour cela de bien maîtriser les notions et d'avoir une réflexion centrée sur l'élève : pouvoir envisager un problème géologique ou biologique au travers de son « regard » afin d'identifier ce qui est important, ce qui fait sens pour lui, (y compris en terme d'enjeux éducatifs le cas échéant) et d'imaginer une stratégie répondant à ses besoins. Afin de réaliser une transposition efficace, il faut aussi savoir simplifier sans caricaturer une explication ou un concept, sans perdre de rigueur et sans dénaturer la qualité du raisonnement scientifique.

Afin d'assurer une bonne préparation à cette épreuve, le jury ne peut que conseiller aux formateurs d'insister sur le sens à donner à l'enseignement des sciences dans le cadre du projet de l'école républicaine. Les candidats ont été pour la plupart totalement démunis face à la question posée d'exploitation de l'histoire des sciences (non comprise et souvent non traitée) ou du modèle dans la démarche pédagogique. Pour parvenir à une telle intégration, il faut en effet envisager la science comme une œuvre humaine qui se construit au cours du temps et maîtriser la dialectique des faits et des idées dans une perspective que résume si bien François Jacob dans *La souris, la mouche et l'homme* : « la démarche scientifique consiste à confronter sans cesse ce qui pourrait être à ce qui est ». Le modèle est ainsi du domaine de l'idée, de la (re)construction intellectuelle ; il s'agit de discuter son lien avec les faits, de comprendre ce qu'il permet de dire et surtout dans le cas de l'exemple traité, de ne pas dire en exerçant son esprit critique. Son rôle pédagogique, et non seulement didactique, aurait dû être davantage considéré par les candidats mais il est surprenant de constater que ce n'est quasiment jamais le cas.

D'une autre manière, l'exploitation des représentations d'élèves s'est avérée particulièrement décevante. Un nombre non négligeable de candidats considèrent les représentations initiales des élèves proposées comme valables et en concluent qu'ils ont été bien formés par leurs enseignants. Les candidats focalisent alors leurs critiques sur la forme (absence de titre, de légendes). Le point de vigilance dégagé est alors cohérent : former les élèves à la schématisation ! Cela révèle que les conceptions sont tenaces puisqu'elles perdurent encore chez des étudiants pourtant plusieurs années après le baccalauréat...

Lorsque des obstacles conceptuels sont constatés, on se focalise sur la structure (croûte et non lithosphère) et non sur le mécanisme décrit. Il y a par exemple fort peu d'allusions aux déformations que devrait subir la lithosphère. Les analyses demeurent très superficielles ce qui montre que les étudiants n'ont pas eu d'apports formels en didactique des sciences.

Le jury suggère donc que les futurs candidats reçoivent une formation sur les principaux résultats de la recherche en didactique des sciences et soient en mesure de prendre du recul par rapports à l'ensemble de leurs connaissances scientifiques. En tant que futurs enseignants, ils n'en demeurent pas moins en premier lieu des scientifiques dont la principale qualité réside dans l'entretien du doute sur les savoirs acquis. Il ne s'agit pas de faire des candidats au CAPES de SVT des chercheurs en didactique maîtrisant les méthodes et les cadres d'études mais d'opérationnaliser les résultats de la recherche pour qu'ils soient utiles directement aux futurs professeurs. Il s'agit en somme de didactiser la recherche en didactique, de la rendre accessible en démontrant son utilité dans le quotidien de la classe. Les éléments de correction ci-après empruntent par exemple beaucoup à certains travaux universitaires (voir les diverses publications de Denise Orange Ravachol) et montrent comment cette opérationnalisation peut prendre forme.

Le document 9 présente des travaux d'élèves de quatrième et de terminale répondant à la consigne : « comment une chaîne de montagnes se forme-t-elle ? ». Les élèves n'ont pas encore abordé le cours correspondant.

1- Donnez quelques éléments d'analyse des productions réalisées par les élèves. Dégagez de ces représentations initiales quelques points de vigilance pour le professeur des classes concernées.

