

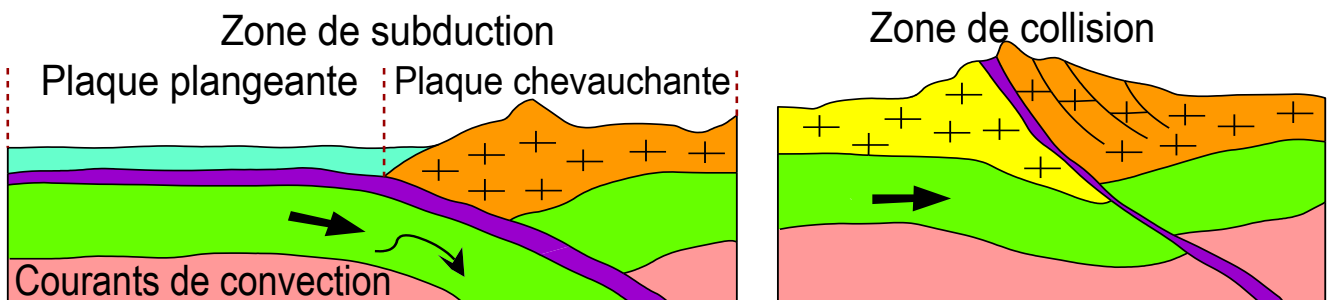


# Les phénomènes géologiques accompagnants la formation des chaînes de montagnes et leurs relations avec la tectonique des plaques

2<sup>ème</sup> année bac Sciences expérimentales  
Série sciences physiques et sciences de la vie et de la terre  
Section internationale, option langue Française

﴿ وَتَرَى الْجِبَالَ تَحْسَبُهَا جَامِدَةً وَهِيَ تَمُرُّ مَرَّ السَّحَابِ ۗ صُنِعَ اللَّهُ الَّذِي أَنْفَقَ كُلَّ شَيْءٍ ۗ إِنَّهُ حَبِيرٌ بِمَا تَفْعَلُونَ ﴾  
سورة النمل الآية (88)

﴿ A voir les montagnes, tu les crois immobiles, alors qu'elles défilent comme des nuages. C'est là l'œuvre d'Allah qui a ordonné toutes choses dans les meilleures conditions. Il est parfaitement au courant de tout ce que vous faites ﴾ Verset 88 de sourate an namle.

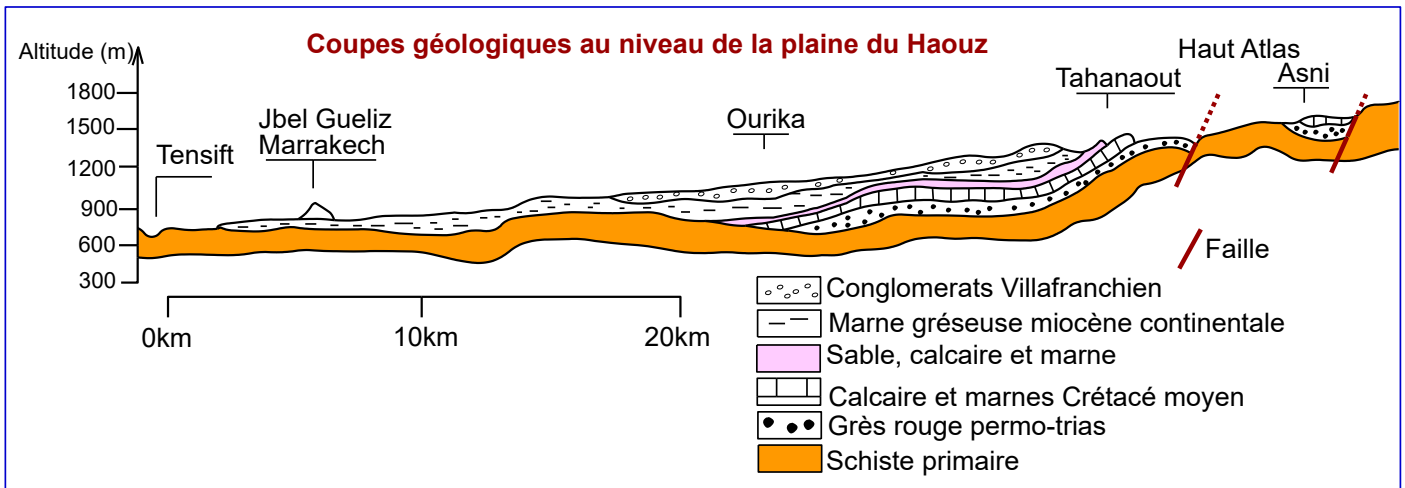


Proposé par : Prof Khadija Zekrite

Année scolaire : 2025/2026

# Introduction

Lors d'une promenade au niveau de la région du Haouz (**chaîne montagneuse du haut Atlas du Maroc**), on observe, des paysages impressionnants : sommets élevés, roches plissées, failles visibles, et parfois des fossiles marins retrouvés à plusieurs milliers de mètres d'altitude. Par ailleurs, cette région a connu le 8 Septembre 2023 un séisme intense de magnitude **6,8 à 6,9** sur l'échelle de Richter.



## Problématique

*Quels phénomènes géologiques accompagnent la formation des chaînes de montagnes et comment s'expliquent-ils par la tectonique des plaques ?*

### Plan de l'unité :

- Se rappeler les acquis antérieurs
- **Chapitre 1** : Les chaînes de montagnes récentes et leur relation avec la tectonique des plaques.
- **Chapitre 2** : Le métamorphisme et sa relation avec la tectonique des plaques.
- **Chapitre 3** : Le granitisme et sa relation avec les roches métamorphiques.



## Se rappeler des acquis antérieurs

### I/ Les types de roches sur terre :

Les roches présentes sur terre peuvent être d'origine sédimentaire, magmatique ou métamorphique. La manière dont elles se forment détermine leur appartenance à l'une ou à l'autre de ces grandes familles.

🌸 **Les roches sédimentaires** : se forment à la surface de la terre (roches exogènes) par accumulation de dépôts. Ils proviennent de la succession de 4 étapes : l'érosion, le transport, la sédimentation et la diagenèse. Ils se déposent le plus souvent en couches ou lits superposés مترابطة, appelés strates. Ils renferment parfois des fossiles.

🌸 **Les roches magmatiques** : ou roches éruptives, se forment quand un magma se refroidit et se solidifie. Il existe deux familles de roches magmatiques qui se forment dans des circonstances différentes:

- Quand le magma remonte en surface de la terre lors d'une éruption تدفق volcanique, sa solidification donne naissance à des **roches volcaniques**. La plus répandue est le basalte.
- Si le magma n'atteint pas la surface terrestre, il se cristallise en profondeur et donne des **roches plutoniques**. La plus répandue est le granite.

🌸 **Les roches métamorphiques** : qualifient les roches (sédimentaires ou magmatiques) qui ont subi une transformation à l'état solide du fait d'une élévation de la température et/ou de la pression.

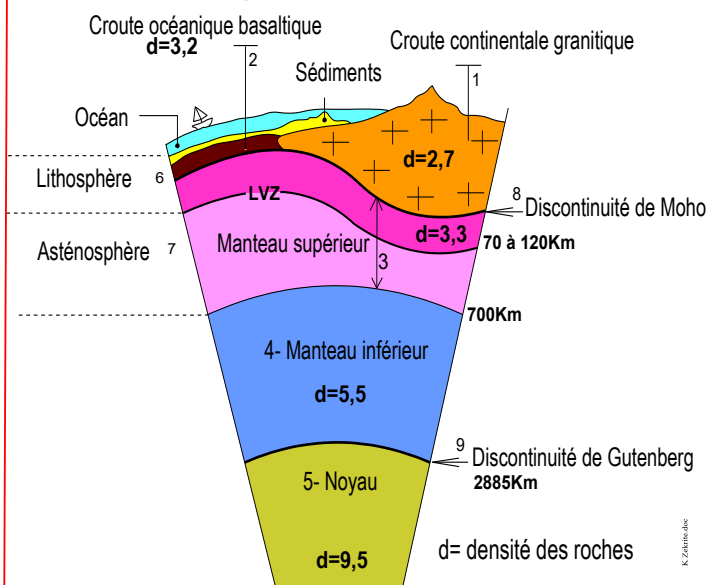
Quelques exemples :

Roches sédimentaires	Roches magmatiques		Roches métamorphiques
	plutoniques	volcaniques	
Les conglomérats, Les sables, Les argiles, Les calcaires, Les sels gemmes الملح الصخري Les marnes, Les gypses ; Les phosphates ...	Le granite La granodiorite Le gabbro ; La péridotite ; La dolérite ...	Le basalte ; La rhyolite ; L'andésite ...	L'ardoise, Les schistes Les micaschistes ; Le gneiss, L'éclogite ; La wollastonite ; La cornéenne ; L'amphibolite ; Le marbre الرخام

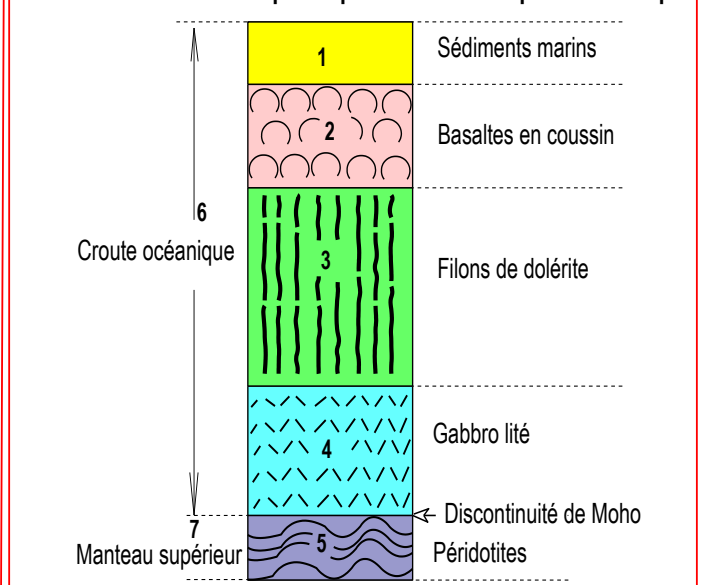
### II/ La structure du globe terrestre:



**Doc 1: Schéma d'une portion de la structure interne de la terre**



**Doc 2: Schéma d'une coupe simplifiée de la lithosphère océanique**



**Le globe terrestre** est constitué de plusieurs couches de nature pétrographique (rocheuse) et de densité différentes (doc 1). Toutes les couches sont rigides صلبة, à l'exception du noyau externe qui est liquide, et l'asthénosphère qui est ductile (molle, souple مرنة لدنة).

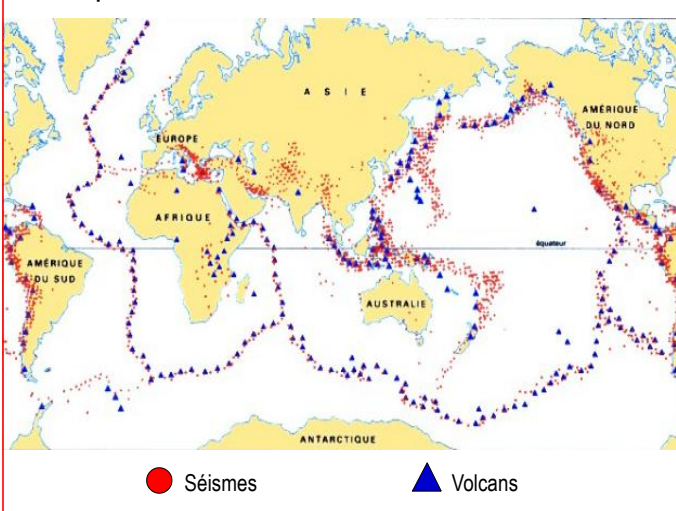
**La croûte continentale** est la partie superficielle السطحية des continents, elle est composée essentiellement de granite. Son épaisseur varie entre 15 km sous les plaines à plus de 70 km sous les montagnes.

**La croûte océanique** constitue le plancher (أرضية) des mers et des océans, elle est de nature basaltique, composée de basalte, de dolérite et du gabbro.

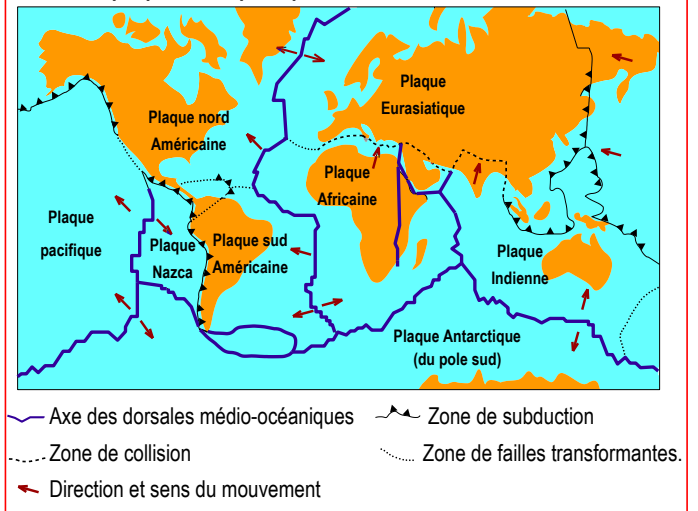
**La lithosphère** : couche superficielle rigide de la terre fragmentée en plaques et composée par la croûte (continentale ou océanique) et de la partie rigide du manteau supérieur. L'épaisseur de la lithosphère continentale est supérieure à 30km alors que l'épaisseur de la lithosphère océanique varie de 6 à 10km.

### III/ Notion de plaque tectonique et théorie des plaques :

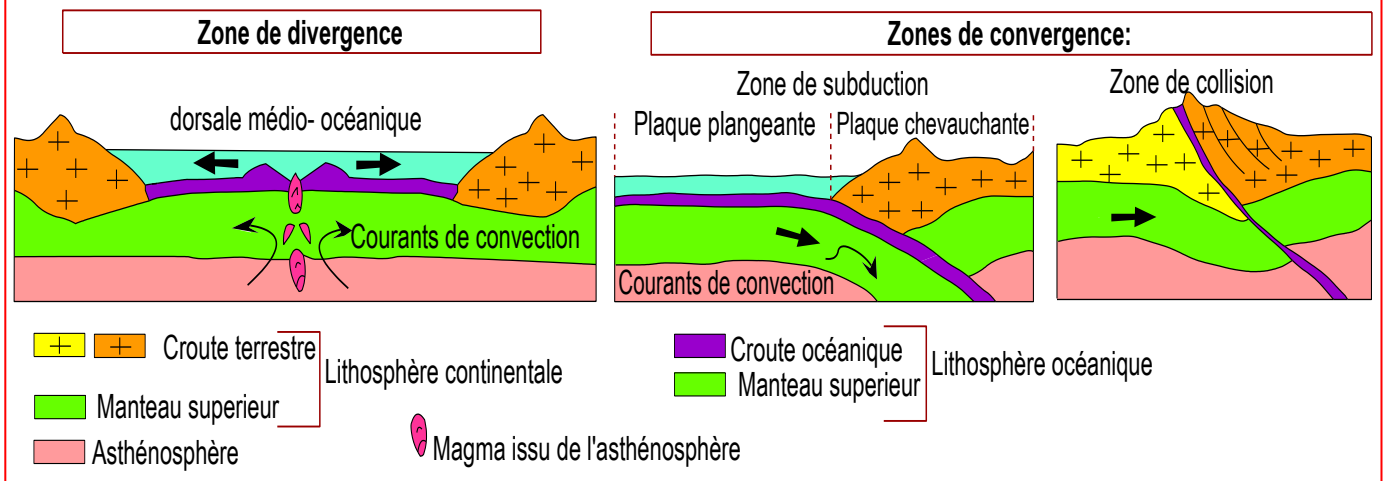
**Doc 3: Répartition des séismes et des volcans à l'échelle mondiale**



**Doc 4: Les plaques lithosphériques et leur mouvement relatif.**



## Doc 5 Quelques types de contact entre les plaques



● **Plaques lithosphériques** : est un bloc rigide et stable de la lithosphère terrestre limité par des frontières actives هوامش نشيطة caractérisées par un séisme et un volcanisme important. Les plaques sont en mouvement les unes par rapport aux autres sur l'asthénosphère, c'est la théorie de la tectonique des plaques نظرية تكتونية الصفائح.

● Les limites entre les plaques peuvent être

● **Des zones de divergence** : مناطق التباعد ce sont les dorsales médio-océaniques où naît une nouvelle croûte océanique, elles sont donc à l'origine de l'expansion des fonds océaniques : اتساع قعر المحيطات.

● **Des zones de convergence** : مناطق التقارب ce sont les zones de subduction, d'obduction et de collision.

● **Des zones de décrochement** (friction) مناطق احتكاك : zones de failles transformantes.

● **Subduction** : الطمر processus par lequel une plaque tectonique océanique (de densité élevée) plonge sous une autre plaque généralement continentale (de faible densité).

● **Collision** : الاصطدام Affrontement et rencontre entre deux masses continentales, accompagné de déformations tectoniques et de formation de relief important تضاريس مهمة.

● **Obduction** : الطفو processus par lequel une plaque tectonique océanique chevauche sur une autre plaque continentale.

● Dans l'asthénosphère, il y'a des mouvements ascendants et descendants صاعدة وهابطة des roches, qui sont dus aux courants de convection تيارات الحمل الحراري. Ces mouvements sont dus aux différences de densité causée par des différences de température.

● **L'expansion des fonds océaniques** : اتساع قعر المحيطات L'expansion annuelle des fonds océaniques, ou accrétion, est de l'ordre du centimètre (dorsale lente) ou du décimètre (dorsale rapide). Elle résulte de l'écartement des plaques lithosphériques entraînées par les mouvements de convection de l'asthénosphère. Elle provoque un renouvellement permanent des fonds et, en l'absence de subduction, un écartement des blocs continentaux appelé dérive des continents زحزحة القارات.

### Mots clef

**Forces compressives** = forces de convergence (→←) قوى انضغاطية أو تقاربية

**Forces de distension** = forces de divergence (←→) قوى تمددية أو تباعدية

**Pétrographie** = science ayant de la description des roches, l'analyse de leurs caractères structuraux, minéralogiques et chimiques, ...



