

Sixième partie:

Les phénomènes géologiques accompagnant la formation des chaînes de montagnes et leur relation avec la tectonique des plaques

Introduction:

La formation des chaines de montagnes fait partie d'un cycle appelé le cycle Orogénique. Ce processus se passe au cours de millions d'années et dépend de la tectonique des plaques.

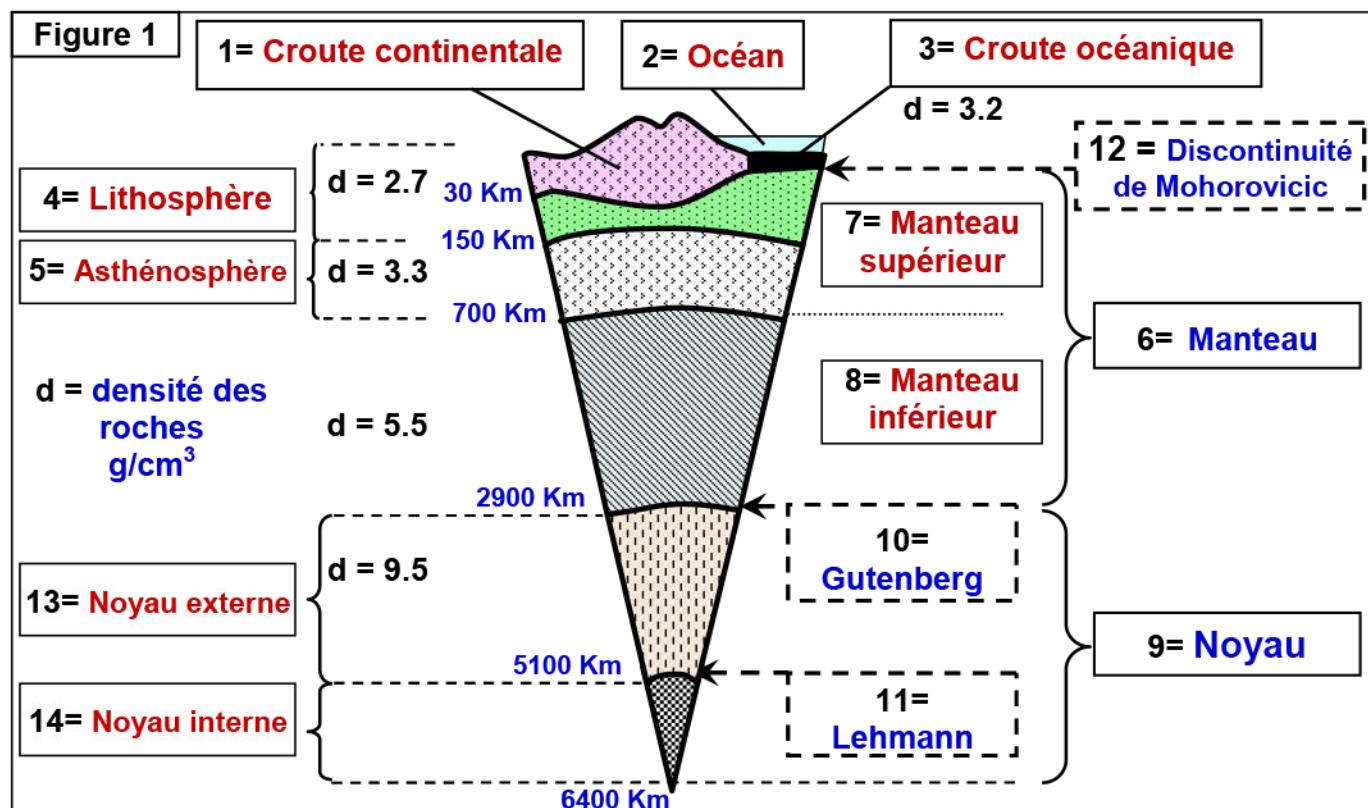
- Peut-on retrouver dans ces chaines des traces de leur histoire ?

Rappel: la structure interne de la terre.

Document 1: La structure du globe terrestre.

L'intérieur de la terre est constitué d'une succession de couches de propriétés physiques différentes. Les sismologues Mohorovicic, Gutenberg et Lehmann ont réussi à déterminer l'état et la densité des couches par l'étude du comportement des ondes séismiques lors des tremblements de terre.

La figure 1 est une coupe schématique présentant la structure interne du globe.

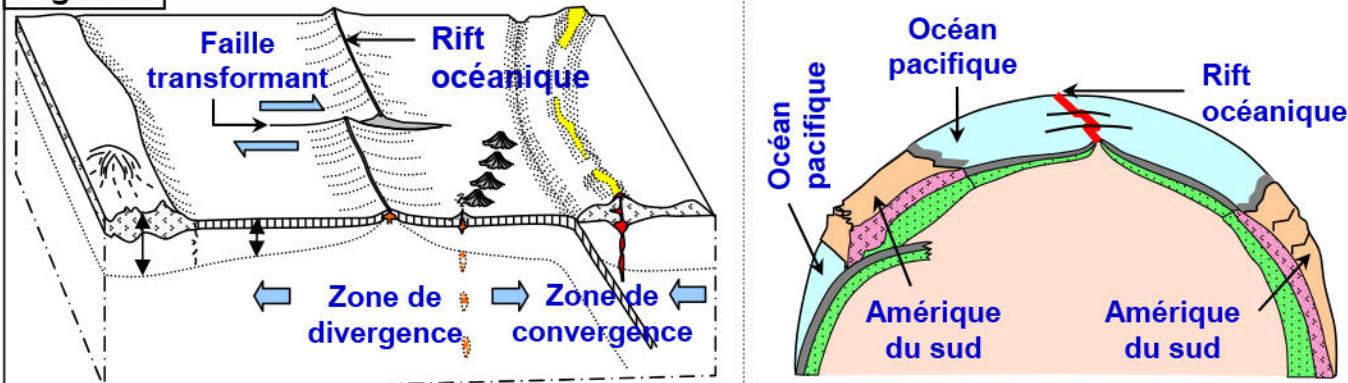


Selon la théorie de la tectonique des plaques, l'ensemble de la lithosphère est divisé en une douzaine de grandes plaques principales qui se déplacent les unes par rapport aux autres. Les frontières entre plaques sont de trois sortes (figure 2):

- ✓ **Frontières divergente:** Quand une plaque s'éloigne d'une autre plaque, exemple les dorsales médio-océaniques.
- ✓ **Frontière convergente:** Quand il y a deux plaques qui entrent en collision. Exemple les zones de subduction.
- ✓ **Les frontières transformantes :** Quand deux plaques se déplacent horizontalement l'une par rapport à l'autre. Ce sont des zones de frottement.

Document 1: (Suite).