Elève A - Terminale S

La notion de convergence lithosphérique est clairement indiquée mais l'élève ne précise pas ce qui sépare les deux plaques (domaine océanique ?). Il ne dit pas ce que devient la matière présente entre les deux plaques. Il n'y a aucune mention d'une éventuelle subduction. La collision des deux plaques provoque leur surrection. Chacune contribue à la formation des reliefs pour une part égale. Il est intéressant de noter que les deux plaques restent intactes. Sous les plaques, que se passe-t-il ? Sans commentaires, ni légendes, on peut penser que l'élève ne s'est pas questionné ou qu'il imagine qu'il y a une remontée du matériel sous-jacent pour combler « le vide ». Le moteur du déplacement semble situé dans les plaques elles-mêmes « elle poussent » chacune de leur côté pour finir par « monter » l'une contre l'autre. Aucune mention n'est faite du temps nécessaire à cette formation. On peut noter une certaine idée de raccourcissement induit par la « surrection » des deux plaques.

Elève B - Terminale S

Le rapprochement de deux plaques est cité mais l'élève se focalise sur le « chevauchement ». Les deux plaques sont actives : l'une passe en dessous, l'autre « par-dessus ». Le chevauchement est perçu comme un glissement d'une plaque sur une autre. L'élève pense que le soulèvement de la surface de la Terre s'effectue seulement par la plaque chevauchante qui est poussée vers le haut : la flèche et la forme de la plaque indiquent qu'elle est déformée par le contact avec la plaque chevauchée. Celle-ci plonge comme le signalent la flèche et l'allure arquée de l'extrémité de la plaque. C'est ce « plongement » qui maintient la poussée et surélève l'extrémité de la plaque chevauchante. Les reliefs épousent la forme arrondie de cette plaque. La représentation schématique pourrait laisser à penser qu'il y a une confusion dans l'esprit de l'élève entre chevauchement et subduction.

La notion d'échelle de déformations n'est pas présente. Le chevauchement est global.

Les plaques sont des entités distinctes de la surface de la terre. Qu'y a-t-il entre elles et la surface ? Une idée de phénomène continu est présente (le phénomène se poursuit avec le plongement de la plaque subduite et « chaque année quelques millimètres sont gagnés »).

Une certaine référence à la nature actuelle est présente mais l'utilisation de l'actualisme reste sommaire.

L'élève invente une explication pour rendre compte de la formation des reliefs à partir des outils dont il dispose mais sans respecter les règles qu'impose la connaissance de la tectonique.

Elève C - Quatrième

Pour expliquer le phénomène « orogénèse », l'élève a recours à un récit événementiel de type catastrophiste. Il raconte une histoire. Le « choc » est l'image forte dans son esprit. De la matière semble projetée vers le haut, quelle est-elle ?...

La chaîne de montagnes est une « boîte noire ». La notion de convergence lithosphérique est là mais une certaine confusion est présente en ce qui concerne le mouvement des plaques et le devenir du matériel qui les constitue : elles « glissent », ensuite elles se « frottent » puis se « chevauchent », en se heurtant « vers le haut » (on retrouve là la conception présente chez l'élève A). La notion de temps long n'est pas présente, et l'idée d'ensemble pourrait être rapprochée d'une certaine pensée « naïve » (recours au catastrophisme).

Points de vigilance pour le professeur de terminale.

Bien distinguer le phénomène géologique que l'on comprend et explique par des principes structurants, de l'événement, ou la suite d'événements, régi par une histoire, pour que l'élève puisse transférer les connaissances. Il va s'agir en maîtrisant le principe d'actualisme et la connaissance de la tectonique des plaques de passer du récit à l'explication argumentée et critique.

Pour cela, il convient d'être vigilant à bien problématiser les études, à ouvrir le questionnement mais aussi les réponses possibles pour comprendre pourquoi certaines sont conservées, quand d'autres non. Aller vers un débat raisonné, comprendre comment se construit la science et ne pas seulement donner

ses résultats. Ne pas être soi-même dans un « story telling » mais faire dialoguer en permanence les faits et les idées.