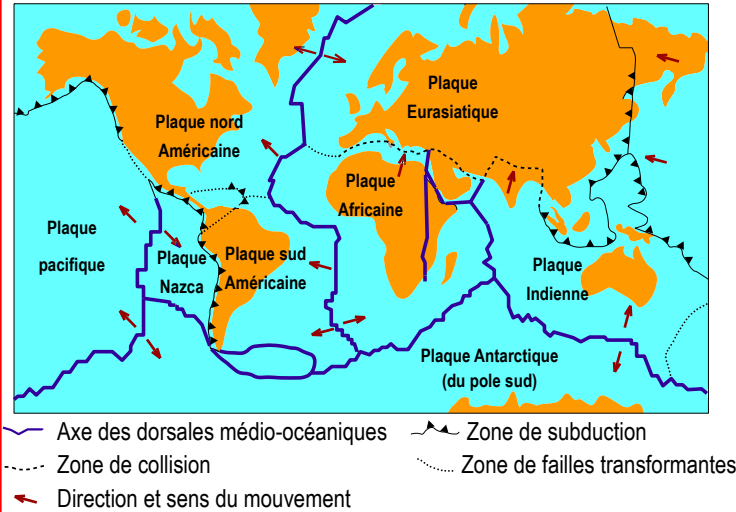
#### IV/ Les grandes divisions de l'échelle stratigraphique

Age (MA) العمر (م س)	Ere الحقب	Systeme النظام (الدور)
1,75	Quaternaire الحقب الرابع	Quaternaire الرابع
	Tertiaire (cénozoïque) الحقب الثالث	Néogène النيوجين
65		Paléogène الباليوجين
	250	Secondaire (mésozoïque) الحقب الثاني
Jurassique الجوراسي		
Trias الترياس		
540	Primaire (paléozoïque) الحقب الأول	Permien البيرمي
		Carbonifère التفحمي
		Dévonien الديفوني
		Silurien السيلوري
		Ordovicien الأردوفيسي
		Cambrien الكمبري
	Précambrien قبل الكمبري	

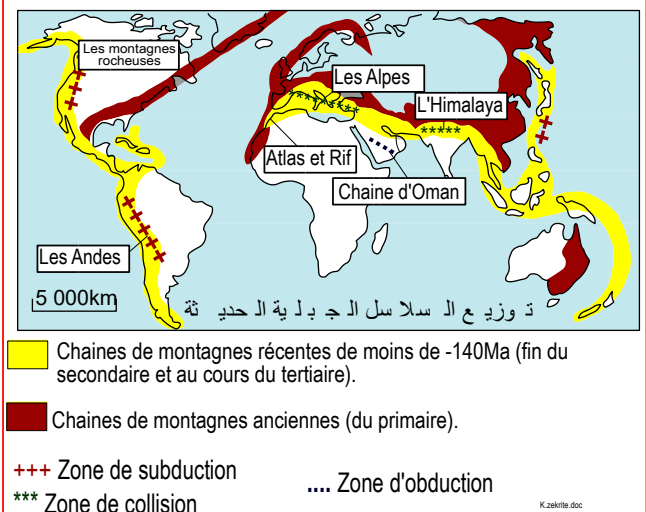
# Chapitre 1 : Les chaînes de montagnes récentes et leur relation avec la tectonique des plaques

## Documents pour s'interroger.

Doc 1: Les plaques lithosphériques et leur mouvement relatif.



Doc 2: Répartition des chaînes de montagnes à la surface de la terre



→ doc 2 : **Comparer** la localisation des chaînes de montagnes récentes à la répartition des plaques lithosphériques (doc 3). **Que peut-on conclure ?**

→ **Relever** les différentes questions concernant les phénomènes géologiques accompagnant la formation des chaînes de montagnes et leur relation avec la tectonique des plaques.

## Exploitation des documents

→ Les chaînes de montagnes récentes, d'un âge de moins de (-140Ma) se localisent principalement au niveau des limites de convergence entre les plaques lithosphériques.

→ Exemples :

- La chaîne des Andes : s'étend sur les limites de convergence entre la plaque sud-américaine et la plaque Nazca (frontière de subduction).
- La chaîne d'Oman : s'étend sur les frontières de convergence entre la plaque arabique et la plaque eurasiatique (frontière d'obduction).
- La chaîne de l'Himalaya : s'étend sur les frontières de convergence entre la plaque australo-Indienne et la plaque eurasiatique (frontière de collision).

→ **Conclusion** : La formation des chaînes récentes est dû au **rapprochement des plaques lithosphériques**, elles sont donc la conséquence de la tectonique des plaques.

## Questions posées

↳ Quelles sont les déformations tectoniques caractéristiques des chaînes de montagnes ?

↳ **Activité 1**

↳ Quelles sont les caractéristiques géologiques des trois types de chaînes de montagnes et quels sont les indices géologiques permettent de reconstituer leur histoire et de les relier aux mouvements des plaques tectoniques ?

↳ **Activité 2, 3 et 4.**

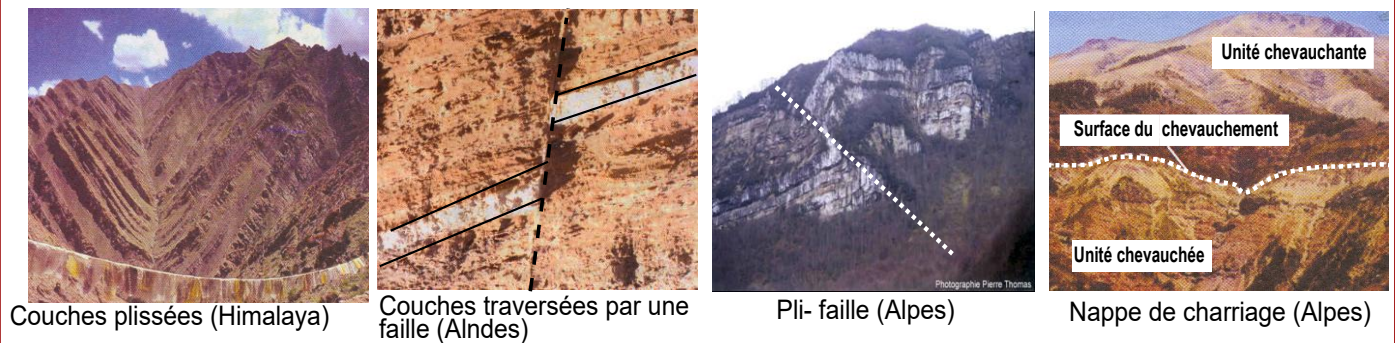
## Activité 1 : Les déformations tectoniques qui accompagnent la formation des chaînes de montagnes

Les formations géologiques, au niveau des chaînes de montagnes, se caractérisent par des déformations tectoniques. Ces déformations apparaissent à tous les niveaux, du niveau microscopique jusqu'au niveau des affleurements مستوى الاستسطاق de diverses dimensions.

➔ **Quels sont les types de déformations tectoniques qui accompagnent la formation des chaînes de montagne ?**

### I/ Les types de déformations dans les chaînes de montagnes

**Doc 1: Quelques types de déformations observées dans les chaînes de montagnes**



➔ **Définir** le terme déformation et **dégager** les types de déformations rencontrées dans les chaînes de montagnes récentes ?

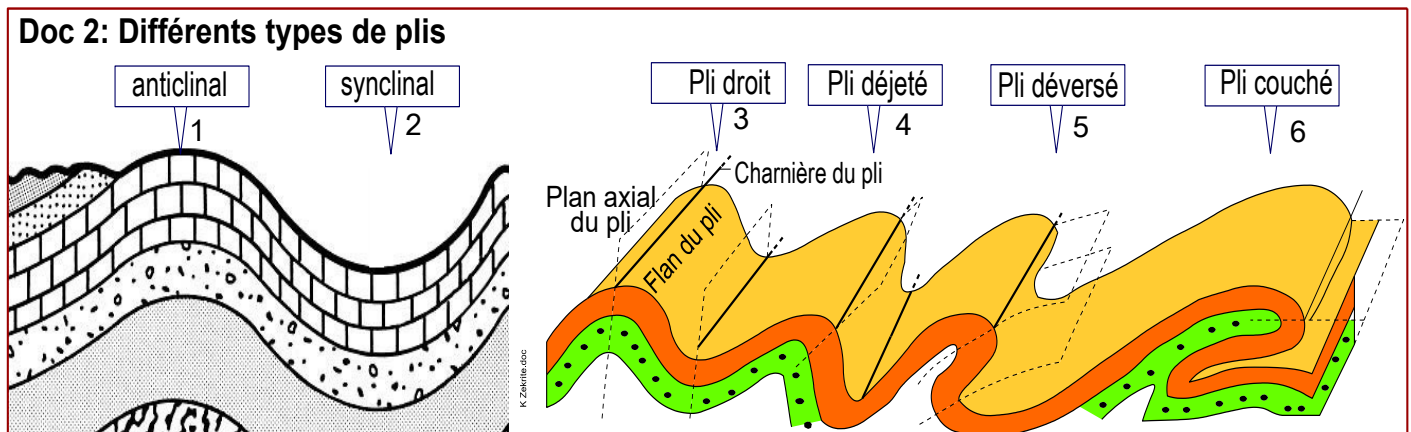
Les déformations tectoniques sont des changements de forme, de position ou de d'orientation de roches soumises à des contraintes ضغوط.

On peut classer les déformations rencontrées dans les chaînes de montagnes en :

- Déformations souples continues : les plis تشوهات مرنة متواصلة
- Déformations cassantes discontinues : les failles et les décrochements. تشوهات انكسارية غير متواصلة
- Déformations intermédiaires : chevauchements et nappes de charriages.

**Les structures géologiques** = Les formes issues des déformations tectoniques.

### II/ Les déformations souples continues : les plis



↳ Définir le terme plis, par quoi diffèrent les types de plis ? identifier les sur le document.

### Réponses :

- Les plis sont des déformations souples et continues des couches rocheuses (les couches restent continus) sous forme d'ondulations en saillie (anticlinal) ou en creux (synclinal).
- La position du plan axial et le pendage des flans définissent différents types de plis : pli droit, déjeté, déversé ou couché.

## III/ Les déformations cassantes discontinues : les failles et les décrochements.

**Doc 3: Les failles et leurs types**

**Fig a: les éléments de la faille**

Plan de faille, miroir de faille, compartiment soulevé, compartiment affaissé, rejet vertical, r, rejet horizontal

**Fig c: les regroupements de failles**

**Horst:**  
combinaison de plusieurs failles inverse

**Grabben:**  
combinaison de plusieurs failles normales

**Fig b: les types de failles**

Faillle verticale 1

R = rejet vertical

Faillle normale 2

Forces distensives

Faillle inverse 3

Forces compressives

Décrochement senestre 4

r = rejet horizontal

Coulissage horizontal

Décrochement dextre 5

Coulissage horizontal

↳ Définir les termes faille et les décrochement, comment identifier une faille normale, une faille inverse et un décrochement ?

### Réponses :

**Les failles** sont des déformations cassantes discontinues des couches rocheuses ce sont des cassures accompagnées d'un déplacement relatif des deux compartiments. La valeur du décalage s'appelle le rejet, Suivant le type de mouvement relatif des compartiments de de la faille on distingue :

■ **une faille verticale** : correspondent à un mouvement vertical des deux bloc sans déplacement horizontal.

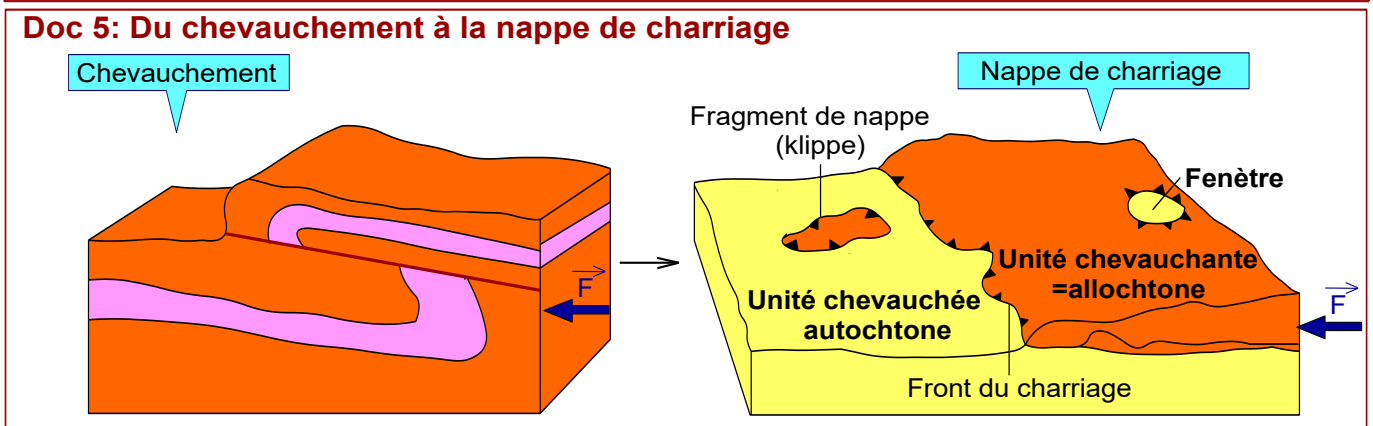
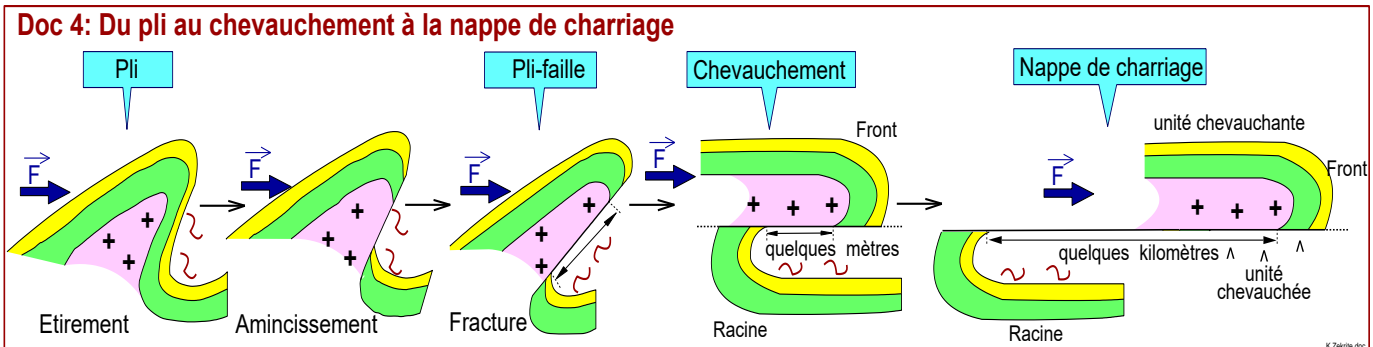
■ **une faille normale**: faille le long de laquelle les roches au-dessus du plan de faille se déplacent vers le bas par rapport aux roches sous le plan de faille. Les failles normales se forment lorsque deux blocs de roches s'éloignent l'un de l'autre (écartement), en

raison d'une distension **تباعد**. La combinaison de plusieurs failles normales entraîne un fossé d'effondrement appelé **Grabben**.

■ **une faille inverse**: faille le long de laquelle les roches au-dessus du plan de faille se déplacent vers le haut par rapport aux roches sous le plan de faille. Les failles inverses se forment lorsque deux bloc de roches sont poussés l'un vers l'autre (rapprochement) en raison d'une compression **انضغاط**. La combinaison de plusieurs failles inverses entraîne un soulèvement appelé **Horst**.

■ **un décrochement ou faille transformante** **انقلاع** correspondent à un coulissage horizontal **انزلاق أفقي** des deux bloc sans déplacement vertical.

#### IV/ Les déformations intermédiaires : chevauchements et nappes de charriages.



↳ Décrire comment un pli peut évoluer en décrochement puis en nappe de charriage, et définir le terme chevauchement et nappe de charriage.

#### Réponses :

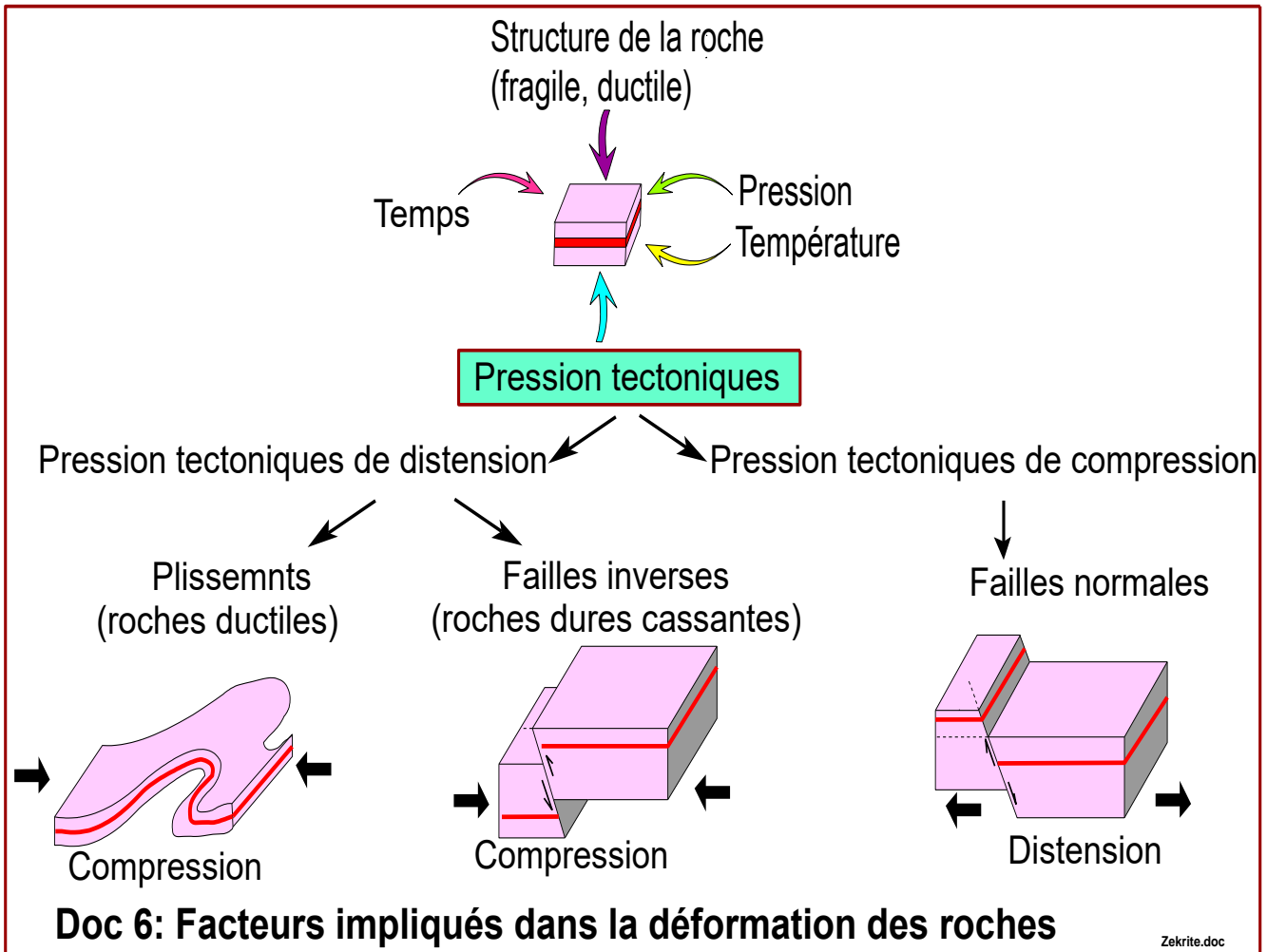
☀ Suite à des **forces compressive latérales** **انضغاطية جانبية** **non équilibrées**, un pli s'étire et se fragmente, ainsi il évolue en pli-faille, si les contraintes se poursuivent, la partie couchée du pli se détache de son socle **القاعدة** et se déplace sur la surface de la faille. Lorsque la distance de ce déplacement est de quelques mètres on parle d'un **chevauchement** **تراكب**. Lorsque la distance du déplacement est très importante de l'ordre des kilomètres on parle de **nappe da charriage**. **سديمة**

☀ **un chevauchement** : est un **déplacement horizontal** de l'ordre de quelques mètres d'une unité géologique au-dessus d'une autre suite à des forces compressives inégales. L'unité de dessus est appelée **unité chevauchante = allochtone** **وحدة راكبة**, l'unité en bas est appelée **unité chevauchées = autochtone** **وحدة مركوبة**

🌸 **une nappe de charriage** : ensemble de terrains rocheux déplacés sur des dizaines de kilomètres et chevauchant d'autres formations rocheuses autochtones.