Figure 2



L'intérieur de la Terre est constitué d'une succession de couches de propriétés physiques différentes :

- ★ La croûte se différencie du manteau essentiellement par sa composition chimique:
 - ✓ La croûte océanique (7 Km d'épaisseur) a une composition moyenne proche de celle du "basalte", donc une densité relativement élevée (3,2 g/cm³);
 - ✓ La croûte continentale (30 à 40 Km d'épaisseur, jusqu'à 70 dans les montagnes) a une composition proche de celle du "granite", donc une densité relativement faible (2,7);
- ★ Le manteau (qui a près de 3000 Km d'épaisseur) a une composition proche de celle des "péridotites", donc une densité élevée. La discontinuité de Moho marque un contraste de densité entre la croûte terrestre et le manteau.
 - ✓ La lithosphère (environ 100 km d'épaisseur) comprenant la croûte et la partie la plus superficielle du manteau (le "manteau lithosphérique") se différencie par sa rigidité.
 - ✓ L'asthénosphère (du grec Asthenos = mou), partie sous-jacente du manteau supérieur (jusqu'à une profondeur de 500 à 700 km) qui, du fait d'une température élevée (plus de 1300°), est relativement plastique.
- ★ Le noyau : La discontinuité de Gutenberg marque un contraste important de densité entre le manteau et le noyau. Une troisième discontinuité sépare le noyau en noyau interne solide et noyau externe liquide, c'est la discontinuité de Lehmann.

Selon la théorie de la tectonique des plaques, l'ensemble de la lithosphère rigide est divisé en une douzaine de plaques qui se déplacent les unes par rapport aux autres. Ce déplacement génère la formation d'un océan. Le volume de la terre étant constant, l'ouverture d'océans est compensée par la fermeture de plus anciens et par conséquence la formation de chaînes de montagnes.

- Quelles sont les conditions de formation de ces chaines de montagne?
- Quelles sont les caractéristiques structurales et pétrographiques de ces chaines de montagnes?
- Quelles sont les phénomènes géologiques qui accompagnent la formation des chaînes de montagnes et leur relation avec la tectonique des plaques ?

Chapitre 1: Les chaînes de montagnes récentes et leurs relation avec la tectonique des plaques

Introduction:

Une chaîne de montagne est une zone à fort relief qui s'étend sur des longueurs variables. Les caractéristiques et la répartition de ces reliefs s'expliquent dans le cadre de la théorie de la tectonique des plaques.

- Quelle relation y'a-il entre la répartition des chaînes de montagne récentes et la tectonique des plaques?
- Quelles sont les différents types de chaînes récentes et quelles sont leurs caractéristiques ?
- Quelles sont les principales déformations tectoniques qui caractérisent les chaînes de montagnes récentes ?

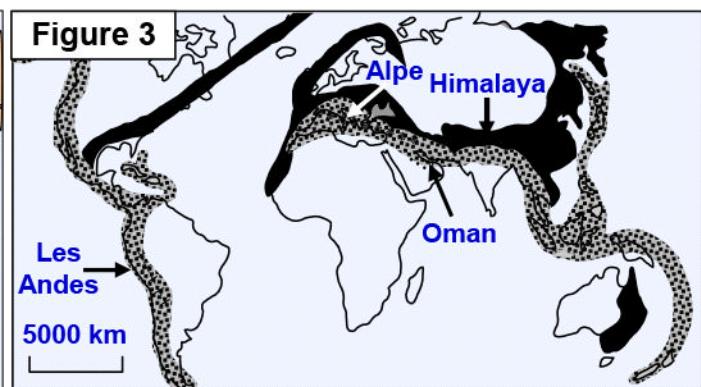
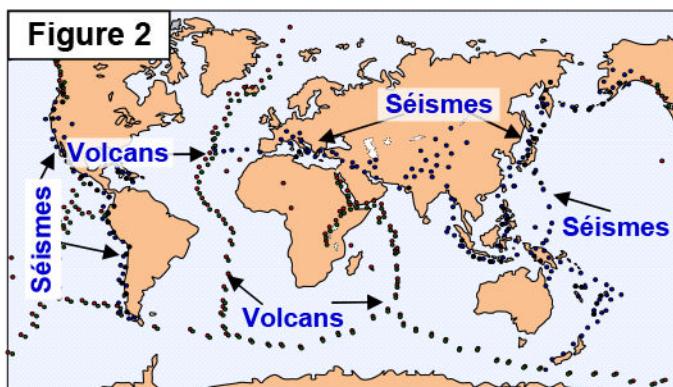
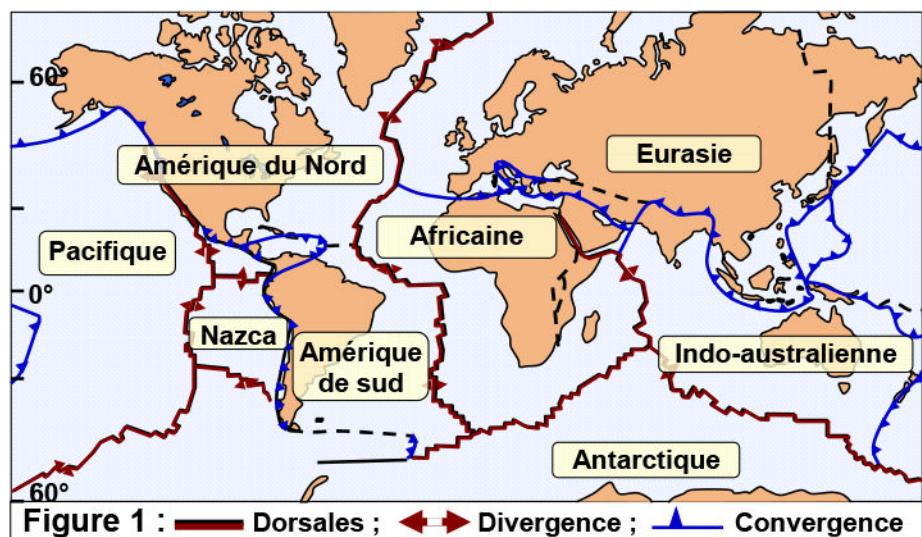
I – Les différents types de chaînes de montagnes récentes.

(Voir document 2)

Document 2: Répartition des différentes chaînes de montagnes récentes.

Les plaques sont des morceaux rigides de lithosphère en mouvement sur l'asthénosphère, couche relativement ductile du manteau supérieur.

- ✓ La figure 1 : carte de répartition des plaques lithosphériques.
- ✓ La figure 2 : Répartition des séismes et volcans à l'échelle mondiale.
- ✓ La figure 3 : Répartition des chaînes de montagnes.



En se basant sur les données de ce document et sur vos connaissances :

- 1) Déterminez les caractéristiques des limites des plaques lithosphériques.
- 2) Décrivez la répartition des chaînes de montagnes récentes.
- 3) Classez ces chaînes de montagne selon sa localisation.