Les élèves se focalisent sur les reliefs (ils cherchent par un récit linéaire, par une succession d'événements plus ou moins extraordinaires, à rendre compte de leur formation) mais ils n'ont pas conscience que le phénomène s'intègre dans une dynamique plus globale de la Terre. L'étude des traces de l'océan disparu, de la subduction océanique doit permettre à l'élève de prendre conscience de cet aspect. Un travail sur la notion de « moteur » du déplacement des plaques est important (rôle de la subduction notamment).

La notion de temps long est essentielle pour comprendre le phénomène, une attention particulière doit être portée à cet aspect. Il convient aussi de donner une importance au cadre spatio-temporel pour comprendre les relations de causes, conséquences. Des exercices de datation relative et absolue permettront de replacer les événements dans une perspective historique pour mieux appréhender le phénomène grâce à un actualisme élaboré (comprendre que les processus demeurent mais pas les objets – tels les plaques).

Une étude à différentes échelles pourrait permettre de faire le lien entre la convergence des plaques, les déformations en surface, en profondeur et la dynamique globale de l'orogénèse.

L'étude d'un exemple précis amène les élèves à raisonner. Par exemple, le fait de concevoir que dans les Alpes, les plus hauts sommets appartiennent à la plaque plongeante permettrait à l'élève B de relativiser son idée. L'observation de déformations des deux plaques, les klippes et autres fenêtres peuvent bousculer l'élève A dans ses convictions.

La notion de prisme orogénique, de raccourcissement et d'épaississement de la lithosphère est déterminante pour que l'élève arrive à concevoir les conséquences de la convergence lithosphérique et la part prise par chacune des plaques. C'est dans ce cadre qu'il convient de placer l'étude du charriage, du chevauchement. **La mobilité horizontale doit être associée à la mobilité verticale de l'ensemble de la chaîne.** La notion d'isostasie est un point de vigilance important pour comprendre que les reliefs proviennent de l'enfouissement de matériel moins dense dans du matériel plus dense.

L'étude d'arguments en faveur d'une subduction continentale permettrait de combattre l'idée de la « surrection » des deux plaques (élève A).

Enfin, quel que soit l'élève, la plaque est une entité homogène. Il convient ainsi de bien démontrer l'hétérogénéité de la plaque, et d'insister sur sa partie mantellique. Si la plaque était homogène, il n'y aurait ni subduction, ni sous-charriage, ni délamination.

Points de vigilance pour le professeur de quatrième.

Il est important de replacer la formation de la chaîne de montagnes dans le cadre global de la tectonique des plaques. La notion de subduction est centrale pour comprendre comment les plaques peuvent entrer en collision. La notion de déformation à différentes échelles permettrait de montrer que la chaîne résulte d'un raccourcissement de la lithosphère qui affecte les deux plaques. La collision doit être présentée comme une subduction qui se poursuit en affectant les continents qui avaient été séparés par l'ouverture d'un domaine océanique.

Le document 10 présente un « modèle » fréquemment utilisé en classe dans le cadre de l'étude de la convergence lithosphérique. Des couches de plâtre colorées avec de la craie pilée sont déposées dans une cuve, un piston permet de les compresser contre une paroi.

2- Discutez de la façon dont le modèle (document 10) pourrait être intégré dans le cadre d'une séquence d'apprentissage, et de l'intérêt et des limites de cette utilisation.

L'objet présenté par le document 10 peut être considéré comme un modèle analogique : c'est un objet qui peut avoir une fonction explicative mais qui peut aussi avoir une fonction prédictive. C'est un élément de substitution de la réalité qui vise à sa compréhension. Il est partiel et, par nature, incomplet. Le modèle explique partiellement les faits, il permet de comprendre une réalité mais en aucun cas, il ne peut servir à démontrer la théorie scientifique car il en est issu.

En classe, le modèle présente un double rôle :

- didactique (faciliter l'acquisition des connaissances, mieux comprendre, pratiquer une démarche scientifique).
- pédagogique (mise en activité des élèves, développement de compétences).