**Remarque** : Au niveau de la carte et des coupes géologiques, les chevauchements et les nappes de charriages sont représentés par un trait portant des triangles, la tête du triangle est dirigée vers l'unité chevauchante الوحدة الراكبة.

#### IV/ Les facteurs impliqués dans les déformations Voir doc 6



👉 Décrire les facteurs impliqués dans la déformation des roches

#### Réponses :

Les déformations des roches dans les limites des plaques sont associées à des facteurs divers :

- **La composition de la roche**. Certaines roches sont cassantes de nature (le calcaire, le gré, le granite), d'autres plutôt plastiques (les roches argileuses).
- **La pression et la température** : ces facteurs augmentent avec la profondeur au niveau de la croûte terrestre, ce qui modifie le comportement des matériaux. Dans les parties superficielles de la croûte, la pression et la température sont moins élevés

qu'en profondeur, les déformations sont généralement cassantes en surface (failles) et sont ductiles en profondeur (plissements).

■ Le temps : la durée de soumission des roches aux mouvements tectoniques, en effet si on étire brusquement (temps court) une matière, elle casse ; si la déformation est lente, la roche se déforme de façon plastique

■ Les mouvements tectoniques :

- Les forces compressives provoquent des failles inverses et des plissements.
- Les forces de distension provoquent des failles normales. Ce type de failles se rencontre dans les zones divergentes de la lithosphère (dorsale océanique), ils apparaissent aussi lors de la phase post orogénique après l'arrêt des forces compressives.

**Orogenèse** = formation des chaînes de montagnes.

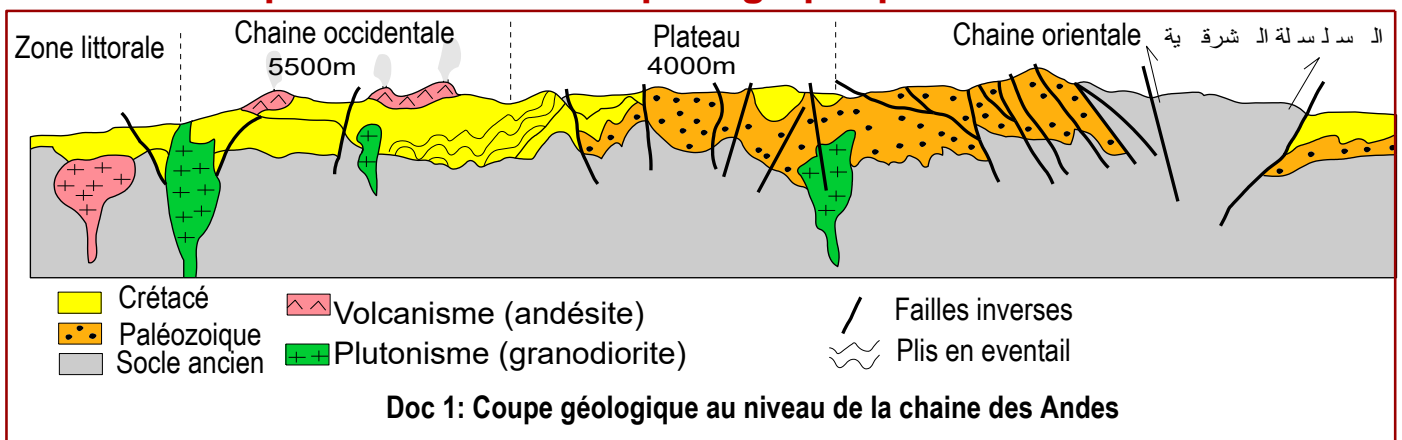


## Activité 2 : Les chaînes de subduction et leur relation avec la tectonique des plaques

La subduction est le processus par lequel une plaque lithosphérique océanique plonge sous une autre plaque généralement moins dense. La cordillère (سلسلة) des Andes qui s'étend (تمتد) sur près de 8000km la côte pacifique de l'Amérique du sud est l'exemple le plus significatif de chaînes de subduction.

- Quelles sont les caractéristiques des chaînes de subduction ?
- Quels sont les indices qui permettent de retracer l'histoire géologique de ces chaînes et de les lier au contexte géodynamique : mouvement des plaques ?

### I/ Caractéristiques structurales et pétrographiques des Andes



Doc 2: Roches caractéristiques des chaînes de subduction

Fig a: Andésite



Fig b: Lame mince d'andésite

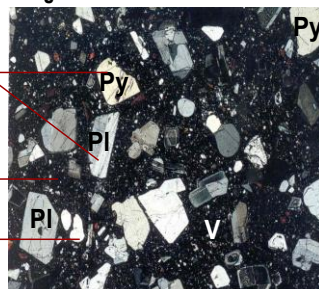
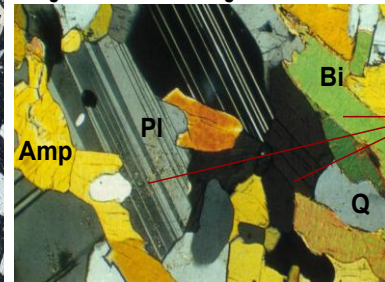


Fig c: Lame mince de granodiorite



### Doc 3 : La structure des roches magmatiques

**La structure (ou texture) d'une roche** = l'arrangement des minéraux entre eux.

**Une roche à structure grenue** = roche composée de phénocristaux (grains visible à l'œil nu, de taille supérieur à 1 mm) non orientés. Les roches à structure grenue indiquent que le refroidissement du magma qui leur a donné naissance était lent, il s'est réalisé en profondeur, ce sont donc des roches plutoniques.

**Une roche à structure microlitique** = roche formée de phénocristaux et de microlites (petits bâtonnets millimétriques), noyés غارقة dans une pâte non cristallisée appelée le verre. Les phénocristaux cristallisent lentement en profondeur dans la chambre magmatique, les microlites se forment au cours de la montée du magma, alors que le verre se forme par refroidissement rapide lorsque le magma arrive en surface. Les roches à structure microlitique sont donc d'origine volcanique

- 1 Doc 1, **déterminer** les propriétés structurales et pétrographiques caractérisant la chaîne des Andes.

② Doc 2 et 3, **décrire** les roches magmatiques caractéristiques des Andes et déterminer leur structure et l'endroit de leur refroidissement.

## Réponses :

① La coupe géologique des Andes présente des propriétés structurales et pétrographiques suivantes:

⚙️ **Caractéristiques structurales** = les déformations tectoniques : représentées essentiellement par des failles inverse et des plis, indicateurs que la zone est le siège d'une compression.

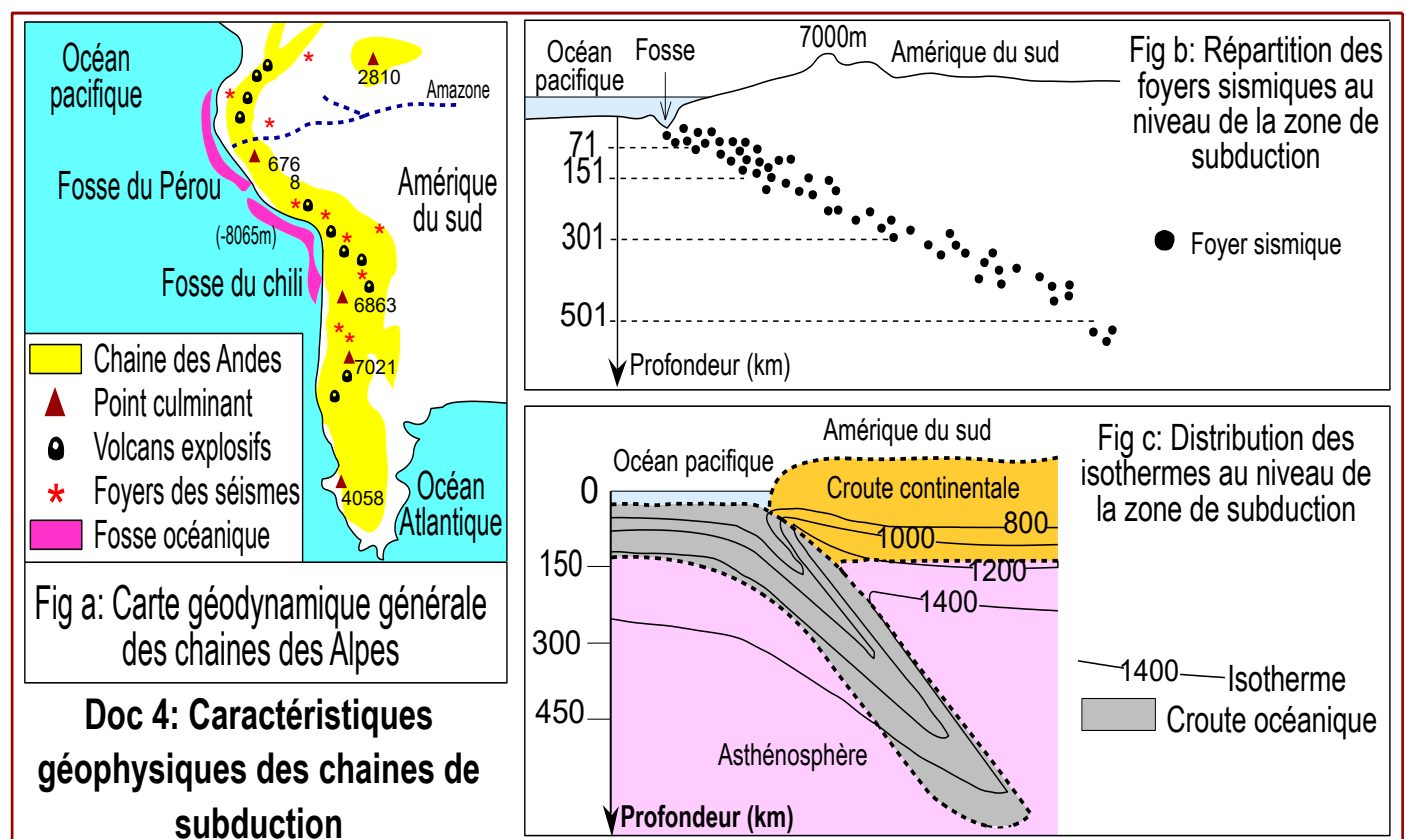
⚙️ **Caractéristiques pétrographiques** (nature des roches) : essentiellement des roches magmatiques volcaniques (l'andésite) et plutonique (la granodiorite).

② **Caractéristiques des roches magmatiques des Andes :**

● **L'andésite** : roche grise, poreuse de structure microlitique, constituée de cristaux de différentes tailles : des phénocristaux et des microlites noyés dans une pâte vitreuse (du verre). La structure de l'andésite indique qu'il s'agit d'une roche volcanique, le magma qui lui a donné lieu est parvenu jusqu'en surface ou il s'est refroidi complètement.

● **La granodiorite** : roche de structure grenue formée de grands cristaux soudés sans pâte vitreuse. Cette roche est donc une roche plutonique, Le magma d'origine a été piégé et s'est refroidi entre les roches en profondeur sous forme de batholite (pluton).

## III/ Caractéristiques géophysiques des chaînes de subduction



**Isotherme** : Ligne imaginaire passant par les points du globe où la température moyenne est la même.  
**Foyer d'un séisme ou hypocentre** : le point où prend naissance la rupture à l'origine du séisme.

### Doc 5: Autre phénomène (prisme d'accrétion) lié aux chaînes de subduction (japon)

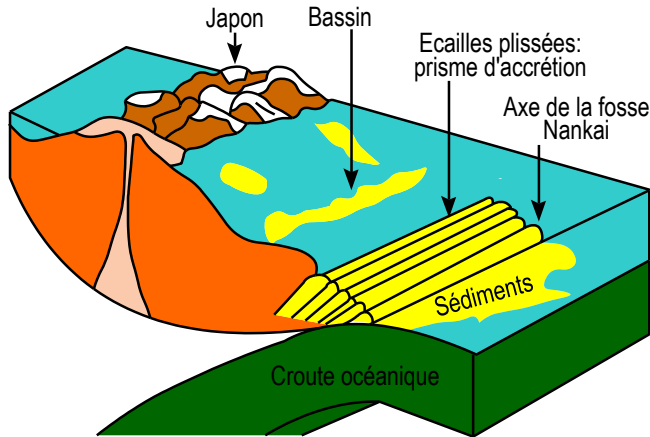


Fig a: Prisme d'accrétion récent dans la fosse Nankai au Japon



Fig b: Aspect d'un prisme d'accrétion ancien (indicateur de l'échelle: les trois individus au sommet)

❶ Doc 4 et 5, **déduire** les caractéristiques géologiques et géophysiques des chaînes de subduction.

❷ **Montrer** que les caractéristiques sismique, géothermiques et le prisme d'accrétion sont en relation avec la tectonique des plaques.

### Réponses :

#### ❶ Les caractéristiques géologiques et géophysiques des chaînes de subduction :

❁ Les Andes sont situées dans la zone de confrontation (تجابه) entre la plaque du Pacifique et la plaque sud-américaine. La marge ouest de cette chaîne, qualifiée par **active** est caractérisée par des activités géologiques particulières, notamment:

- **La présence de reliefs** : تضاريس: fosses océaniques profondes (6 à 12km de profondeur) bordant l'océan et de reliefs de grande altitude bordant le continent.
- **Une activité Volcanique** : volcanisme explosif بركانية انفجارية (magma visqueux et riche en gaz) de type andésitique.
- **Une activité sismique importante** : les foyers sismiques ont des profondeurs différentes, en effet, de la fosse océanique vers le continent, la profondeur des foyers sismiques augmente suivant un plan incliné sous le continent, ce plan est appelé **plan de Bénéioff**.
- **Une anomalie thermique** : les isothermes sont inclinés vers la profondeur suivant le plan de Bénéioff, on parle d'anomalie thermique négative شذوذ حراري سلبي.

❁ La cordillère السلسلة de subduction au niveau du Japon montre un ensemble de couches sédimentaires océaniques en écaillures accolées de grande altitude formé au niveau de la fosse océanique et qu'on nomme : **prisme d'accrétion** منشور التضخم.

Remarque :

- Un **arc volcanique** قوس بركاني est un ensemble de volcans s'alignant selon une courbe. Ils naissent de la subduction d'une plaque océanique sous une plaque continentale ou sous une autre plaque océanique. Dans le cas d'une subduction intra-océanique, les volcans forment des îles groupées en **un archipel** (أرخبيل).
- Sous les fosses océaniques, on note une anomalie thermique négative.
- Sous les arcs volcaniques, on note une anomalie thermique positive

## ② Relation entre les caractéristiques géophysiques et la tectonique des plaques :

Les caractéristiques géophysiques sont la conséquence de la subduction :

### ■ **L'activité sismique :**

Le mouvement de la lithosphère océanique sous la lithosphère continentale, est la cause des foyers sismiques. La disposition oblique التوزيع المائل de ces foyers indique que l'enfoncement de la lithosphère océanique se fait de manière inclinée suivant le plan de Bénioff.

### ■ **L'anomalie thermique négative :**

La lithosphère océanique, en vieillissant et en s'éloignant de la dorsale, se refroidit et devient plus dense. Lors de la subduction, elle conserve sa température froide, ce qui explique les anomalies thermiques négatives observées dans ces zones.

### ■ **Le prisme d'accrétion :**

Au-dessus de la croûte océanique, une couche sédimentaire se dépose, arrivée au niveau de la subduction, cette couche est arrêtée par la plaque chevauchante qui agit alors comme un véritable rabot منجر qui fait accumuler les sédiments meubles (غير متماسكة) sous formes d'écaillés قشور plissées et faillées dont l'ensemble constitue le prisme d'accrétion.

## III/ Conditions de formation du magma andésitique

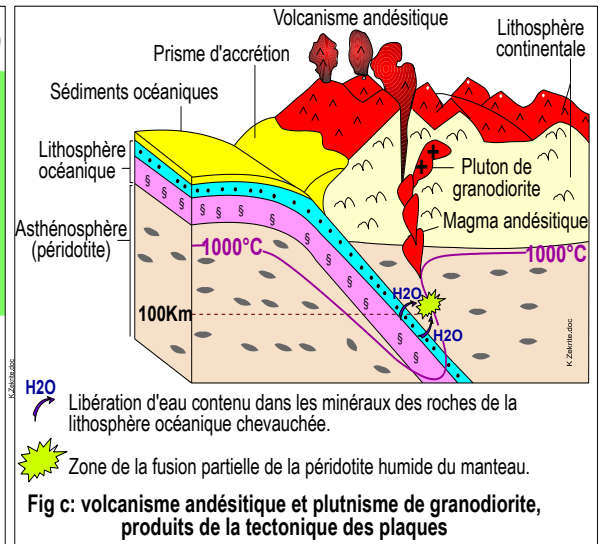
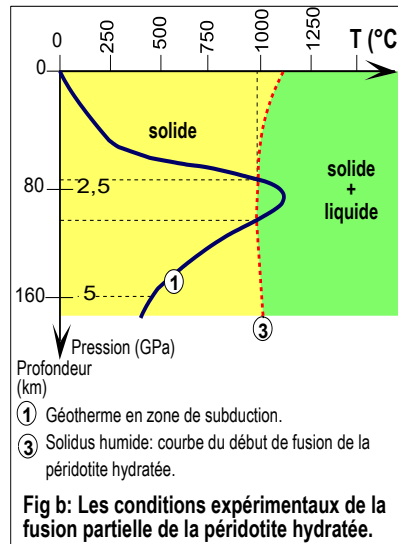
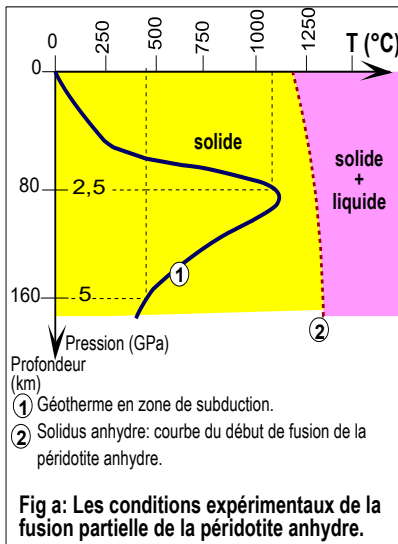
### Doc 6 : Conditions de formation du magma andésitique dans les zones de subduction :

⚙ Des expériences de fusion partielle انصهار جزئي réalisées sur la péridotite (roche du manteau) anhydre (sec) et humide, tout en variant les conditions de température et de pression ont donné les résultats présentés sur le graphique (a) et (b). Les mêmes graphiques présentent le géotherme au niveau des zones de subduction.