- 1) Les plaques lithosphériques, aussi appelées plaques tectoniques, sont des «morceaux» de la lithosphère qui reposent sur l'asthénosphère moins rigide. Les plaques s'assemblent à la manière d'un puzzle sur l'ensemble de la surface de la Terre. Elles ont la particularité de se déplacer, à la suite des mouvements convectifs qui existent dans le manteau.
- Ces plaques lithosphériques sont caractérisées par une activité géologique peu importante, mais sont bordées de frontières étroites géologiquement actives. On détermine 3 types de frontières :
- ✓ Des zones de divergence: Les dorsales océaniques : sont des reliefs océaniques caractérisés par une grande activité magmatique, responsable d'un mouvement de divergence des plaques qui tendent à s'éloigner de part et d'autre de ces dorsales.
 - ✓ Des zones convergentes : montrent une activité sismique qui ne peut s'expliquer que par la présence de matériel solide en profondeur, suite à des collisions ou à des subductions.
 - ✓ Des zones de coulissage : Les failles transformantes : ce sont des zones du globe en mouvement bien qu'elles ne soient ni des zones de divergence, ni des zones de convergence.

2) La répartition des chaînes de montagnes récentes, coïncide avec les limites des plaques dans les zones de convergences où s'affrontent :

- ✓ Les plaques lithosphériques océaniques pacifiques avec les plaques lithosphériques continentales Amériques et eurasiatiques, formant des marges actives ou zones de subduction
- ✓ Les plaques lithosphériques continentales africaine et indienne avec la plaque lithosphérique continentale eurasiatique formant des zones de collision.

Les chaînes de montagnes récentes sont donc le résultat de l'activité des limites des plaques dans les zones de convergences.

3) Les chaînes de montagne récentes peuvent être classifiées par la façon de formation en:

- ✓ Chaines de subduction: Lorsqu'une plaque lithosphérique océanique s'incurve et plonge sous une autre plaque avant de s'enfoncer dans le manteau.
- ✓ Chaines d'obduction: lorsqu'une croûte océanique chevauche une autre croûte.
- ✓ Chaines de collision : lorsque deux plaques lithosphériques continentales se rencontrent.

II – Caractéristiques des chaînes de montagnes récentes.

① Les chaînes de subduction (Exemple les Andes):

a) Caractéristiques structurales et géophysiques des zones de subduction: (Voir document 3)

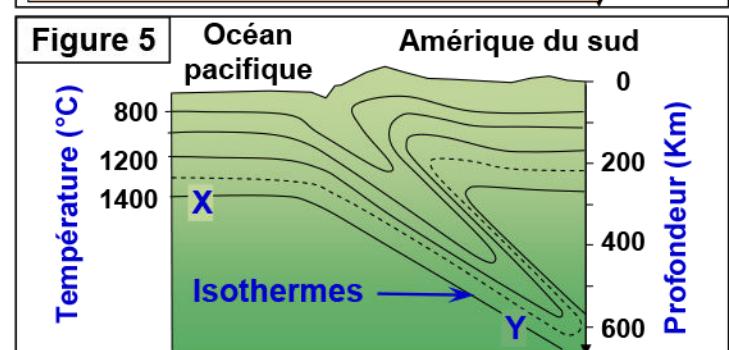
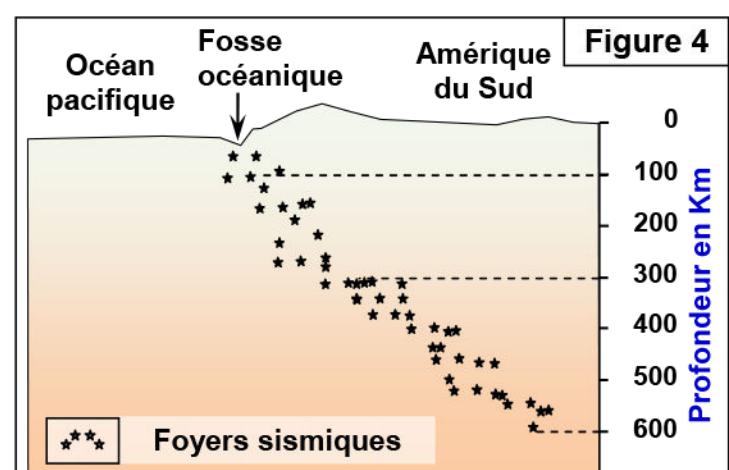
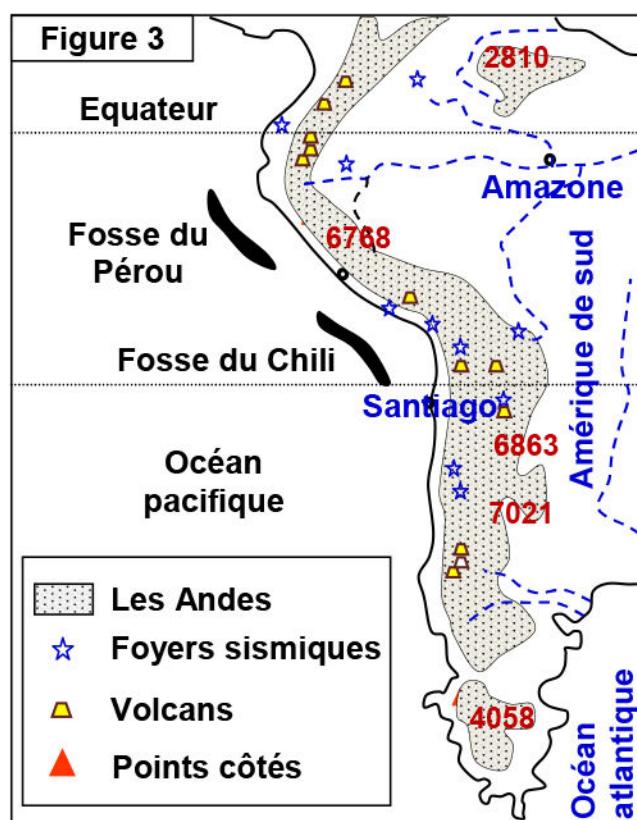
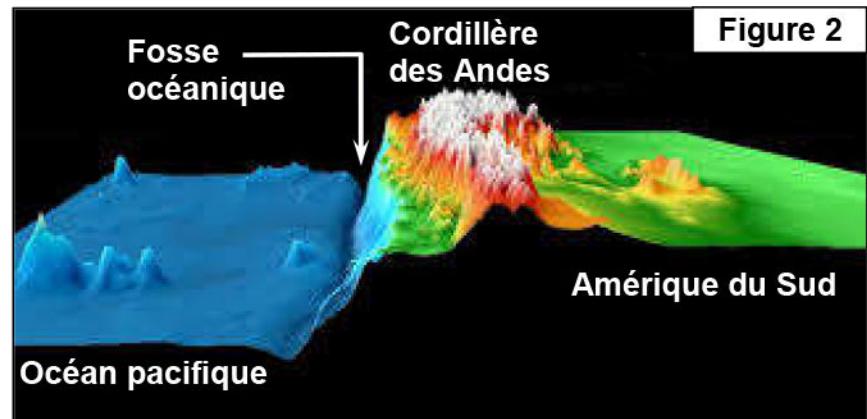
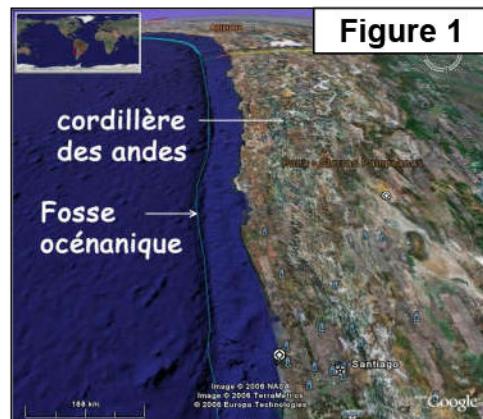
Document 3: Caractéristiques structurales et géophysiques des zones de subduction.