L'intégration du modèle de classe dans la progression pédagogique nécessite de :

- s'approprier le modèle : comprendre que l'on est dans le domaine de « l'idée », comprendre le lien entre le modèle et la théorie, identifier ses caractéristiques, ses contraintes, ses limites, en le faisant fonctionner ;

- éprouver le modèle : sélectionner des faits en relation avec lui, confronter ses résultats aux données de terrain, concevoir un protocole d'utilisation qui permette de tester sa valeur prédictive, le critiquer à l'aune de sa capacité de prédiction, le modifier, le compléter si besoin pour l'améliorer (c'est-à-dire aller vers une meilleure capacité prédictive).

Le modèle présenté dans le document 10 peut ainsi être intégré dans une progression pédagogique en quatrième ou en terminale ayant pour objet d'appréhender les questions de convergence lithosphérique.

Il est essentiel de présenter le cadre théorique dans lequel s'inscrit l'utilisation du modèle.

Ce n'est pas un modèle réduit de chaîne de montagnes. Ce n'est pas non plus un modèle permettant de simuler et de comprendre les processus orogéniques. Il ne permet pas de « visualiser la formation d'une montagne » au risque de renforcer les représentations basées sur « le choc » et la formation des reliefs uniquement contrôlés par des « mouvements vers le haut ».

Il s'agit d'un objet permettant par une analogie, une **convergence de formes**, de faire raisonner les élèves et de développer des compétences. Il permet de montrer que la compression provoque un raccourcissement et un épaississement.

Pour s'approprier le modèle, il est possible d'imaginer « faire comme » à partir d'une photographie d'affleurement présentant une faille inverse affectant des terrains sédimentaires. On choisira avec profit un affleurement présentant une discordance angulaire nette. C'est la fonction explicative du modèle qui est utilisée pour mieux comprendre les faits observés (ici la datation relative, un élément clé pour comprendre l'argumentation des scientifiques qui étudient les chaînes de montagnes).

L'élève observe la photographie d'affleurement et après avoir rapidement pris en main le modèle par un protocole simple d'utilisation, il essaie de reproduire la succession d'événements (dépôts sédimentaires, déformation, érosion, dépôts sédimentaires à l'origine des structures observées). La convergence de formes obtenues avec la nature permet à l'élève de mieux comprendre les principes de la datation relative.

Cette activité permet à l'élève de percevoir les limites du modèle et ses contraintes :

- le matériel est granulaire et non compacte : l'utilisateur du modèle ne « déforme » pas du sable, ou du plâtre, il pousse des grains. La « faille » obtenue est un **phénomène de convergence**, car il s'agit en fait d'un alignement de grains selon une direction privilégiée liée à la poussée qui s'effectue du bas vers le haut la plupart du temps car cela est visible sur la photographie (c'est la différence de couleur qui rend cela apparent, si le plâtre était entièrement blanc, il n'y aurait pas de structure visible).
- Le matériel est homogène : il empêche ainsi, par exemple, la réalisation d'un pli isopaque. En effet, un tel pli est le résultat d'une flexion, elle est impossible ici car il faudrait des disharmonies de composition (le matériel devrait être hétérogène, en résistance comme en densité). Aucun pli synclinal n'est possible car aucune couche ne peut se déformer sur une couche moins déformable. Il suffit pour s'en convaincre de comparer l'image obtenue avec une photographie de pli dans la nature ou de faire glisser le matériel sur une pente (slumping), il n'y aura pas de plis mais un mélange complet des différentes couches.
- Le modèle est borné dans sa partie inférieure, la compression conduit donc inévitablement à des structures qui « montent », comme dans l'imaginaire des élèves. On ne peut visualiser avec cet objet que des « anticlinaux » qui ne sont jamais associés comme dans la nature à des synclinaux. Dans les chaînes de montagnes, il n'y a pas de borne inférieure, il y a deux bords libres et la tendance est pour la matière d'être attirée vers le bas. Nous sommes donc bien loin avec cet objet analogique d'une modélisation de la formation d'une chaîne de montagnes.
- L'observation d'un « anticlinal » est néanmoins possible par convergence de formes mais il faut comprendre que c'est la somme des microdéplacements des grains qui se matérialisent par des « microfailles », en réalité de petits alignements successifs, qui peut donner cette allure globale.