***Un géotherme = courbe du gradient géothermique = une courbe de la variation de température en fonction de la profondeur.***

⚙ La figure (c) représente un schéma montrant la relation entre la subduction et la formation du magma andésitique caractéristique de ces bordures.

***La courbe solidus : sépare le domaine partiellement fondu du domaine solide.***



- ① Fig (a) et (b) : **Comparer** les résultats de la fusion expérimentale de la péridotite dans les deux états sec et hydraté. **Déduire** la condition possible de la fusion partielle de la péridotite dans les zones de subduction et les valeurs de profondeur et de température correspondante.
- ② En se basant sur les données précédentes et sur le schéma de la figure (c), **montrer** que le volcanisme andésitique et le plutonisme est en relation avec la tectonique des plaques (la subduction).

## Réponses :

### ① ■ Comparaison des résultats de la fusion expérimentale de la péridotite dans les deux états sec et hydraté.

↪ Figure (a) : en absence d'eau, la courbe du gradient géothermique de la zone de subduction ne coupe pas la courbe de fusion partielle de la péridotite. Donc la péridotite ne fusionne pas quel que soit la profondeur de la péridotite anhydre.

↪ Figure (b) : en présence d'eau, les deux courbes se croisent. Donc la fusion partielle de la péridotite est devenue possible, l'eau a facilité cette fusion.

### ■ Déduction de la condition et la profondeur possible de fusion partielle de la péridotite dans les zones de subduction :

↪ La condition obligatoire pour la fusion partielle de la péridotite est **la présence d'eau**.

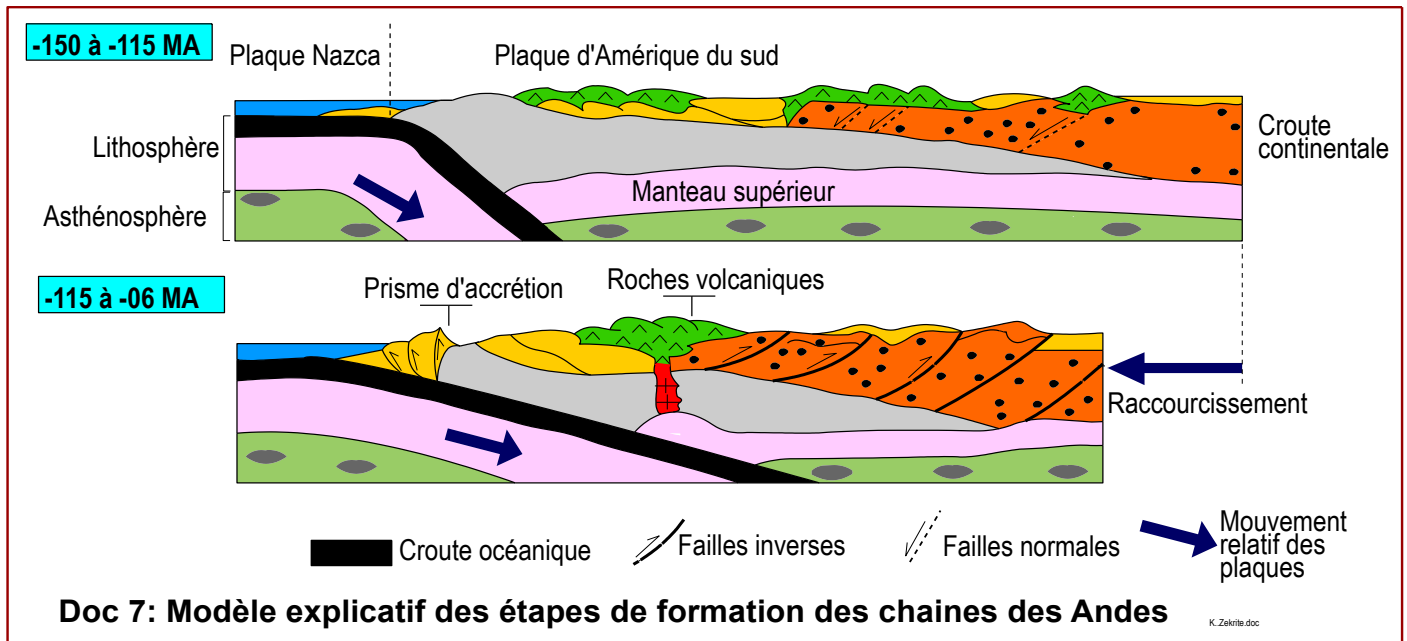
↪ La fusion de la péridotite s'établit entre **80 et 100 km de profondeur** à une température voisine de 1000 à 1100°C.

### ② Le volcanisme andésitique et le plutonisme, en relation avec la tectonique des plaques (la subduction).

● Lors de la subduction, les roches de la lithosphère océanique subissent une forte augmentation de pression et de température, provoquant la libération de l'eau contenue dans leurs minéraux.

- Cette eau hydrate le manteau (péridotite) et facilite sa fusion partielle vers 100 km de profondeur sous la plaque chevauchante.
- Le magma formé, moins dense, remonte vers la surface : soit il atteint la surface et forme des volcans produisant de l'andésite, soit il se solidifie en profondeur en plutons donnant de la granodiorite.
- Ainsi, le volcanisme et le plutonisme sont directement liés à la subduction, et cessent lorsque celle-ci s'arrête.

#### IV/ Etapes de la formation des chaînes de subduction



En exploitant le doc 7, **décrire** l'histoire géologique qui a conduit à la formation des chaînes des Andes.

#### Réponses :

##### Histoire géologique ayant conduit à la formation des chaînes des Andes.

- A partir du crétacé (-150MA) et sous l'effet de forces de convergence, la plaque Nazca entre en confrontation **تواجه** avec la plaque d'Amérique du sud.
- La plaque océanique de Nazca étant plus dense s'enfonce en dessous de la plaque continentale d'Amérique du sud moins dense.
- Une fosse océanique associée à un prisme d'accrétion et une activité volcanique intense étant le résultat de cette subduction.
- Les forces de compression qui s'exercent sur la lithosphère continentale entraînent sa déformation, ainsi se forme des plis simples et des failles inverses.
- La poursuite des forces compressives (lentes mais de longue durée : de -150 à 6MA) et les déformations résultantes ont conduit à un raccourcissement (**تقصير**) avec un épaississement **زيادة سمك** de la croûte continentale et la naissance d'une chaîne de montagnes s'étendant sur la marge occidentale **الهامش الغربي** du continent sud-américain.

➤ Les émissions volcaniques s'ajoutent à ce raccourcissement et participent à l'élévations des reliefs. La formation de cette chaine, due au phénomène de subduction, entre donc dans le cadre dynamique de la tectonique des plaques.

**Remarque** : Localement, on rencontre dans la chaine des Andes des failles normales dues à des forces divergentes locales, opposées au cadre général de la convergence lithosphérique.

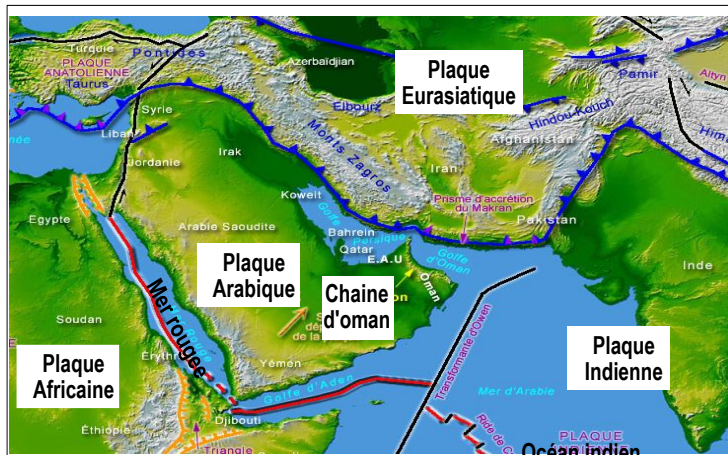
## Activité 3 : Les chaînes d'obduction et leur relation avec la tectonique des plaques

L'obduction الطفو est le chevauchement d'une croûte océanique plus dense sur une plaque continentale, sous l'effet de forces tectoniques compressives. Les chaînes d'Oman constituent l'exemple type de ce type de chaînes.

- ➔ Quelles sont les caractéristiques de la chaîne d'Oman?
- ➔ Quels sont les indices qui permettent de retracer l'histoire géologique de cette chaîne et de la lier au contexte géodynamique : mouvement des plaques.

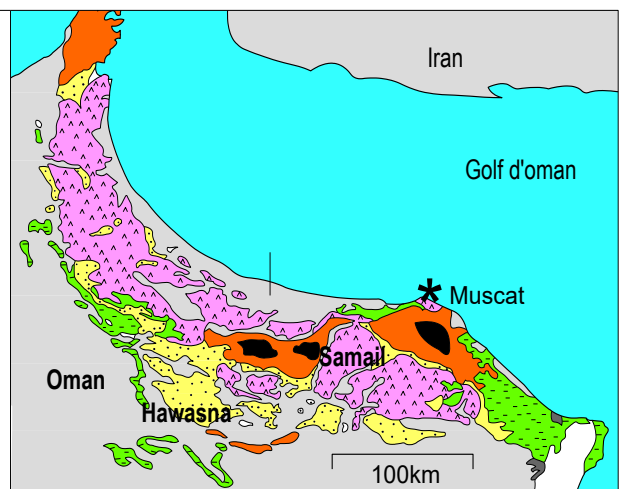
### I/ Caractéristiques structurales et pétrographiques de la chaîne d'Oman

#### Doc 1 : Chaîne d'Oman, situation et caractéristiques



▲ Fig a: Situation de la chaîne d'obduction d'Oman

Fig b: Carte géologique simplifiée de la chaîne d'Oman



- sédiments (crétacé - tertiaire)
- Socle précambrien
- ▲▲ Ophiolite de Samail (nappe de charriage de samail).
- Sédiments marins chevauchantes (nappe de Hawasna)
- Unités chevauchées (permien, crétacé)

Fig (d) : La chaîne d'Oman est le plus grand affleurement des ophiolites dans le monde. Cet affleurement se présente sous forme de roches allochtones (مغتربة), sur une longueur qui dépasse 500km et une largeur de 80 à 100km, son épaisseur atteint 15km, dont 8km constituée de péridotite.

- 1 Fig (a) et (b) : **Situer** la chaîne d'Oman et **relever** quelques caractéristiques structurales et pétrographiques de cette chaîne.
- 2 Fig (b) et (c) et (d) : **Quelles** sont les informations apportées par la présence de l'ophiolite dans la chaîne d'Oman.

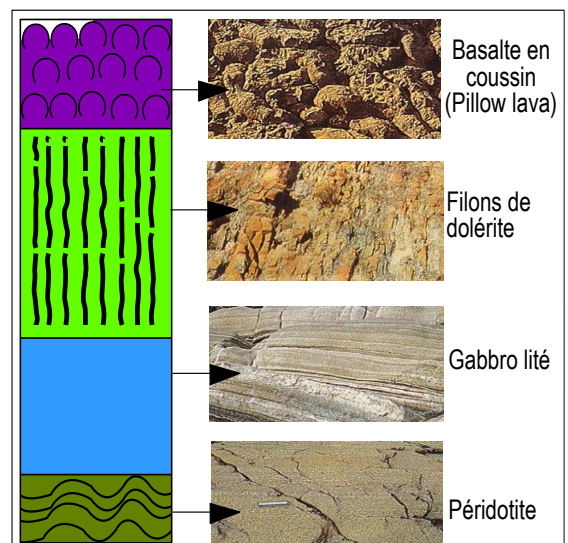


Fig c: Roches composant les ophiolites

## Réponses :

❶ - La chaîne d'Oman est située au sud-est de la péninsule arabique (شبه الجزيرة العربية) au nord de Sultanat Oman, elle s'étend sur les bordures du golf Oman.

- Les caractéristiques structurales: surtout des déformations tectoniques sous forme de nappes de charriage.

- Les caractéristiques pétrographiques : des roches sédimentaires et surtout un complexe rocheux appelé ophiolite.

❷ L'**ophiolite** est un complexe constitué des mêmes roches de la lithosphère océanique qui sont : le basalte, la dolérite, le gabbro et la péridotite. L'ophiolite d'Oman est donc une lithosphère océanique ancienne.

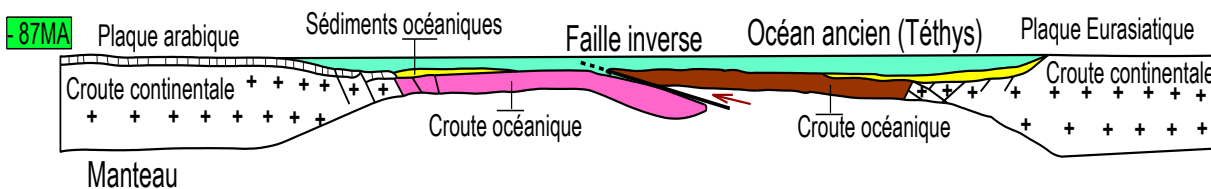
La présence d'ophiolite dans la chaîne d'Oman indique la présence d'un **océan ancien** (**exocéan**) entre la plaque arabique et la plaque eurasiatique et que la croûte océanique a remontée sur le continent arabique. Il s'agit du phénomène d'obduction. La chaîne d'Oman est donc une chaîne d'obduction.

### III/ Etapes de formation de la chaîne d'Oman

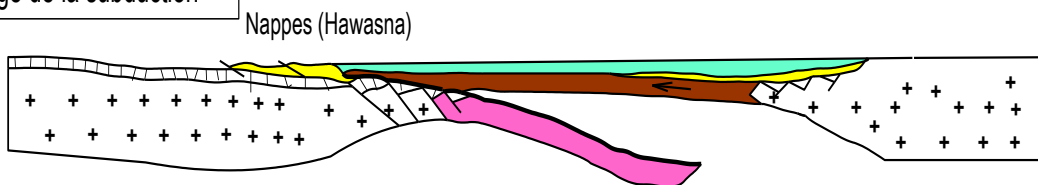
#### Doc 2 : Les étapes de formation de la chaîne d'Oman

Compte tenu des caractéristiques structurales et rocheuses actuelles des montagnes d'Oman, on a pu restaurer (استعادة) l'histoire géologique de la région. Les schémas suivants résument les étapes majeures de cette histoire.

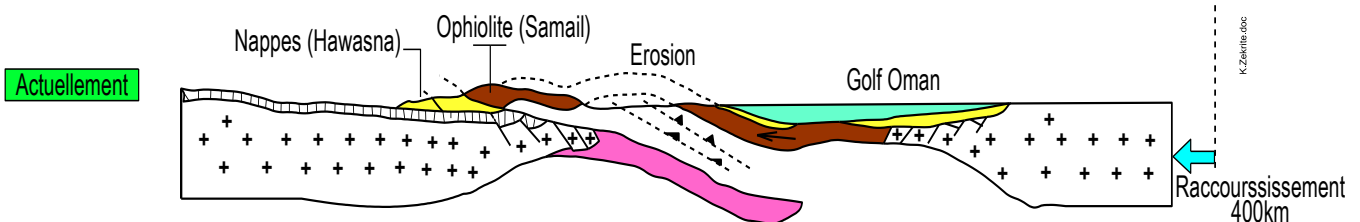
##### Etape 1: Subduction intra-océanique



##### Etape 2: Blocage de la subduction



##### Etape 3: obduction



**Schémas retraçant l'histoire géologique compressive ayant conduit à une obduction et aux ophiolites d'Oman**

➤ En exploitant ces schémas, **Donner sous forme d'un texte** l'enchaînement chronologique des principaux événements géologiques qu'a connus la chaîne d'Oman.

## Réponses :

On peut résumer les principaux événements géologiques qu'a connus la chaîne d'Oman comme suit :

### Etape 1 : Subduction intra-océanique :

- \* Sous l'action des forces compressives, la croûte océanique a subi une grande cassure : une faille inverse suivie d'une subduction intra-océanique (dans l'ancien océan nommé Téthys) : la lithosphère océanique arabique s'enfonce en dessous de la lithosphère océanique Eurasiatique.
- \* Cette subduction, entraîne la fermeture progressive du domaine marin, et fait rapprocher la croûte continentale arabique de la zone de subduction jusqu'à ce que la croûte continentale arrive au niveau de cette frontière et commence à s'enfoncer en dessous de la croûte océanique.

### Etape 2 : Blocage de la subduction

La croûte continentale, moins dense que la croûte océanique, ne peut pas plonger au-dessous d'une certaine profondeur sous la croûte océanique, ce qui entraîne l'arrêt de la subduction.

### Etape 3 : Obduction

- \* La poursuite des forces de compression malgré l'arrêt de la subduction se compense par un phénomène d'obduction : chevauchement de la lithosphère océanique eurasiatique sur la croûte continentale arabique, formant les nappes ophiolitiques (de Samail).
- \* Lors de ce chevauchement, les sédiments marins profonds sont poussés par l'ophiolite donnant un prisme d'accrétion en avant de la chaîne (nappes de Hawasna).
- \* L'accumulation des ophiolites et des sédiments a entraîné l'épaississement de la croûte continentale, provoquant une élévation du relief et la formation de la chaîne Omanaise.

## Activité 4 : Les chaînes de collision et leur relation avec la tectonique des plaques

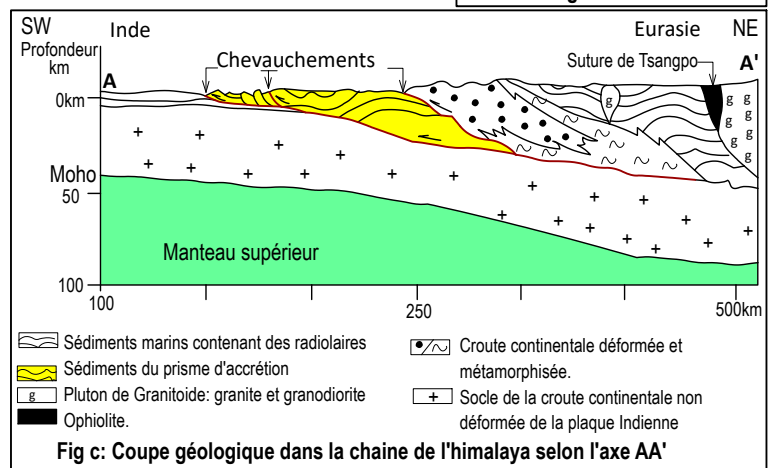
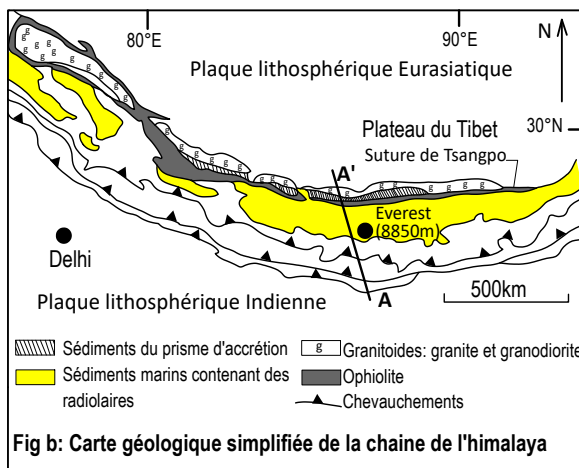
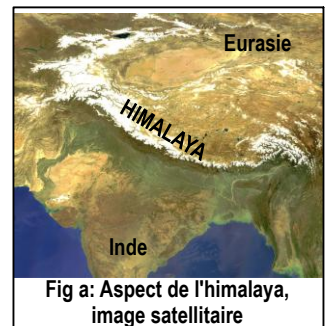
La convergence des plaques lithosphériques aboutit à la collision de deux masses continentales, et par conséquent la formation de chaînes de collision. L'himalaya, les alpes et la chaîne du rif au Maroc constituent des exemples de chaînes de montagnes de ce type.