La cordillère des Andes est la plus longue chaîne de montagne du monde (7100 km). Elle s'étend sur 66° en latitude le long de la façade occidentale de l'Amérique du Sud. C'est une chaîne de subduction liée au passage en subduction des plaques Nazca, Cocos et Antarctique sous la plaque Amérique du Sud.

La structuration et la configuration morphologique actuelle des Andes sont, d'une part, liées à différents processus tectoniques associés au phénomène de la subduction et aux interactions entre climat et érosion.

Pour déterminer les caractéristiques structurales et géophysiques des zones de subduction, on donne les documents suivant :

- ✓ La figure 1: Observation d'une fosse océanique à une limite de plaque : Chaîne des Andes.
- ✓ La figure 2 : Détails de ce que l'on observe au bord du continent Amérique du Sud.
- ✓ Figure 3: Schéma d'ensemble de la Cordillère des Andes, montrant les principaux volcans actifs ainsi que les domaines non-volcaniques où le socle est soulevé.
- ✓ Figure 4 : répartition des foyers sismiques en fonction de la profondeur et de l'éloignement de la fosse vers le continent, dans la zone de subduction.
- ✓ Figure 5 : Variation de la température en fonction de la profondeur dans la zone de subduction.



Document 3: (Suite).

En exploitant les données de ce document, déterminez les caractéristiques structurales et géophysiques de la zone de subduction au niveau de la chaîne des Andes.

La cordillère des Andes est une chaîne de subduction qui s'installe le long des côtes ouest de l'Amérique du sud, où s'affrontent les plaques lithosphériques océaniques lourdes avec les plaques lithosphériques granitiques continentales légères.

Cette zone de subduction est caractérisées par:

- ✓ **Présence d'une fosse océanique et du prisme d'accrétion :**

Dans la zone de subduction, la plaque océanique ophiolitique dense plonge dans l'asthénosphère sous la plaque continentale moins dense, créant entre les deux plaques une fosse océanique profonde, où s'accumulent et se pressent des sédiments océaniques déformés, formant le prisme d'accrétion.

- ✓ **Importante activité sismique :**

L'étude des foyers sismiques dans la zone de subduction, montre une répartition selon un plan oblique appelé plan de Benioff, les foyers sismiques anciens sont profonds, les foyers récents sont superficiels.

Cette surface sismique justifie l'enfouissement d'une portion rigide de la lithosphère océanique à l'intérieur du manteau plus chaud et plus ductile.

- ✓ **Importante activité magmatique :**

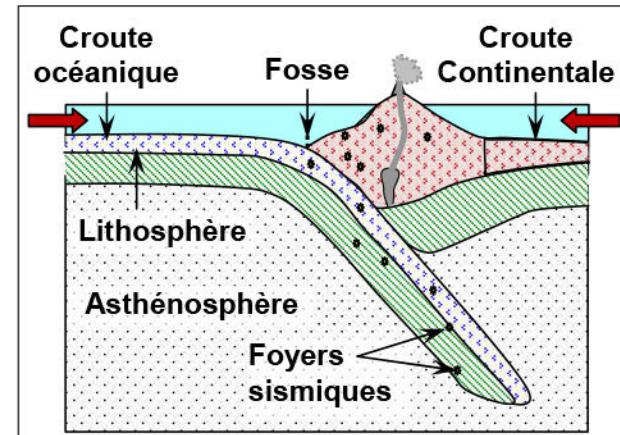
Les zones de subduction se caractérisent par une activité magmatique importante donnant naissance à un volcanisme andésitique et à des plutons, permettant la mise en place de roches magmatiques particulières : L'andésite (roche volcanique) et le granodiorites (roche plutonique).

- ✓ **Anomalie thermique :**

Les isothermes, courbes reliant les points de même température, généralement sont parallèles à la surface terrestre, mais au niveau des marges actives on constate qu'ils plongent et migrent en profondeur d'une façon incliné que celle du plan de Benioff. Ainsi, hors la zone de subduction, le point X l'isotherme 1400°C se situe à une profondeur de 270 Km, alors que le point Y du même isotherme dans la zone subduction se trouve plus profond à 600 Km.

Conclusion :

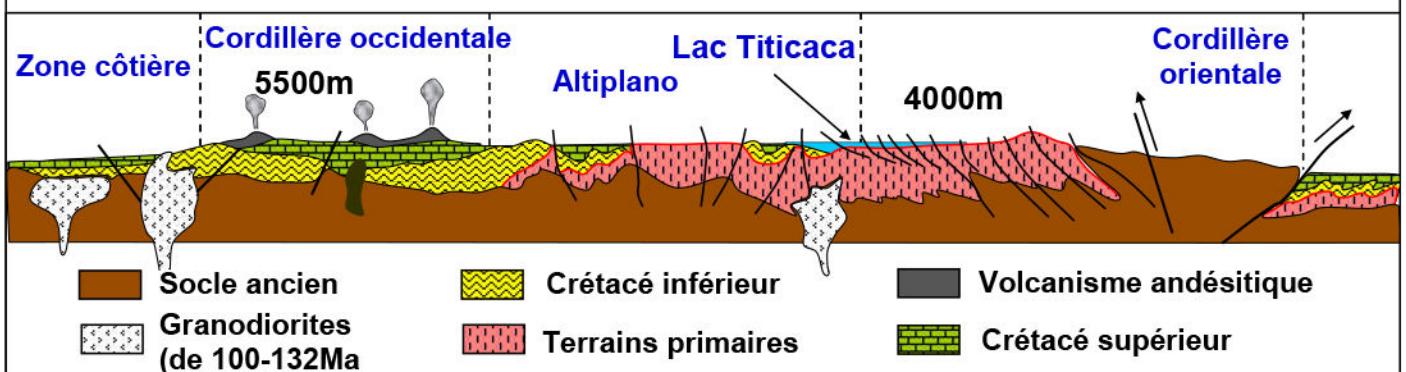
Les zones de subduction sont marquées par des activités géologiques importantes. Ces activités géologiques ont permis de tracer la signature de la plaque plongeante sous la plaque chevauchante. Ainsi la plaque océanique (Nazca) plus dense et moins épaisse plonge d'une façon inclinée sous la partie continentale de la plaque sud – Américaine moins dense et plus épaisse.



b) Caractéristiques tectoniques et pétrographiques des zones de subduction: (Voir document 4)

Document 4: Caractéristiques tectoniques et pétrographiques des zones de subduction.