- Le moteur est ici une poussée, qui n'est pas maîtrisée, quantifiée, ni en vitesse, ni en durée.

Malgré toutes ses limites, il est intéressant dans le but de développer l'esprit critique des élèves de tester la valeur prédictive du modèle :

- redonne-t-il la même structure à chaque fois ?
- peut-on déterminer un protocole ne faisant varier précisément qu'un seul paramètre ?
- peut-on l'améliorer ?

De nombreuses capacités peuvent être développées à partir de l'utilisation de ce modèle. La prise de photographies, de vidéos, l'utilisation de calques, la rédaction d'un compte rendu, le calcul d'un coefficient de raccourcissement peuvent en effet venir accompagner les attitudes de pensée critique, d'organisation, de rigueur, de sens de l'observation, pour, en appui des connaissances nécessaires sur les structures géologiques et le comportement des matériaux, développer des compétences.

En conclusion, du fait de sa très faible valeur prédictive, d'un rapport très éloigné avec les phénomènes naturels, l'intérêt didactique (pour l'enseignement de la géologie) de ce modèle est faible. Par contre, en raison des capacités variées qu'il permet de développer et surtout des attitudes qu'il met en jeu, sa valeur pédagogique est intéressante (en terme de développement de compétences).

3- En utilisant les différents documents, indiquez comment la dimension historique pourrait être utilisée afin de lutter contre les représentations de certains élèves.

« L'approche historique d'une question scientifique peut être une manière originale de construire une démarche d'investigation. L'histoire de l'élaboration d'une connaissance scientifique, celle de sa modification au cours du temps, sont des moyens utiles pour comprendre la nature de la connaissance scientifique et son mode de construction, avec ses avancées et éventuelles régressions. » Préambule du programme de lycée.

Si, selon une célèbre formule d'André Giordan, une bonne méthode pour lutter contre les représentations tenaces des élèves, consiste à « faire avec pour aller contre », la confrontation de ce que pensent les élèves avec ce que des scientifiques ont imaginé par le passé est particulièrement féconde. En amenant les élèves à comprendre pourquoi certaines idées ont été conservées, ou aménagées, et demeurent robustes ; mais aussi pourquoi d'autres n'ont pas tenu l'épreuve du temps et l'évolution des modèles explicatifs ou des outils d'investigation, ils peuvent être conduits à remettre en cause leurs conceptions. Ils sont amenés en confrontant leur vision avec des arguments de raison utilisés par le passé, arguments qui ont conduit à faire évoluer les idées, à faire évoluer les leurs... En voyant comment des arguments et des idées ont fait évoluer des représentations du monde, en augmentant leur « expérience géologique » par des raisonnements et des solutions multiples, ils peuvent être amenés à changer de point de vue.

Le document 8 (théorie du géosynclinal) est intéressant à confronter avec la représentation de l'élève A et de l'élève C. On retrouve en effet l'idée selon laquelle la convergence induit la surrection de matériel enfoui. Comprendre en quoi cette idée a été rejetée (arguments liés au métamorphisme, inadéquation avec le modèle de la tectonique des plaques) est facteur de déstabilisation des conceptions. Un œil plus critique peut être exercé par les élèves sur leurs propres représentations.

Les documents 6 et 7 (travaux d'Emile Argand) peuvent être confrontés à la conception de l'élève B (mais aussi A). Ces observations d'une grande précision sont toujours d'actualité, depuis plus d'un siècle, les scientifiques n'ont pas profondément remanié ses schémas structuraux. Ils montrent clairement la dynamique de chevauchement, la superposition des nappes, la participation des deux plaques à l'élaboration des reliefs. Ils permettent d'illustrer la notion de mobilité horizontale.