- ➔ Quelles sont les caractéristiques des chaînes de collision ?
- ➔ Quels sont les indices qui permettent de retracer l'histoire géologique de ces chaînes et de les lier au contexte géodynamique : mouvement des plaques.

### I/ Caractéristiques structurales et pétrographiques de la chaîne de l'Himalaya

#### Doc 1 : Caractéristiques de la chaîne de l'Himalaya

- ➔ Fig a : **situer** la chaîne de l'Himalaya
- ➔ Fig b et c : **Déterminer** les caractéristiques structurales et pétrographiques de la chaîne de l'Himalaya. **Que peut-on déduire** quant aux événements géologiques qu'a connus cette chaîne ?



### Réponses :

➔ L'Himalaya est un ensemble de chaînes de montagnes intracontinentaux. L'Himalaya sépare le continent Indien du plateau tibétain هضبة التبت dans le Sud de l'Asie. Cette chaîne contient le sommet le plus haut au monde : le mont Everest (8850m).

➔ D'après la carte et la coupe géologique réalisées dans l'Himalaya ,

#### ■ Les caractéristiques structurales sont :

➤ Des déformations tectoniques telles que les plis, les failles, mais surtout des chevauchements de grande amplitude, qui indiquent un glissement de la croûte continentale Eurasiatique sur la croûte Indienne.

➤ Croute continentale très épaisse la profondeur de la racine crustale dépasse 60km, on parle d'une accréation (تضخم) de la croute continentale.

■ **Les caractéristiques pétrographiques :**

➤ Affleurement du complexe ophiolitique qui se situe comme une suture (خياطة) entre le continent asiatique et le continent indien.

➤ Des sédiments du prisme d'accréation et des sédiments marins des mers profondes : présence de fossiles comme les radiolaires indique que ces sédiments sont des mers profondes.

➤ Affleurement de roches métamorphiques

➤ Affleurement de roches magmatiques plutoniques : granite et granodiorite, du côté du continent Eurasiatique.

🔗 **Conclusions :**

✓ La présence de sédiments marin des mers profondes et de l'ophiolite en position de suture entre les deux continents Indien et Eurasiatique indique la présence d'un ex-océan entre ces deux masses continentales et qui a disparu suite à une subduction.

✓ En plus de l'ophiolite, il y'a d'autres témoins de la subduction comme la présence des granodiorites et le prisme d'accréation.

✓ Les granodiorites affleurent au sein de la croute Eurasiatique, preuve que cette plaque était la plaque chevauchante الراكبة lors de la subduction.

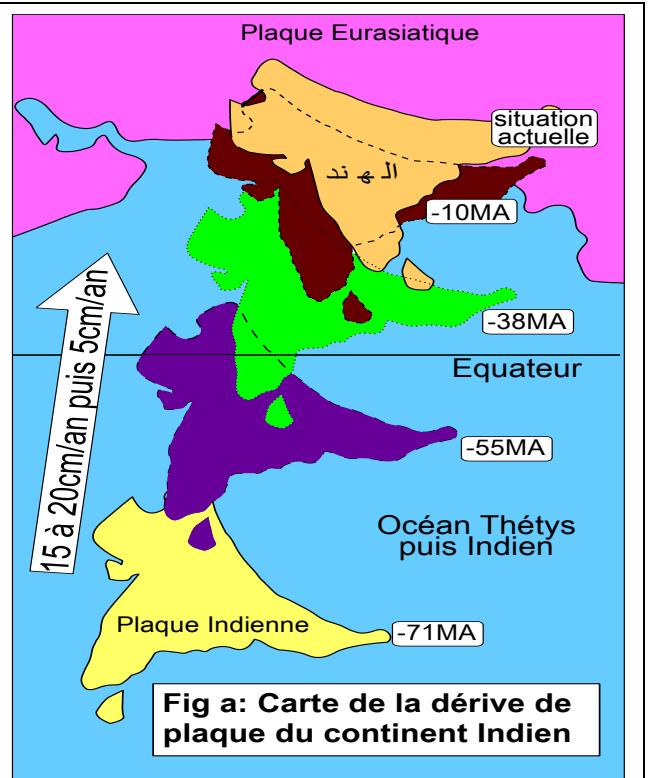
✓ Le chevauchement de la croute continentale Eurasiatique sur la croute continentale Indienne et l'accréation de la croute continentale indique un phénomène de collision entre les deux masses continentales

### III/ Etapes de la formation de la chaîne de l'Himalaya

#### Doc 2 : Mouvement de l'Inde vers le nord depuis (-71MA)

L'Inde, avant (-100MA) était accolée au continent austral, qui comprenait également l'Afrique, l'Australie et l'Antarctique.

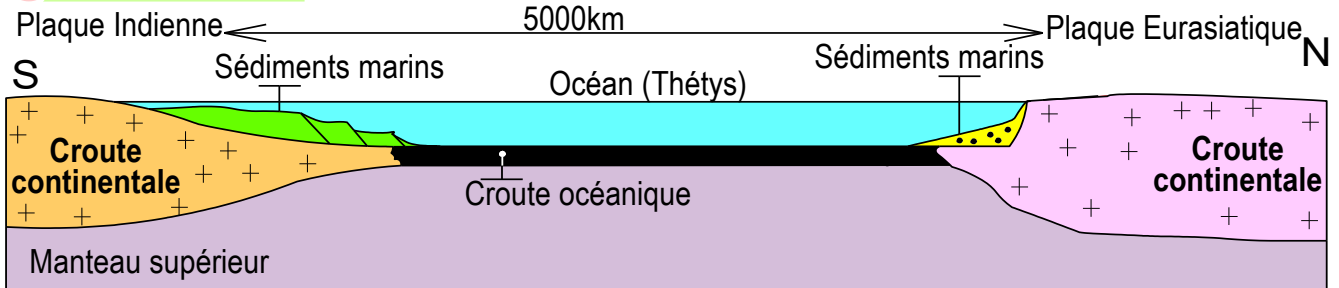
La figure suivante retrace le mouvement de ce Continent depuis (-71 MA)



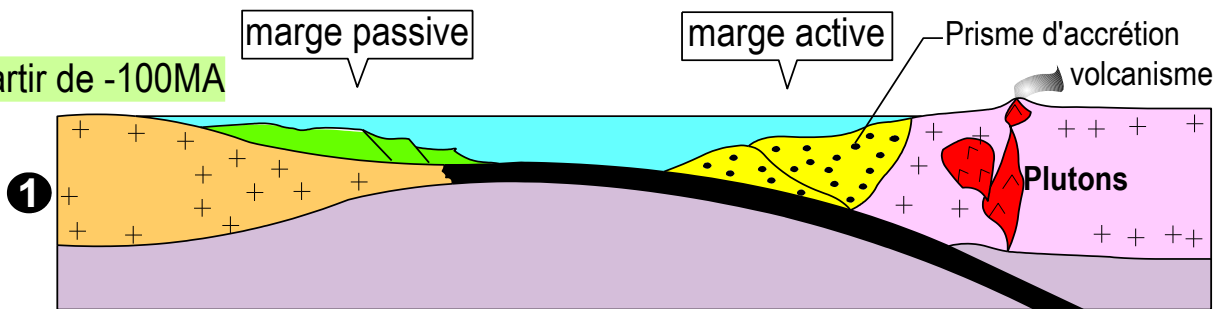
### Doc 3 : Model explicatif de formation de la chaîne de l'Himalaya

La formation de la chaîne himalayenne est une longue histoire qui commence sous la mer, il y a plus de 250 millions d'années (Ma). A cette époque, l'unique continent de la planète Terre, la **Pangée**, se fractionne en deux masses continentales, l'Eurasie au nord et le Gondwana au sud. Ces deux blocs étaient séparés par la mer **Téthys**. La figure suivante retrace l'histoire géologique de cette chaîne.

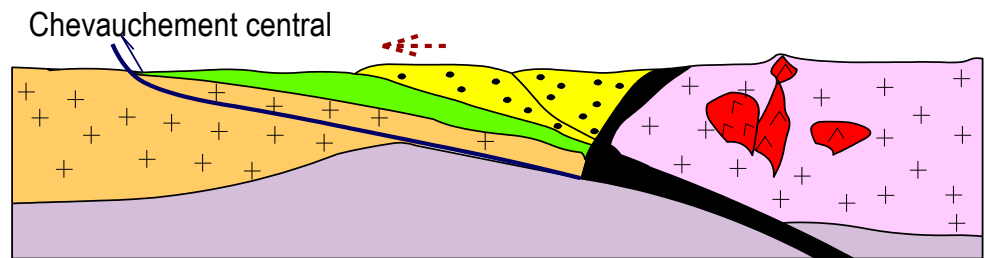
#### 1 Avant -100MA



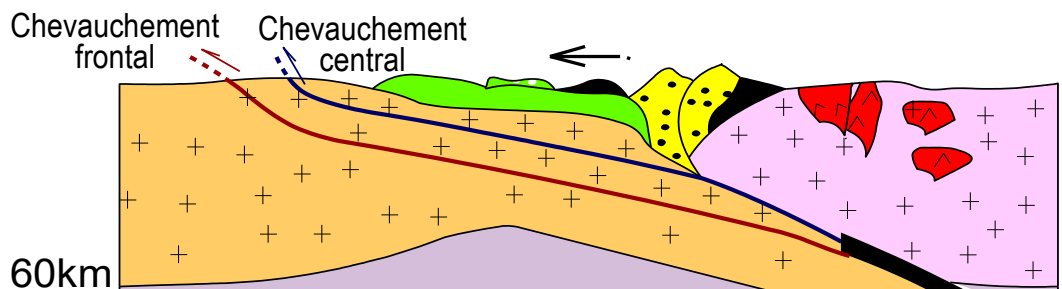
#### 2 A partir de -100MA



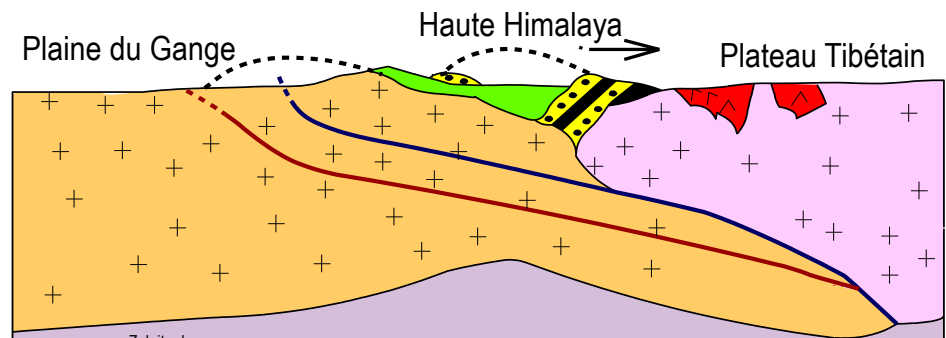
#### 3 -50MA



#### 4



#### 5 Actuellement



Document 2 et 3, résumez les étapes de formation de la chaîne de l'Himalaya.

## Réponses :

La chaîne de l'Himalaya s'est formée à la suite de la tectonique des plaques, en trois grandes étapes :

### ➤ Etape 1 : Subduction :

L'Inde, initialement située dans l'hémisphère sud, s'est déplacée vers le nord après sa séparation de l'Afrique il y a environ 100 millions d'années. Ce mouvement a été permis par la subduction de la croûte océanique de la Téthys sous la plaque eurasiatique, entraînant un volcanisme et la formation de prismes d'accrétion

### ➤ Etape 2 : Blocage de la subduction et obduction:

Vers 50 millions d'années, la collision entre les continents indien et eurasiatique a bloqué la subduction et provoqué une obduction, dont il ne reste aujourd'hui qu'une suture ophiolitique

### ➤ Etape 3 : La collision

Enfin, la collision s'est poursuivie lentement, provoquant une forte compression de la croûte, des plis, des failles et des chevauchements. L'épaississement de la croûte qui en résulte a donné naissance à la haute chaîne de l'Himalaya, culminant à plus de 8000 mètres et s'enracinant profondément dans la lithosphère.

***Remarque :** L'Himalaya est un relief bien vivant, présente encore des séismes, continue à s'élever à un rythme moyen d'un mètre tous les mille ans, et ce, malgré l'érosion intense qui le grignote jour après jour.*

## Chapitre 2 : Le métamorphisme et sa relation avec la tectonique des plaques

Les roches métamorphiques affleurent (تستسطح) au niveau des zones qui correspondent aux parties profondes des chaînes de montagnes (récentes et ancienne), En effet ces roches sont arrivées en surface, suite à l'érosion qui affecte les parties superficielles des chaînes. Ces roches sont donc des témoins des conditions physiques qui régnaient au niveau de la lithosphère au moment de la formation de la chaîne de montagne.

### Problématique :

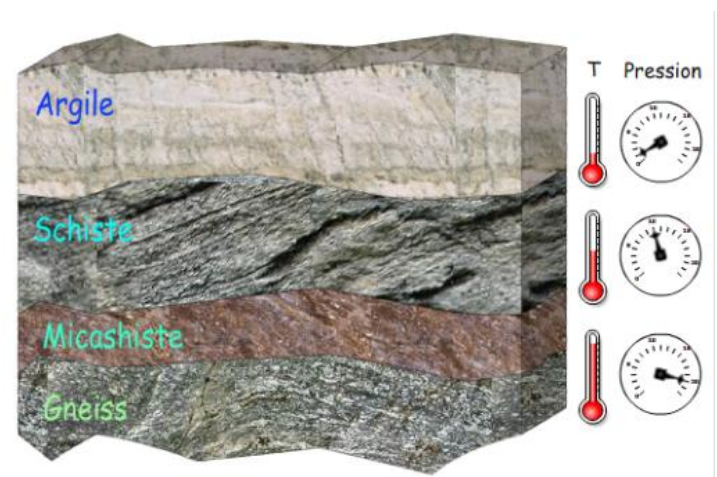
↪ Comment la présence des roches métamorphiques en surface permet-elle de reconstituer les conditions physiques profondes de la lithosphère lors de la formation des chaînes de montagnes ?

### **Plan du chapitre :**

- **Activité 1** : Caractéristiques structurales et minéralogiques des roches métamorphiques.
- **Activité 2** : Facteurs responsables de la formation des roches métamorphiques.
- **Activité 3** : Notion de minéral indicateur, de séquence et de faciès métamorphique
- **Activité 4** : Types de métamorphismes et leurs relations avec la tectonique des plaques.



Affleurement de roches métamorphiques  
Dans la chaîne des Alpes

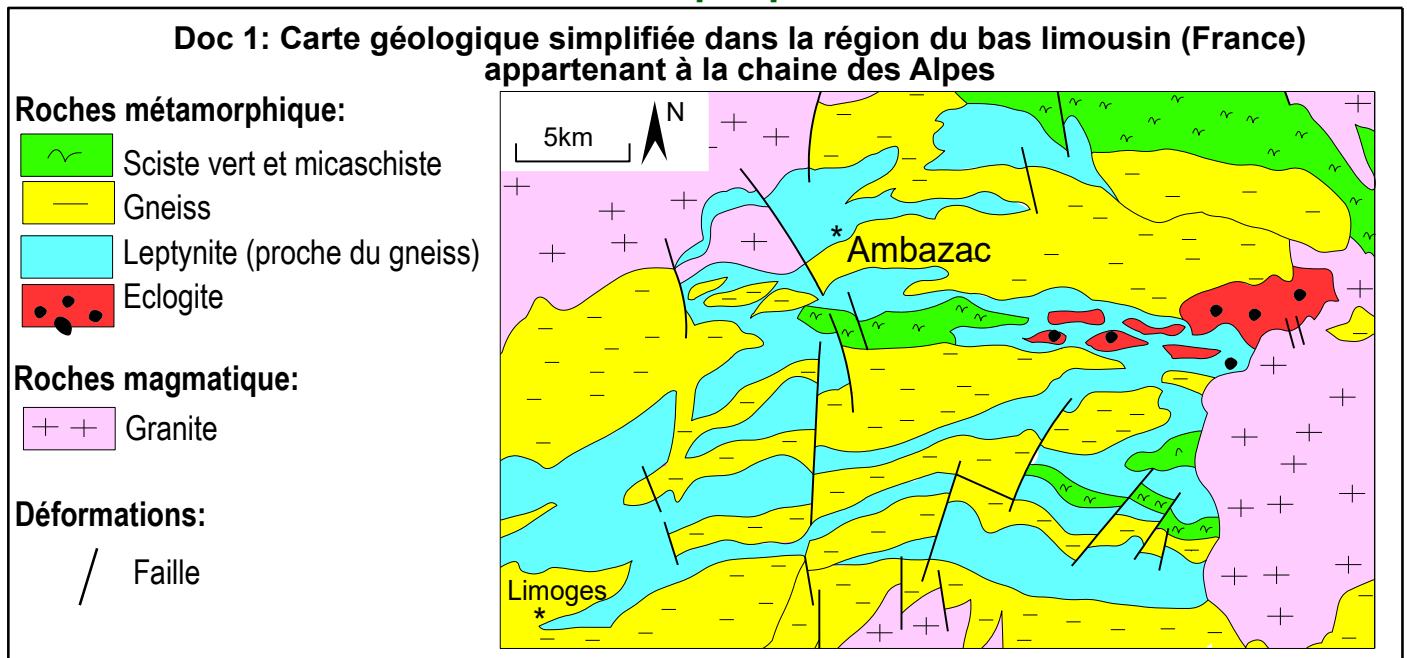


La roche métamorphique garde en mémoire  
les conditions physiques qu'elle a vécues.

# Activité 1 : Caractéristiques structurales et minéralogiques des roches métamorphiques dans les zones de collision et de subduction

## I/ Roches métamorphiques témoignant une collision :

### 1/ Affleurement des roches métamorphiques dans le bas Limousin



↳ Décrire la répartition des roches métamorphique dans cette partie des Alpes Françaises.