La figure ci-dessous est une coupe géologique dans les Andes représentant quelques caractéristiques tectoniques et pétrographiques propres aux chaînes de subductions.



A partir de l'analyse de cette coupe géologique, dégagiez les caractéristiques tectoniques et pétrographiques des zones de subductions.

Les Andes présentent des caractéristiques structurales et pétrographiques typiques de chaîne de subduction tels que:

- ✓ Des déformations simples: en général des plis de grand amplitude, associés à des failles inverses ces structures sont en éventail.
- ✓ Le prisme d'accrétion : structure géologique caractérisée par l'accumulation de sédiments océaniques à l'avant de la plaque chevauchante au niveau de la fosse océanique.
- ✓ Des roches magmatiques typiques : Andésite : roche volcanique associée à un volcanisme fortement explosif. A d'autre endroits, des roches plutoniques : la granodiorite.

c) Caractéristiques pétrographiques des roches magmatiques liées aux zones de subduction: (Voir document 5)

Document 5: Caractéristiques pétrographiques des roches magmatiques des zones de subduction.

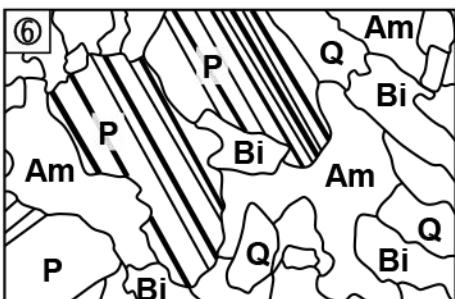
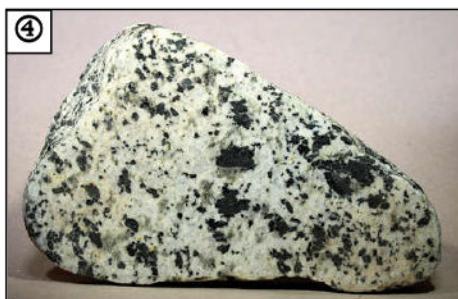
★ Les chaînes de subduction se caractérisent par l'abondance d'une roche volcanique nommée «Andésite» et par la présence de plutons de granitoïdes (Granodiorites). La figure ① : échantillon de l'andésite. La figure ② : Lame mince d'andésite observée au microscope polarisant. La figure ③ : schéma d'interprétation de la lame mince observée.



PY = pyroxène ; PL = plagioclase ; M = microlites ; C = verre.

Document 5: (Suite).

★ La figure ④: échantillon de la granodiorite. La figure ⑤: Lame mince de granodiorite observée au microscope polarisant. La figure ⑥: schéma d'interprétation de la lame mince de granodiorite observée au microscope.



Q = quartz ; P = Feldspath plagioclase ; Bi = Biotite ; Am = Amphibole

- 1) D'après les observations microscopiques des lames minces, comparer la réorganisation et la composition minéralogique des deux roches et déduire la structure de chaque roche.
- 2) Faire le lien entre les structures de ces roches et les conditions de leur formation.

1) L'Andésite : roche magmatique qui présente: des phénocristaux (cristaux de grande taille) des microlites (cristaux de petite taille) et une pate vitreuse non cristallisée on parle de structure microlitique.

La granodiorite: roche magmatique formée de gros cristaux (amphbole, quartz et biotite) soudés avec absence du verre donc entièrement cristallisée on parle de structure grenue.

2) Chez l'andésite, la présence de verre et de microlites et de phénocristaux caractérisant la structure microlitique permet de conclure que l'andésite s'est formée en 3 étapes liées aux étapes de l'éruption volcanique : les phénocristaux en profondeur dans la chambre magmatique (refroidissement lent) microlites pendant la remontée de la lave dans la cheminée (refroidissement moyen) la pâte vitreuse suite à la consolidation du reste de la lave à la surface par refroidissement rapide.

Chez la granodiorite, l'absence de verre et de microlites, la présence de minéraux cristallisés sur la totalité de la lame observée permet de déduire que cette roche a une structure grenue. Elle s'est formée en profondeur suite à un refroidissement lent. On parle de roche magmatique plutonique.

Conclusion :

On déduit que l'andésite et la granodiorite proviennent de la cristallisation et la consolidation d'un même magma dit magma andésitique, typique de la zone de subduction, mais à différents niveaux:

- ✓ La granodiorite en profondeur : roche plutonique.
- ✓ L'andésite en surface : roche volcanique.

Document 6: Origine du magma des zones de subduction.

Sachant que le magma andésitique, caractérisant les zones de subduction, provient de la fusion partielle de la roche du manteau supérieur: La péridotite. Pour déterminer les conditions de fusion partielle de la péridotite on propose le diagramme de la figure 1, représentant les résultats expérimentaux montrant l'état de la péridotite en fonction de la température de la pression et de la géothermie de la zone de subduction.

- ★ Solidus: courbe séparant le domaine où n'existe que du solide de celui où coexistent solide et liquide.
- ★ Liquidus : courbe séparant le domaine où coexistent solide et liquide de celui où n'existe que le liquide.

★ Géothermie ou Gradient géothermique: est l'augmentation de la température en fonction de la profondeur. Il varie selon les régions, en moyen $3.3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$.

- 1) D'après l'exploitation de ces données, dégagiez les conditions de fusion partielle de la péridotite au niveau des zones de subduction.

La figure 2 ci-contre, présente un schéma synthétique explicatif du processus de la fusion partielle de la péridotite au niveau de la zone de subduction.

- 2) Complétez la légende de ce schéma.
- 3) D'après le diagramme de la figure 1 et le modèle explicatif de la figure 2, comment explique-t-on la fusion partielle de la péridotite au niveau de la zone de subduction? puis le devenir du magma andésitique?