#### Réponses :

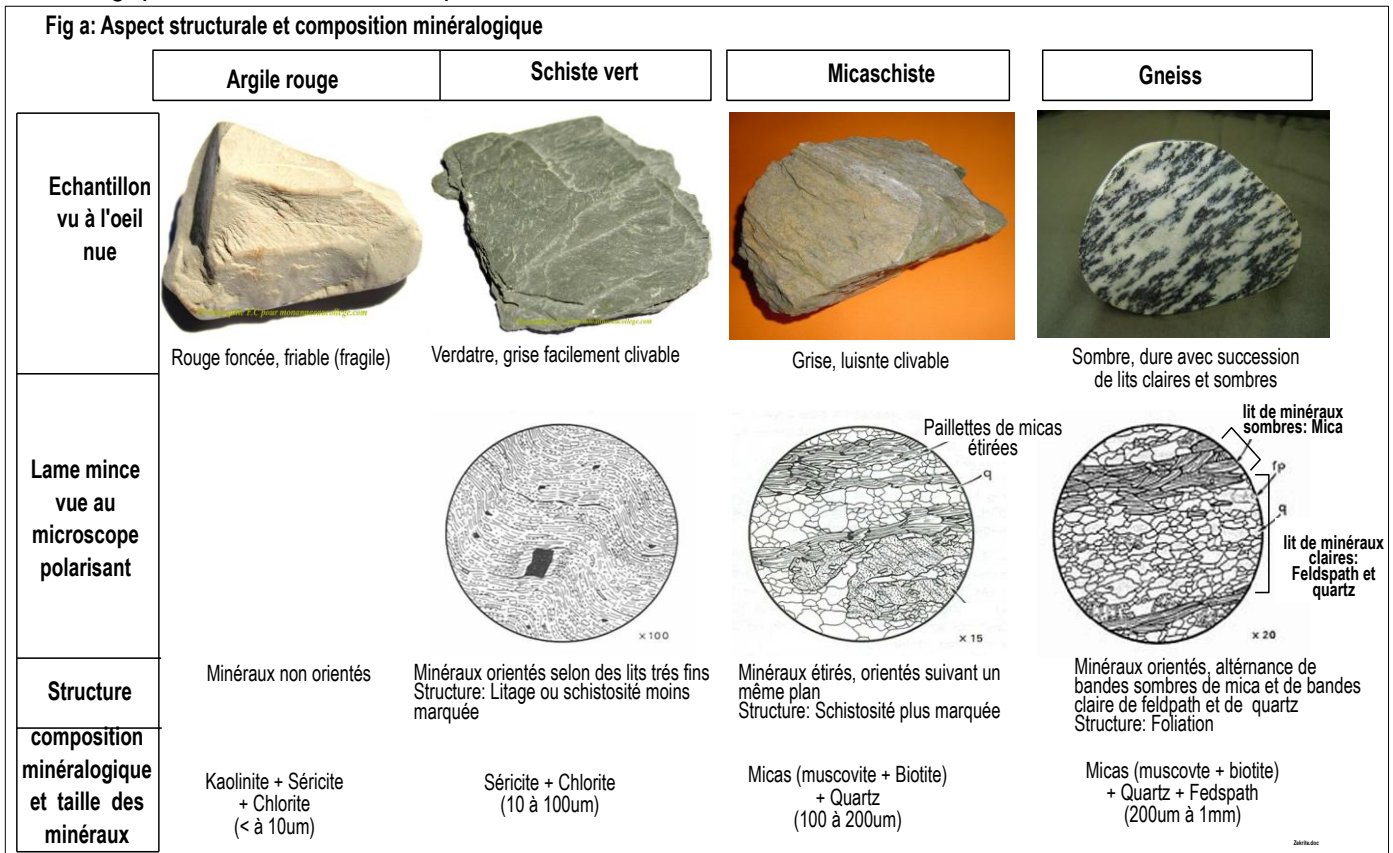
- Les roches métamorphiques les plus rencontrées dans cette chaîne de collision sont : les schistes, les micaschistes et les gneiss (roches métamorphiques).
- Ces roches métamorphiques sont liées à des roches magmatiques (le granite) et à une intense déformation cassante (failles).

### 2/ Caractéristiques structurales, minéralogiques et chimiques

Doc 2

## Doc 2 : Caractéristiques des roches métamorphiques des zones de collision

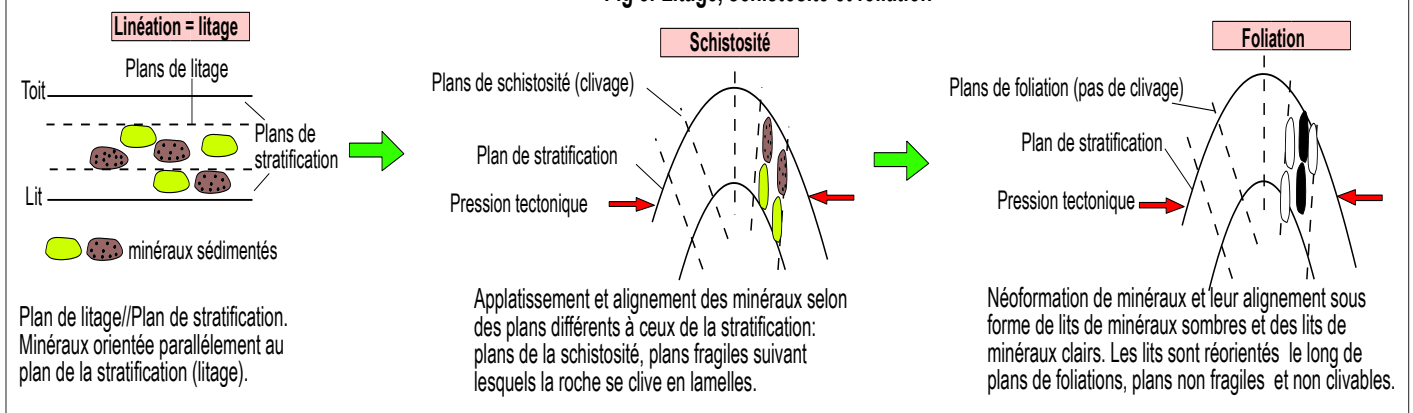
Des études de terrain ont montré que les trois roches métamorphiques : schiste, micaschiste et gneiss rencontrés dans les zones de collision, existent dans des terrains à sédiments argileux. Pour savoir s'il y a une relation probable entre ces roches métamorphiques et les roches sédimentaires, on propose l'étude minéralogique, structurale et chimique de ces roches.



**Fig (b) : Composition chimique**

	Silice SiO <sub>2</sub>	Alumine Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O
Argile	58,2%	20,9%	2,8%	0,85%	0,55%	2,45%	4,1%	7%
Schiste	60,2%	20,9%	2,8%	0,85%	0,55%	2,45%	4,1%	4,05%
Micaschiste	60,9%	19,1%	1,2%	1,4%	1,7%	2,1%	3,7%	3,05%
Gneiss	68,7%	16,2%	0,7%	1,3%	1,8%	3,8%	3%	1,4%

**Fig c: Litage, schistosité et foliation**



**1 Observez** ces différentes roches (à l'œil nu et avec la loupe à main) et **identifiez** leurs caractéristiques. **Complétez vos observations** en utilisant les données de la figure (a).

- ② Fig (a) et (c), **définir** les structures : schistosité et foliation, à l'œil nu et à l'échelle microscopique (lame mince).
- ③ Fig (a) et (b), **comparez** les caractéristiques structurales, la composition minéralogique et chimique des roches métamorphiques avec les roches argileuses. **Que peut-on conclure** quant à l'origine des roches métamorphiques (schiste, micaschiste et gneiss) rencontrés dans les zones de collision.

## Réponses :

### ② La schistosité et la foliation sont deux structures caractéristiques des roches métamorphiques :

#### 🌿 La schistosité :

- A l'œil nu, la schistosité correspond à un ensemble de plans parallèles selon lesquels les roches schistosées se clivent facilement en feuillets.
- En lame mince, la schistosité représente une structure orientée ou les minéraux sont étirés et alignés dans la même direction.

#### 🌿 La foliation :

- A l'œil nu, la foliation représente l'aspect rubané (مخططة), sous forme de niveaux claires alternant avec des bandes sombres. Les plans de foliation ne sont pas clivables.
- En lame mince, la foliation représente une différence nette de minéralogie des différents feuillets, aboutissant à l'alternance de feuillets contenant des minéraux clairs et des feuillets de minéraux claires.

### ③ Comparaison structurale, minéralogique et chimique des roches métamorphiques avec la roche argileuse :

🌿 Comparaison structurale et minéralogique : En allant de la roche argileuse au gneiss passant par le schiste et le micaschiste, la structure et la composition minéralogique des roches changent :

- Il y'a disparition du litage et apparition de la schistosité puis la foliation
- Il y'a disparition des minéraux caractéristiques de l'argile (Kaolinite, séricite et chlorite) et apparition de nouveaux minéraux.
- Il y'a une augmentation progressive de la taille des minéraux.

🌿 Comparaison chimique : Les schistes, les micaschistes et le gneiss ont presque la même composition chimique que celle des roches argileuses. On note une diminution de la teneur en eau de l'argile vers le schiste.

#### 🌿 Conclusion :









Puisque les roches métamorphiques des zones de collision (schiste, micaschiste et gneiss) ont la même composition chimique que celle des roches sédimentaires argileuses, on peut conclure que ces roches métamorphiques dérivent l'une de l'autre et toutes de la même roche mère : l'argile. La différence structurale et minéralogique entre elles revient au degrés de transformation (métamorphisme) qu'à subit chacune d'elle.

## III/ Roches métamorphiques témoignant une subduction :

### Doc 3 : Caractéristiques des roches métamorphiques des zones de subduction

Les zones de subductions actuelles sont caractérisées par des conditions favorables à la formation de roches métamorphiques, mais il est difficile de les observer et de les étudier parce qu'ils se trouvent en profondeur, pour surmonter cette difficulté, on étudie les roches métamorphiques qui affleurent dans les anciens domaines de subduction.

Fig a: Carte géologique simplifiée de la région de Dora maira (les alpes) montrant des roches métamorphiques liées à une subduction ancienne

- 7  Bassins sédimentaires
-  Limites du domaine plissé
- 6  Roches non métamorphiques
- 5  Roches peu métamorphisées
- 4  Schistes verts (méta-gabbro)
- 3  schistes bleus
- 2  Ophiolite (Gabbro et basalte)
- 1  Eclogites

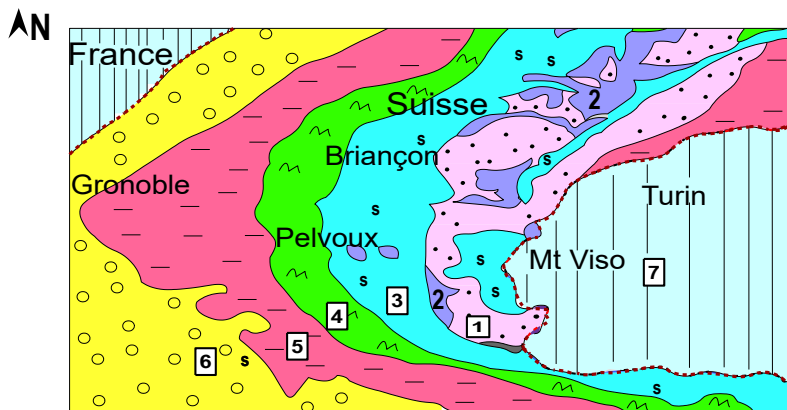


Fig b: composition minéralogique du gabbro et des roches métamorphiques caractérisant les zones de subduction

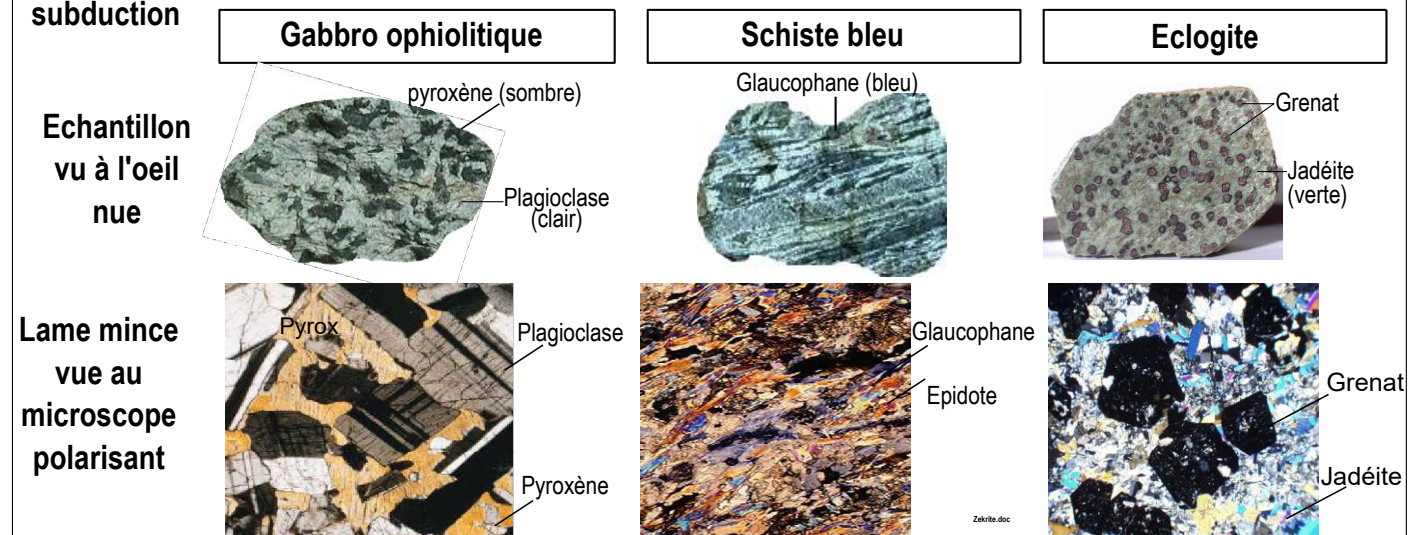


Fig (c) : Composition chimique du basalte, gabbro, schiste bleu et de l'éclogite

	Silice SiO <sub>2</sub>	Alumine Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO, MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
<b>Basalte</b>	50%	15%	18,4%	11,5%	2,7%	0,1%
<b>Gabbro</b>	50%	17,8%	16,2%	12%	2,8%	0,2%
<b>Schiste bleu et éclogite</b>	47,1%	14,2%	23,5%	10%	2,2%	0,4%

① Fig a : **Décrire** la répartition des roches métamorphiques dans cette partie des Alpes qui témoigne une ancienne subduction.

② Fig b : **Que peut-on conclure** de la comparaison de la composition minéralogique et la structure du gabbro et de chacune des roches métamorphiques témoignant une zone de subduction

③ Fig (b) et (c), **comparer** la composition chimique des roches métamorphiques avec les roches ophiolitiques. **Que peut-on conclure** quant à l'origine des roches métamorphiques (schiste bleu, éclogite) rencontrés dans les zones de subduction.

## Réponses :

### ① Description de la répartition des roches métamorphiques dans cette partie des Alpes :

Les roches métamorphiques présentent une zonation: on passe graduellement des schistes verts aux schistes bleus, puis à l'éclogite. Ces roches métamorphiques affleurent au voisinage des roches ophiolitiques (roches magmatiques de la croûte océanique ancienne).

### ② Composition minéralogique, structure et conclusion:

- Le gabbro est constitué de plagioclase et de pyroxène, sa structure est grenue.
- Le schiste bleu est constitué de glaucophane et d'épidote, il présente une structure orientée : la schistosité.
- L'éclogite est caractérisée par les grenats et l'épidote, sans structure particulière.

Conclusion : la composition minéralogique et structurale de ces trois roches est différente.

### ③ Comparaison de la composition chimique :

La composition chimique du schiste bleu et de l'éclogite est très proche de celle du gabbro et du basalte.

#### ↳ Conclusion :

Le schiste bleu et l'éclogite (et aussi le schiste vert) sont des roches métamorphiques qui dérivent des roches magmatiques de la croûte océanique (le basalte ou le gabbro), ils ont subi une transformation dans leur composition minéralogique et leur structure, sans modification de la composition chimique.

### Bilan de l'activité 1

- Les roches métamorphiques des zones de collision dérivent de la transformation des roches sédimentaires (l'argile) de la croûte terrestre.
- Les roches métamorphiques des zones de subduction dérivent de la transformation des roches magmatiques (gabbro et basalte) de la croûte océanique.
- Le métamorphisme réside dans une transformation minéralogique et structurale sans transformation de la composition chimique.

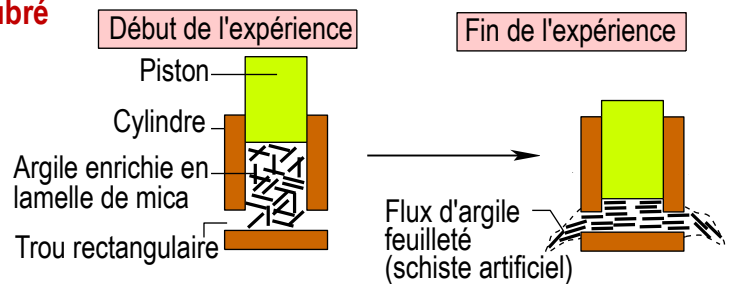
## Activité 2 : Les facteurs qui interviennent dans le phénomène du métamorphisme

Les roches métamorphiques dérivent de roches préexistantes (sédimentaires ou magmatiques), leur situation dans les zones profondes des chaînes de montagnes montre qu'ils subissent des contraintes tectoniques compressives.

→ Quels sont les facteurs responsables de la formation de ces roches ?

### Doc 1 : Action de la pression : expérience de Daubré

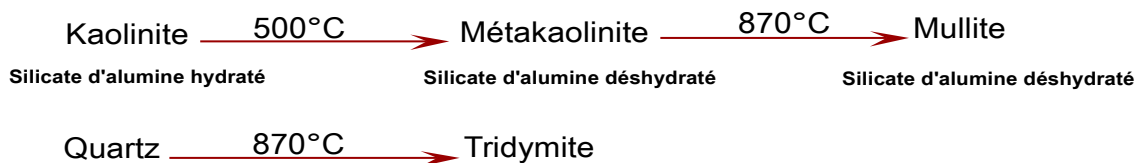
Dans un cylindre à piston et avec des ouvertures rectangulaires à sa base, un mélange d'argile et de lamelles de mica est soumis à une haute pression appliquée par le piston  
Le schéma ci-contre résume cette expérience et ses résultats.



### Doc 2 : Action de la température

✱ La fabrication des briques et des produits de poterie exige une température supérieure à 200°C, afin de transformer la pâte argileuse en argile cuite, cette dernière ne reprend jamais sa plasticité si on ajoute de l'eau.

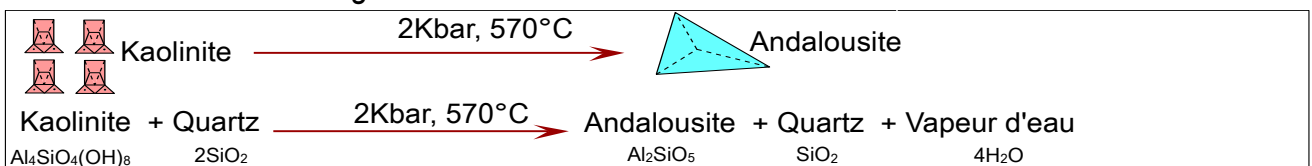
✱ Lorsqu'on chauffe un mélange d'argile (dont la kaolinite est le minéral essentiel) et du quartz, on note les transformations suivantes



Remarque : Ces transformations sont **irréversibles**

### Doc 3: Expérience de Winkler: Action simultanée de la température et de la pression.

Winkler a fait subir à une roche argileuse des variations progressives des deux facteurs ; pression et température et a noté les changements suivants:



## Doc 4: Variation des conditions de métamorphisme dans la nature

### Fig a: Variation de la température

- La température augmente avec la profondeur, cette augmentation est appelée : **gradient géothermique**.
- Ce gradient diffère selon le **cadre géodynamique**, il est de 5°C/km à 10°C/km dans les anciens massifs continentaux et dans les zones de subduction, de 30°C/km dans les frontières de collision. Mais il peut atteindre 50°C/km à 100°C/km au niveau des dorsales océaniques.
- Ce gradient traduit le **flux thermique terrestre dirigé de la profondeur vers la surface** et qui provient de la désintégration des éléments radioactifs contenus dans les roches.