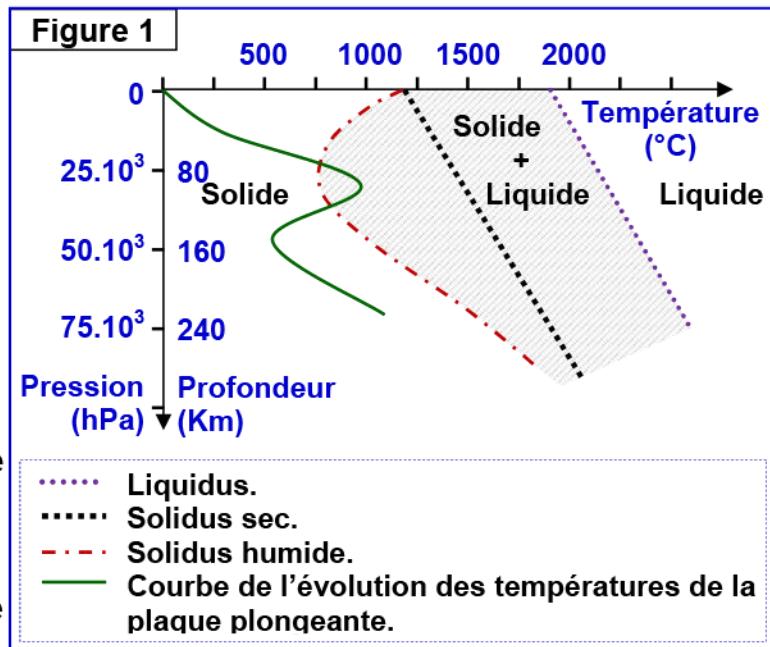
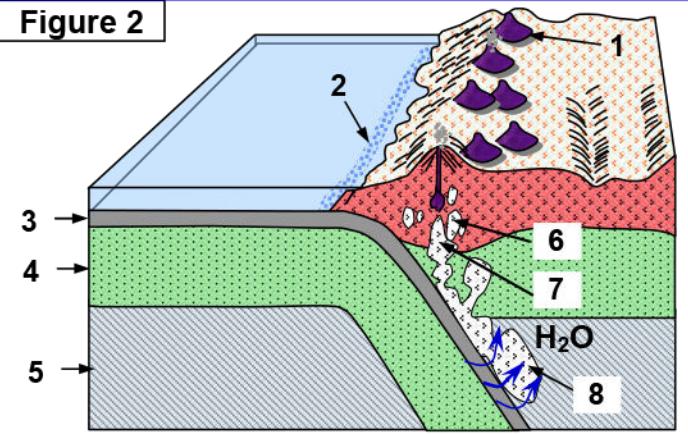


Figure 2



- 1) Le diagramme de la figure 1, présente les résultats d'étude au laboratoire de la fusion de roches dans différentes conditions de pression et de températures montrant que, dans un contexte de subduction:

- ✓ une péridotite anhydre ne peut pas fondre car la géothermie de la zone de subduction n'atteint pas les conditions de pression et de température du solidus nécessaire à un début de fusion partielle.
- ✓ Une péridotite hydratée peu fondre partiellement car son solidus (température de fusion partielle) a été abaissée par hydratation.

Le magma des zones de subduction provient donc de la fusion partielle de la péridotite hydratée de la plaque chevauchante.

2) Légende du schéma de la figure :

- 1 = Coulée andésitique ; 2 = Fosse océanique ; 3= Croute océanique ;
- 4 = Manteau lithosphérique; 5 = Asthénosphère ; 6 = Pluton granitique ;
- 7 = Magma andésitique ; 8 = Fusion partielle de la péridotite.

3) Au cours de l'enfouissement de la lithosphère océanique (plus dense) sous la lithosphère continentale (moins dense) les roches subduites subissent une augmentation de la pression et de la température, ce qui provoque des réactions minéralogiques accompagnées par la libération d'importante quantité d'eau qui diffusent à travers les roches du manteau supérieur (La péridotite). Ainsi se réalisent les conditions de la fusion partielle de la péridotite conduisant à la formation d'un magma qui migre vers la surface. Une partie de ce magma cristallise en profondeur et donne naissance à des plutons de granitoïdes à structure grenue, et l'autre partie atteint la surface et se refroidit rapidement pour former l'andésite caractérisée par sa structure microlitique où des petits cristaux appelés microlites sont liés par un verre.

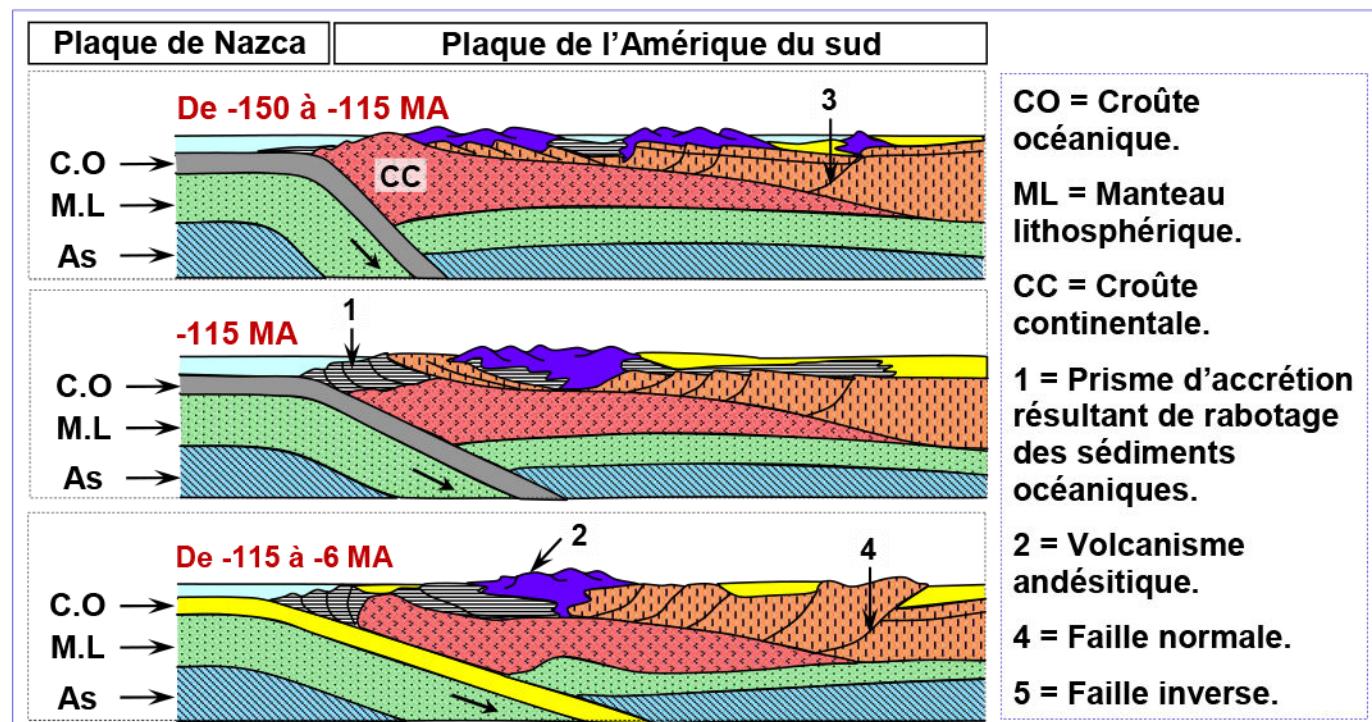
e) Les étapes de formation des chaînes de subduction : (Document 7)

Document 7: Etapes de formation des chaînes de subduction.

Les zones de subduction sont des frontières convergentes où la lithosphère océanique plonge dans l'asthénosphère. Elles sont associées à une déformation de la croute continentale donnant naissance à des chaînes de subduction.

La cordillère des Andes, d'environ 7100 km de long, est issue du phénomène de subduction.

La figure ci-dessous montre l'évolution géodynamique d'une chaîne de subduction (La cordillère des Andes).



Décrivez les différents événements qui ont conduit à la formation de la chaîne de subduction (La cordillère des Andes).

Mettez en relation la genèse de cette chaîne et la tectonique des plaques.

La cordillère des Andes est le résultat du rapprochement et l'enfouissement de la plaque océanique du Nazca, plus dense, sous la plaque lithosphérique continentale d'Amérique du sud, moins dense, et cela se produit selon les étapes suivantes:

- ✓ En premier lieu suite aux contraintes tectoniques compressives la plaque océanique devient plus dense se brise et s'enfonce lentement sous la lithosphère continentale.
- ✓ Dans la zone d'affrontement se crée une fosse et Les sédiments marin recouvrant la plaque plongeante seront rabotés et raclés par la laque chevauchant et forment le prisme d'accrétion.
- ✓ Les roches de la croute océanique plongeante subissent en profondeur des pressions et des températures de plus en plus grandes elles se transforment et libèrent l'eau qui crée les conditions de fusion partielle de la péridotite avec production d'un magma Andésitique.
- ✓ Sous l'effet des contraintes tectoniques compressives, il se produit un raccourcissement et un empilement du matériel, ce qui entraîne un épaississement de la croute continentale et la surrection (Soulèvement) d'un relief (chaîne de montagne).

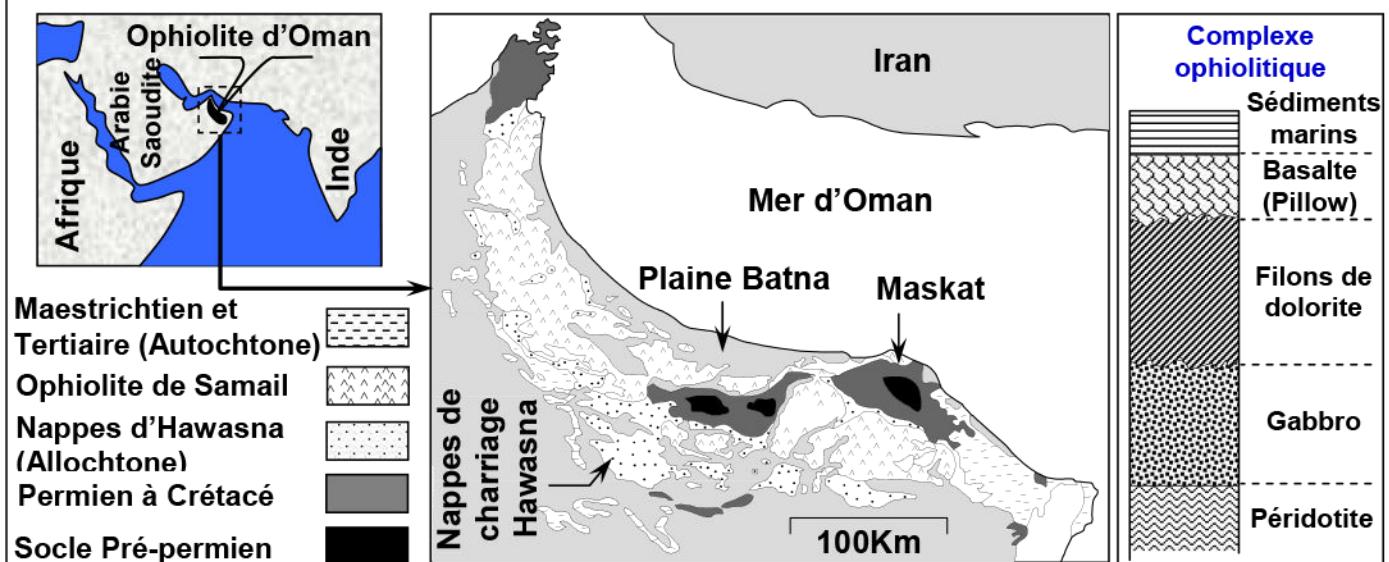
② Les chaînes d'obduction (Exemple chaîne d'Oman):

a) Caractéristiques structurales et pétrographiques des chaînes d'obduction: (Voir document 8)

Document 8: Carte géologique simplifiée de la chaîne d'Alhajar à Oman.

La chaîne montagneuse d'obduction d'Oman est située au Nord-Est de la péninsule arabique. Elle forme un arc orienté N-S au Nord pour être quasiment orienté E-W au sud de Maskat. Cette ceinture borde la Golfe d'Oman.

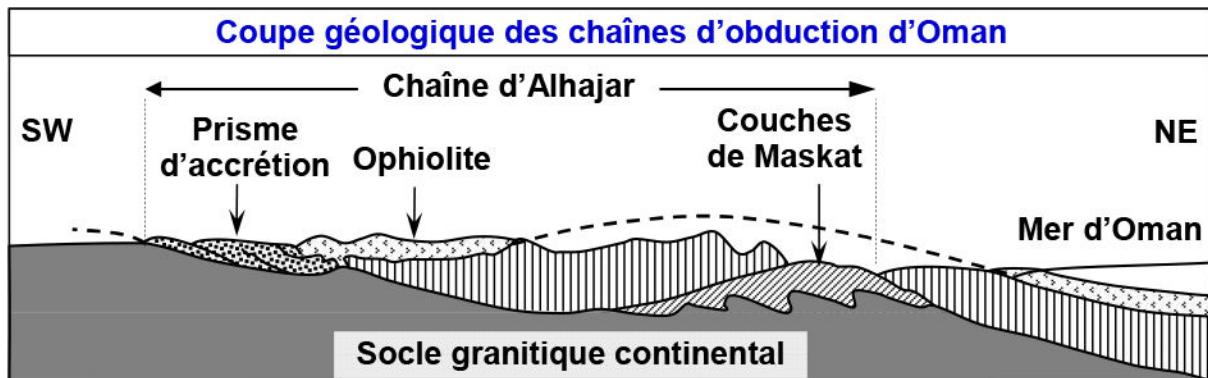
Les figures de ce document présentent un schéma structural des montagnes du Nord-Oman et une coupe géologique faite dans cette chaîne d'obduction.