### Fig b: Variation de la pression

Les roches de la lithosphère sont soumises en profondeur à une pression qui est, la somme de trois types de pression:

- Pression tectonique qui résulte de la dynamique des plaques.
- Pression des couches sus-jacentes qui résulte du poids des couches de dessus, elle augmente avec la profondeur.
- Pression des fluides interstitiels : Il s'agit essentiellement de la pression du CO<sub>2</sub> et de la vapeur d'eau qui se trouvent entre les minéraux des roches en profondeur.

- 1 Doc 1 : **Décrire** les résultats de l'expérience de Daubrée et **établir la relation** entre cette expérience et la schistosité caractérisant les roches métamorphiques
- 2 Doc 2 : **Préciser** l'action de la température sur les minéraux.
- 3 Doc 3 : **Expliquez** la différence de composition minéralogique observée entre les roches métamorphiques.
- 4 **Résumez** les causes de variation des conditions de métamorphisme dans la nature.
- 5 **Définir** le phénomène de métamorphisme.

## Réponses :

### 1 Description des résultats de l'expérience de Daubrée et la relation entre cette expérience et la schistosité caractérisant les roches métamorphiques :

- La pression élevée, oriente les paillettes de mica dans une même direction, perpendiculairement à la direction de la pression, une schistosité apparaît, ainsi l'argile se transforme en schiste.
- La schistosité caractéristique des roches métamorphiques est la conséquence d'une pression élevée qui a affecté ces roches.

### 2 Action de la température sur les minéraux.

La température élevée, déshydrate les minéraux (les minéraux perdent l'eau contenu dans leur composition chimique) ainsi ils se transforment à l'état solide en d'autres minéraux nouvellement formés. La température est donc un facteur qui modifie la composition minéralogique des roches d'origine.

### 3 Explication de la différence de composition minéralogique entre les roches métamorphiques :

- Lorsque les minéraux d'une roche sont portés à l'action combinée de la température et de la pression, ils deviennent instables dans les nouvelles conditions,



ainsi ils se déshydratent et subissent une modification à l'état solide pour devenir plus denses, les minéraux anciens se transforment en de nouveaux minéraux plus en équilibre avec les nouveaux facteurs.

■ La différence minéralogique observée lorsqu'on passe d'une roche métamorphique à une autre s'explique par le fait que chaque roche a subi des conditions de températures et de pression qui lui sont propres et qui ont permis l'apparition de minéraux bien déterminés stables dans ces conditions.

#### ④ **Les causes de variation des conditions de métamorphisme dans la nature :**

La pression et la température sont les deux facteurs essentiels qui contrôlent le type et le degré de métamorphisme dans la nature, ces deux facteurs varient selon :

■ La profondeur : la température et la pression augmentent en fonction de la profondeur ; les roches vont subir donc des degrés croissants de métamorphisme en s'enfonçant en profondeur.

■ Le cadre géodynamique de la lithosphère : une roche située dans une zone de subduction va subir des conditions de métamorphisme propres différentes des conditions d'une autre roche soumise à une collision.

#### ⑤ **Définition du métamorphisme**

Le métamorphisme est l'ensemble des transformations structurales et minéralogiques à l'état solide d'une roche préexistante (sédimentaire ou magmatique ou métamorphique) sous l'effet de la variation des facteurs physiques : la pression et la température.

## Activité 3 : Notion de minéral indicateur, de séquence et de faciès métamorphique

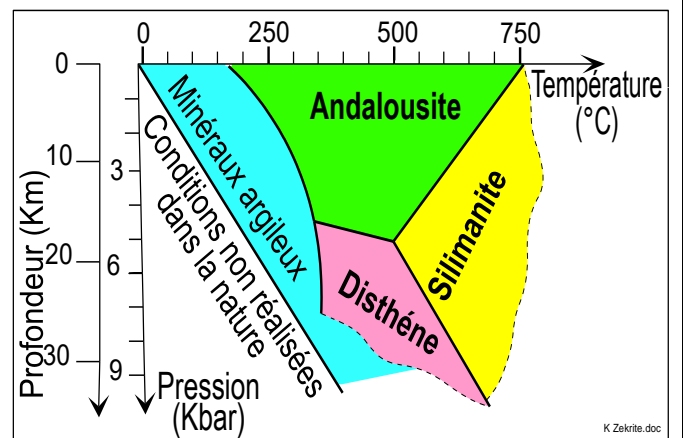
Les roches métamorphiques résultent de la transformation, à l'état solide, de roches mères sous l'action de la pression et de la température. Lors du métamorphisme, des minéraux apparaissent et d'autres disparaissent suivant les conditions de pression et de température.

→ Comment la composition minéralogique d'une roche métamorphique permet-elle de déterminer les conditions de pression et de température de sa formation et d'évaluer le degré du métamorphisme ?

### I/ Notion de minéral indicateur et de domaine de stabilité :

#### Doc 1 : Domaine de stabilité des silicates d'alumine

L'andalousite, le disthène et la sillimanite sont trois silicates d'alumine de même formule globale ( $Al_2SiO_5$ ). Les travaux expérimentaux de Richardson ont montré que chacun de ces trois formes n'apparaît et ne se maintient que dans des conditions de température et de pression nettement définies. Les lignes droites sur le diagramme pression/température représentent les limites du champ de stabilité de chaque minéral.



- ① **Dégager** les domaines de stabilité de pression et de température de chaque minéral des silicates d'alumine, **déduire** pour chaque minéral les conditions qu'il caractérise. (Rédiger vos réponses sous forme d'un tableau).
- ② **Déterminer** les conditions de pression et de température convenable pour l'apparition des trois silicates d'alumine ensemble dans une roche.
- ③ **Définir** : champ de stabilité d'un minéral, minéral indicateur (index) et déterminer l'importance des minéraux indicateurs.

### Réponses :

① **Les domaines de stabilité de pression et de température de chaque minéral des silicates d'alumine et les conditions qu'il caractérise : (tableau).**

Minéraux (silicates d'alumine)	Champs de stabilité pour :		conclusion
	La température (°C)	La pression (Kbar)	
Andalousite	$160 < T < 750$	$P < 5$	Minéral indicateur d'une basse pression
Sillimanite	$T > 450$	Indéterminée	Minéral indicateur d'une haute température
Disthène	$350 < T < 700$	$P > 4,5$	Minéral indicateur d'une haute pression

## ② Les conditions de pression et de température convenable pour l'apparition des trois silicates d'alumine dans une roche :

Ce sont les conditions correspondantes au point triple (point d'intersection des trois lignes séparant les domaines de stabilité du disthène, sillimanite et andalousite) :

P = 5kbar Profondeur = 18km T = 500°C

### ③ Définitions :

⚙ Le champ (ou le domaine) de stabilité d'un minéral : Ensemble des conditions de pression et de température dans lesquelles apparaît un minérale et se maintient (reste stable). Ces conditions peuvent être déterminées expérimentalement.

⚙ Un minéral indicateur (=index) : est un minéral qui a un champ de stabilité limité, il apparaît dans des conditions précises de pression et de température.

⚙ La présence d'un minéral index dans une roche métamorphique permet de reconstituer les conditions de pression et de température subies par la roche qui le renferme. Le minéral index est une mémoire des conditions de métamorphisme.

## III/ Notion de séquence et de faciès métamorphique :

### Doc 2 : Quelques séquences métamorphiques

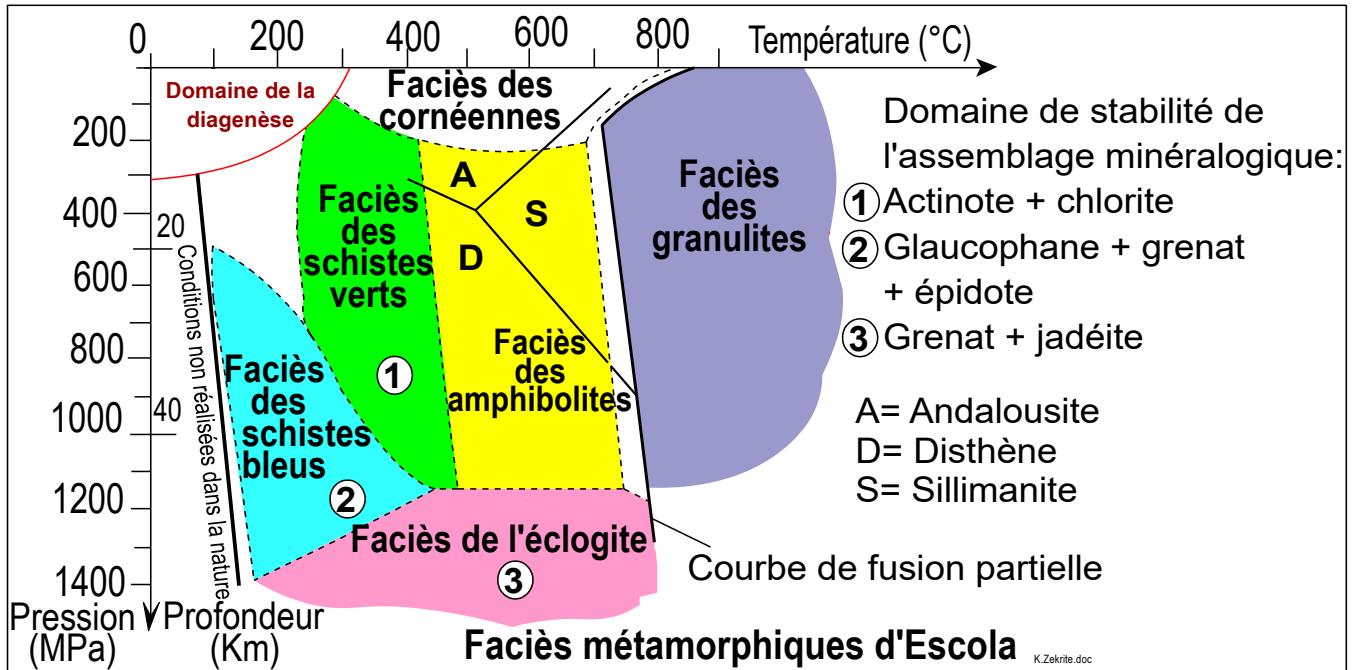
		----- Métamorphisme croissant ----->
Séquences	Roches initiales	Roches métamorphiques
Pélitique	Pélite ou argile	Schiste → micaschiste → gneiss → leptynite
Carbonatée	Calcaire ou dolomie	Calcschiste → marbre (الرخام) → cipolin
Basique	Gabbro ou basalte	Schiste vert → schiste bleu → éclogite

### Doc 3 : Faciès métamorphique

■ Afin de déterminer les pressions et les températures correspondants à la stabilité des minéraux indicateurs, Escola a soumis le basalte à des conditions de pression et de température variables. L'association d'un ensemble de minéraux indicateurs en fonction de la pression et de la température détermine des domaines bien précis appelés faciès de métamorphisme.

■ Les différents faciès prennent le nom des roches métamorphiques résultants de la transformation du basalte dans les différentes conditions de pression et de température.

■ Si on applique les mêmes conditions de pression et de température correspondant à un faciès déterminé sur une autre roche, on obtient un autre ensemble minéralogique, l'argile par exemple, se transforme, dans le faciès de schiste bleu en micaschiste à glaucophane et se transforme, dans le faciès des amphibolites en micaschiste à disthène ou à sillimanite.



MPa: mégapascal

1MPa = 10<sup>6</sup>Pa

Doc 2 et 3 : **Définir** les notions suivantes : séquence métamorphique et faciès métamorphique.

### Réponses :

❁ **Une séquence métamorphique** est un ensemble de roches métamorphiques, issues d'une même roche originelle elles ont une composition chimique identique mais une structure et une composition minéralogique différente car elles ont subi des degrés différents de métamorphisme.

❁ **Un faciès métamorphique** : est un ensemble de roches métamorphiques qui se forment dans les mêmes conditions de température et de pression, et qui contiennent donc des minéraux caractéristiques de ces conditions (minéraux indicateurs). Exemple : le faciès à éclogite est représenté par l'association minérale : jadéite + grenat.

Le faciès métamorphique regroupe des roches d'origines différentes mais soumises à des intervalles de pression et température données, indépendamment de leur composition chimique. Une roche, qu'elle soit, basaltique ou argileuse soumise par exemple à une pression et température déterminée (200 < P < 1150 MPa et 420 < T < 680°C) appartient au faciès d'amphibolite.

## Activité 4 : Types de métamorphismes et leurs relations avec la tectonique des plaques

Le métamorphisme est un phénomène minéralogique provoqué par la pression et la température, en plus du facteur tectonique. Il existe donc un lien spatio-temporel étroit entre le métamorphisme et la formation des chaînes de montagnes.

→ Quels sont les types de métamorphismes et quelle sont leur relation avec les types de chaînes de montagnes ?

→ Comment les données minéralogiques permettent-elles de reconstituer les mouvements des roches métamorphiques et leur évolution dans l'espace et dans le temps ?

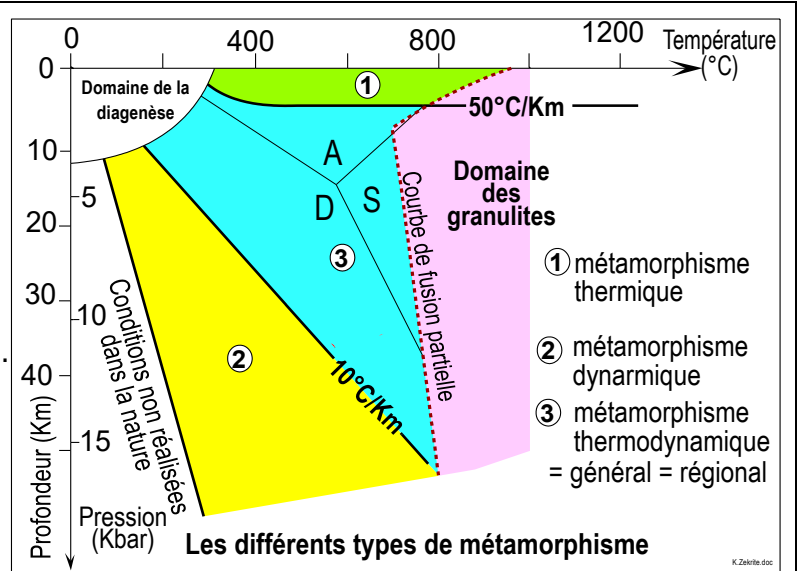
### I/ Les types de métamorphismes en relation avec les types de chaînes de montagnes

#### Doc 1 : Les types de métamorphisme

Winkler a établi une subdivision qui détermine les différents types de métamorphisme en fonction de l'effet de la pression et de la température. La figure ci-contre montre cette division.

En utilisant cette figure :

- 1 **Délimiter** le domaine du métamorphisme.
- 2 **Déterminer**, ce qui caractérise chaque type de métamorphisme, **quels sont** les zones de la lithosphère favorables au développement de chacun de ces trois types de métamorphismes.



#### Réponses :

1 **Le domaine du métamorphisme** est encadré par les basses températures et les hautes pressions (domaine non réalisé dans la nature), le domaine de la diagenèse (domaine de consolidation des sédiments pour donner des roches sédimentaires) et le domaine de fusion partielle (domaine d'apparition d'un magma). Le métamorphisme est strictement limité à des transformations à l'état solide.

#### 2 Les types de métamorphismes :

Selon l'importance de la température et de la pression, on distingue trois types de métamorphismes :

✿ **Le métamorphisme dynamique** : caractérisé par une basse température et une haute pression. Ce type de métamorphisme se développe dans les zones de subduction. En effet, dans ces zones le facteur pression est plus dominant, en lien avec la profondeur, alors que le gradient thermique est faible. Les roches de la

lithosphère océanique plongeante subissent un métamorphisme dynamique au cours de leur enfouissement en profondeur.

❁ **Le métamorphisme thermique = métamorphisme de contact** : caractérisé par une haute température et une basse pression. Ce type de métamorphisme se développe au contact d'un granite intrusif. C'est principalement la température qui intervient, c'est la chaleur du magma qui est responsable de la transformation des roches qui l'entourent formant une auréole (تاج = هالة) de métamorphisme.

❁ **Le métamorphisme thermodynamique = métamorphisme général = régional** : caractérisé par une haute température et une haute pression. Ce type de métamorphisme se développe dans les racines des chaînes de collision et affecte les roches de la lithosphère continentale soumise à l'effet combiné de la pression et de la température dû à la collision.

## II/ Le métamorphisme dynamique des zones de subduction

### Doc 2 : Le trajet d'une roche de la lithosphère océanique au cours de la subduction

A partir de l'exploitation des observations de terrain, des données chimiques, des observations microscopiques, on peut reconstituer le déplacement de la roche dans les domaines de pression et de température en fonction du temps, c'est le trajet P, T, t. La figure (a) reconstitue le trajet P, T, t d'une roche magmatique (le gabbro) dès sa naissance au niveau de la dorsale médio-océanique jusqu'à son enfouissement dans une zone de subduction. La figure (b) propose un modèle spatial explicatif de ce trajet.