Document 8: (Suite).

La chaîne montagneuse d'obduction d'Oman est située au Nord-Est de la péninsule arabique. Elle forme un arc orienté N-S au Nord pour être quasiment orienté E-W au sud de Maskat. Cette ceinture borde la Golfe d'Oman.

Les figures de ce document présentent un schéma structural des montagnes du Nord-Oman et une coupe géologique faite dans cette chaîne d'obduction.



Le complexe ophiolitique d'Oman est un fragment formé au niveau d'une lithosphère océanique :

- 1) Décrivez la répartition de la chaîne d'Alhajar et dégarez les caractéristiques structurales et pétrographiques de cette chaîne.
- 2) A partir des données de la coupe géologique proposez une explication sur la relation entre cette chaîne et la tectonique des plaques.

- 1) A partir de l'analyse des données de ce document, La chaîne d'obduction d'Oman présente les caractéristiques suivantes:
 - ✓ Des caractéristiques pétrographiques: de vastes affleurements d'un complexe ophiolitique (500Km) avec à l'avant dans le continent des sédiments marins.
 - ✓ Des caractéristiques structurales et tectoniques : présence de plis, de failles inverses et des nappes de charriages (complexe Hawasna : formée de sédiments marin)
- 2) Les chaînes d'Oman sont caractérisés par la présence du complexe ophiolitique (Basalte, gabbros, péridotite) et des sédiments du fond océanique (Ex: les radiolarites) au-dessus d'un socle continentale.

Cette structure ne peut être expliquée que par l'obduction qui est un phénomène géodynamique au cours duquel des portions de croûte océanique (dites ophiolites) émergent sur la marge continentale sous l'effet de forces de convergence.

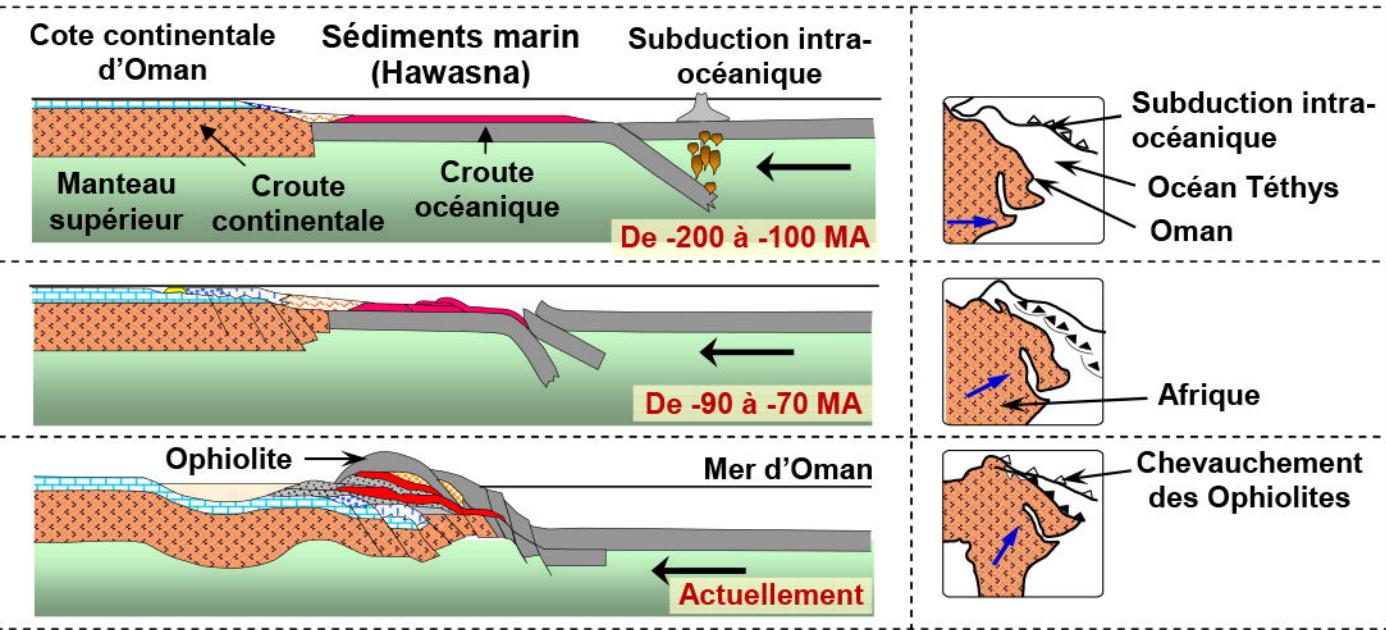
L'obduction est la conséquence du blocage d'une subduction et chevauchement de la plaque océanique sur le continent, ce qui donne naissance aux chaînes d'obduction caractérisées par la présence du complexe ophiolitique.

b) Les étapes de la formation des chaînes d'obduction d'Oman:

(Voir document 9)

Document 9: Les étapes de la formation des chaînes d'obduction d'Oman.

L'organisation actuelle de la chaîne d'Alhajar à Oman et notamment la série ophiolitique qu'on y peut voir, résulte d'une histoire tectonique riche et originale, qui peut se résumer en trois étapes principales. Les coupes géologiques de la figure ci-dessous, montrent la succession des événements aboutissant à la formation de la chaîne d'obduction d'Oman.



Décrivez les étapes de formation de cette chaîne d'obduction, en déterminant sa relation avec la tectonique des plaques.

- ★ Avant -100 MA, dans l'océan Téthys, se sont déposés des sédiments marins (radiolarite) sur des basaltes en coussin (Pillow). cette période est caractérisée par l'action des forces compressives (rapprochement entre la plaque africaine et la plaque Eurasienne). la plaque océanique subit une grande cassure (faille) suivie d'une subduction intra-océanique (Entre deux croutes océaniques).
- ★ -90 MA, le phénomène de subduction se poursuit et progressivement le continent d'Oman se rapproche de la zone de subduction et le domaine marin disparaît. Arrivant à la zone de subduction, et du fait de sa faible densité, la lithosphère continentale ne s'enfonce pas sous la lithosphère océanique ce qui entraîne le blocage de la subduction.
- ★ -70MA à l'actuel : l'effet des forces compressives se poursuit poussant la croute océanique et une partie du manteau à glisser sur la lithosphère continentale autochtone, provoquant la déformation des couches et le soulèvement de reliefs représentant les chaînes d'obduction.
Par suite du rapprochement des blocs arabique et eurasien, les sédiments marins (Allocosomes) sont poussés pour de grande distance pour former des nappes de charriages.

③ Les chaînes de collision (Exemple l'Himalaya):

- Caractéristiques structurales et pétrographiques des chaînes de collision:** (Voir document 10)