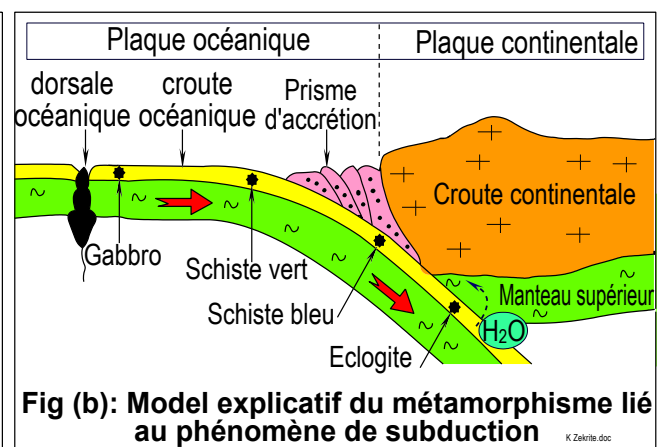
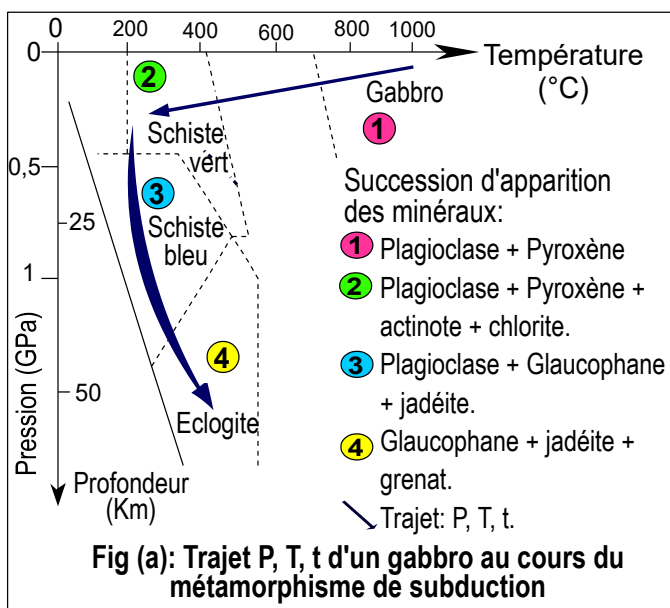


Fig (c): Deux réactions minéralogiques au cours du métamorphisme dynamique des roches de la lithosphère océanique:  
 Plagioclase + Chlorite + Actinote → Glaucophane + eau  
 Plagioclase + Glaucophane → Grenat + Jadéite + eau

**GPa = gigapascal    1GPa = 10<sup>9</sup>Pa**

- Figures (a), (b) et (c), **décrire et expliquer** les transformations subies par le gabbro dans les frontières de subduction.
- Fig (a) : **Déterminer** la série métamorphique caractéristique de la subduction.
- Rappeler** l'effet de l'eau libérée au cours des réactions minéralogiques des roches de la lithosphère océanique sur la péridotite du manteau de la plaque chevauchante. **Que peut-on en déduire ?**

## Réponses :

### ① On peut résumer le devenir du gabbro comme suit :

☞ Le gabbro est une roche magmatique formée à la dorsale médio-océanique vers 1000 °C.

☞ En s'éloignant de la dorsale à cause des mouvements divergents, il se refroidit, devient plus dense et ses minéraux se transforment pour donner un schiste vert.

☞ Lors de la subduction, ce schiste vert s'enfouit sous la lithosphère continentale : la pression augmente fortement tandis que la température change peu, ce qui provoque une nouvelle transformation en schiste bleu puis en éclogite.

### ② La série métamorphique du métamorphisme dynamique de subduction :

Gabbro (ou basalte)	→	Schiste vert (Actinote + chlorite)	→	Schiste bleu (Glaucophane + Jadéite Grenat)	→	Eclogite (Glaucophane + Jadéite + Grenat)
---------------------	---	---------------------------------------	---	--	---	--

### ③ Effet de l'eau libérée au cours des réactions minéralogiques des roches de la lithosphère océanique sur la péridotite du manteau de la plaque chevauchante

Lors de l'enfoncement de la croûte océanique, le métamorphisme dynamique provoque des réactions minéralogiques qui libèrent de l'eau. Cette eau migre vers le manteau, hydrate la péridotite de la plaque chevauchante et favorise sa fusion partielle, conduisant à la formation d'un magma andésitique.

**Déduction** : La subduction entraîne un métamorphisme dynamique de la croûte enfouie, ce dernier entraîne la formation des magmas andésitique.

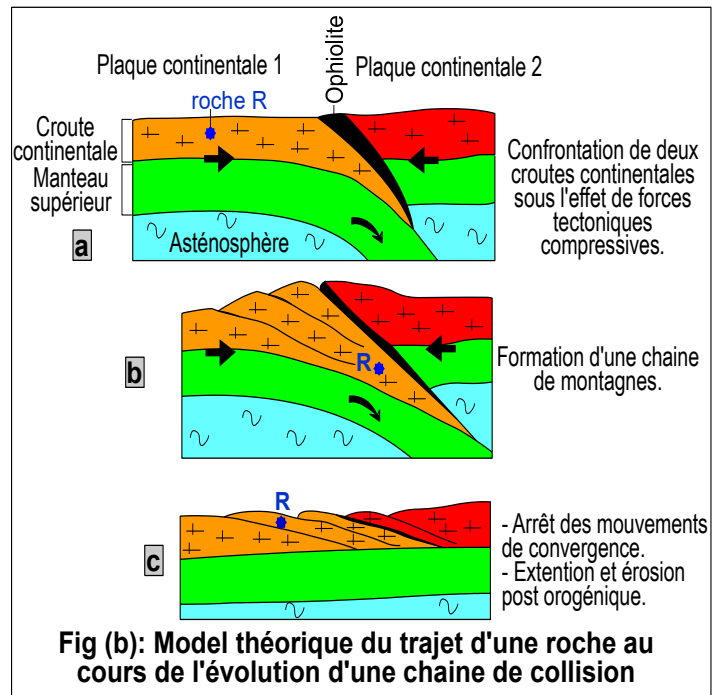
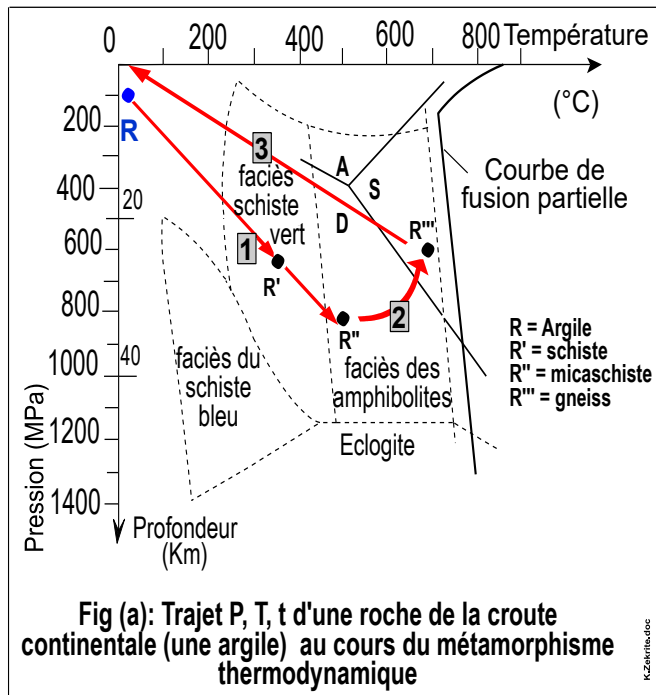
Donc le métamorphisme et le magmatisme sont le résultat de la tectonique des plaques.



### III/ Le métamorphisme thermodynamique des zones de collision

#### Doc 3 : Le trajet d'une roche de la lithosphère continentale au cours de la collision

La figure (a) reconstitue le trajet P, T, t d'une roche de la croûte continentale (une argile par exemple) dans une frontière de collision, La figure (b) propose un model spatial explicatif de ce trajet.



Figures (a) et (b), **décrire** les transformations subis par la roche de la croûte terrestre située dans une frontière de collision.

#### Réponses :

#### Les transformations subis par la roche de la croûte terrestre située dans une frontière de collision.

- Dans les zones de collision continentale, les forces de compression enfouissent des roches de la croûte continentale, ce qui augmente leur pression et leur température.
- Cette évolution provoque un **métamorphisme prograde**, faisant passer les roches du faciès schiste vert au faciès amphibolite (argile → schiste → micaschiste → gneiss).
- Lorsque la compression cesse, la chaîne de montagnes s'étale sous son propre poids, entraînant une extension et, avec l'érosion, un amincissement de la croûte.
- Les roches métamorphiques profondes remontent alors vers la surface, accompagnées d'un **métamorphisme rétrograde** d'intensité décroissante.

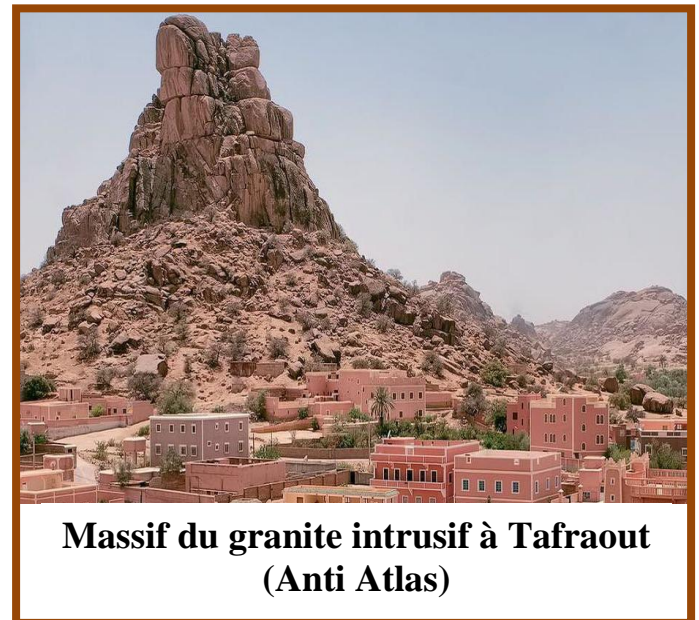
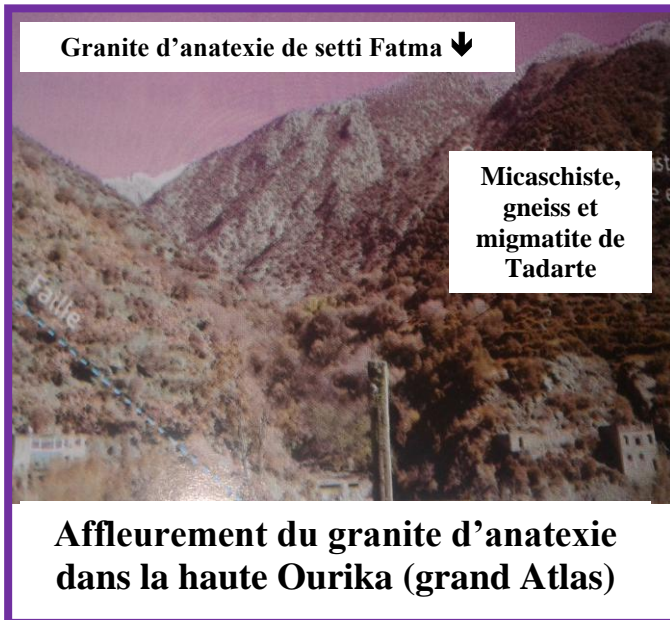
**Remarque :** Malgré le retour des roches métamorphiques en surface, les minéraux originaux ne réapparaissent pas, à cause de la fuite vers la surface des fluides produits au cours de la phase du métamorphisme prograde

## Bilan de l'activité 4

<b>Types de métamorphisme</b>	<b>Métamorphisme dynamique</b>	<b>Métamorphisme thermodynamique (= général = régionale)</b>	<b>Métamorphisme thermique ou de contact</b>
<b>Caractéristiques</b>	Haute pression et basse température	Haute pression et haute température	Basse pression et haute température
<b>Zones caractéristiques par ce type de métamorphisme</b>	Zone de subduction	Zone de collision	Zone de subduction et zone de collision (autours des magmas)
<b>Série métamorphique</b>	Basalte ou gabbro → schistes verts → schistes bleus → éclogites	Argile → schistes → micaschistes → gneiss	Argile → schistes → cornéenne

## Chapitre 3 : La granitisation et sa relation avec le métamorphisme

Les granites représentent la majorité des roches qui constituent la croûte continentale à la surface de la terre. Les observations de terrain montrent souvent un lien géographique entre les roches granitiques et les roches métamorphiques.



- Quelle est la relation qui lie les roches granitiques aux roches métamorphiques ?
- Comment ce lien géographique permet-il de comprendre l'origine du granite ?

### Plan du chapitre :

- Activité 1 : Le granite d'anatexie et le granite intrusif et leur relation respective avec le métamorphisme régional et le métamorphisme de contact
- Activité 2 : La granitisation et sa relation avec la tectonique des plaques

## *Activité 1 : Le granite d'anatexie et le granite intrusif et leur relation respective avec le métamorphisme régional et le métamorphisme de contact*

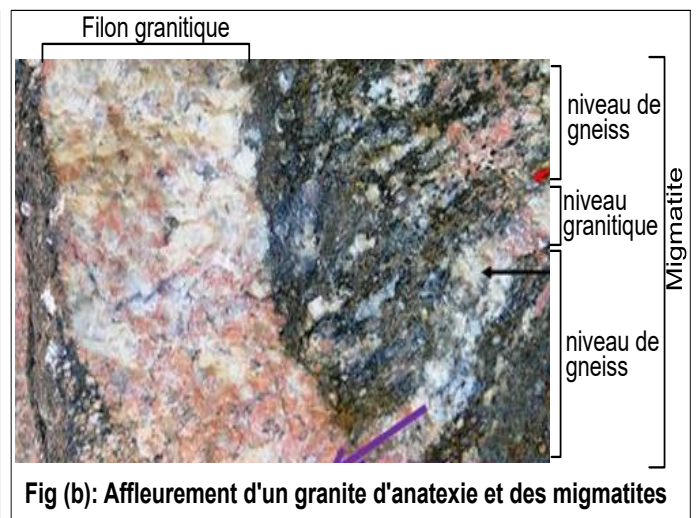
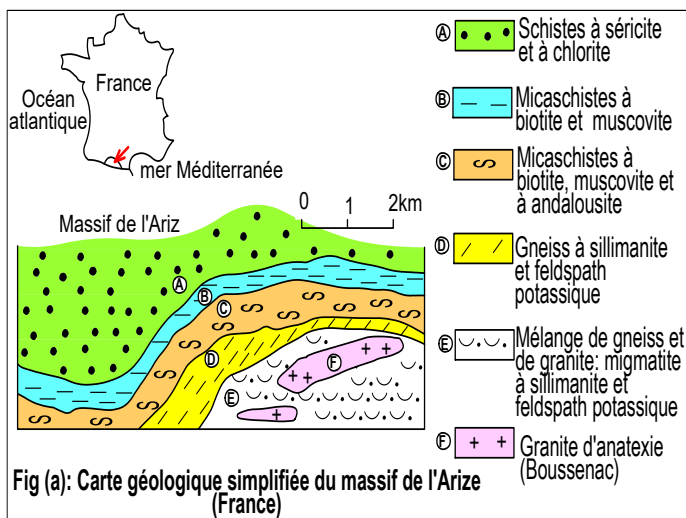
On identifie deux types de granites : le granite d'anatexie et le granite intrusif :

➔ Quelles sont les caractéristiques de chacun des granites d'anatexie et du granite intrusif et quelle est la relation de ces granites avec les roches métamorphiques avoisinantes ?

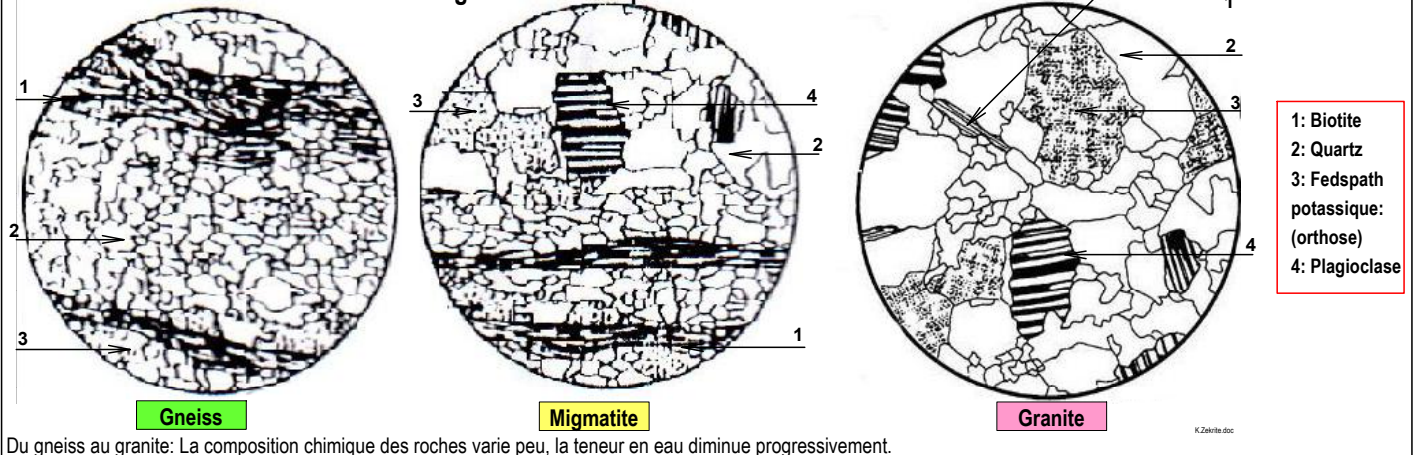
➔ Comment peut-on identifier un granite d'anatexie d'un granite intrusif ?

### **!/ Le granite d'anatexie et sa relation avec le métamorphisme régional :**

**Doc 1 :** Exemple : granite d'anatexie dans le Massif de l'Arize, au Sud de Saint-Girons dans le département de l'Ariège, en France.



### **Document 2: Lames minces du granite anatectique et des roches avoisinantes.**



❶ Doc 1 : **Décrire comment** apparaît le granite d'anatexie au niveau de la carte géologique et de l'affleurement.

❷ Doc 2 : **Identifier**, la structure de ces roches, **quelles informations peut-on tirer** de ces types de structures ?

❸ **Que peut-on déduire** de cette étude quant à l'origine du granite d'anatexie ?

## Réponses :

### ① L'observation de terrain montre que :

- Le granite d'anatexie se présente sous forme de petits massifs étalés sur une grande surface.
- Le granite d'anatexie est proche des roches métamorphiques du métamorphisme régional (schistes, micaschistes et gneiss).
- Le contact entre le granite et les roches métamorphiques avoisinantes est progressif et diffus, le granite est entouré par la migmatite, mélange rocheux constitué de lits clairs de composition granitiques et des lits sombres de composition gneissique.

### ② La structure du granite et des roches encaissantes :

- Le granite a une structure grenue : cristaux de grandes tailles soudées, ce qui indique que le granite est une roche magmatique, issue d'un magma qui a connu un refroidissement lent en profondeur de la croûte continentale.
- Le gneiss a une structure foliée (alternance de lits de minéraux sombres et clairs), c'est une roche métamorphique issue de la transformation à l'état solide d'une roche préexistante sous l'effet poussé d'une haute pression et haute température.
- La migmatite est une roche qui présente une structure mixte : grenue et foliée, donc c'est une formation mélange : magmatique (lits grenus) et métamorphique (lits foliés).

### ③ Déductions et origine du granite d'anatexie :

- Le granite et les roches métamorphiques environnantes ont une origine commune, comme l'indique leur composition chimique similaire ; leurs différences minéralogiques s'expliquent par des conditions de température et de pression différentes.
- Le passage progressif du gneiss à la migmatite, puis au granite d'anatexie, montre que le granite correspond au stade ultime de la transformation du gneiss lors d'un métamorphisme régional.
- La structure grenue du granite prouve que cette transformation a impliqué une fusion partielle à totale du gneiss, tandis que la migmatite conserve la trace d'une fusion incomplète.

## II/ Le granite intrusif et sa relation avec le métamorphisme thermique :

### Doc 2 : Exemple : Granite intrusif de Zaër زعير (près de Rabat)

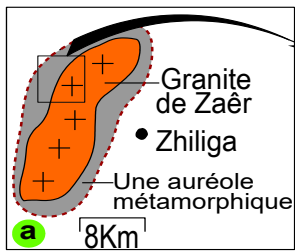
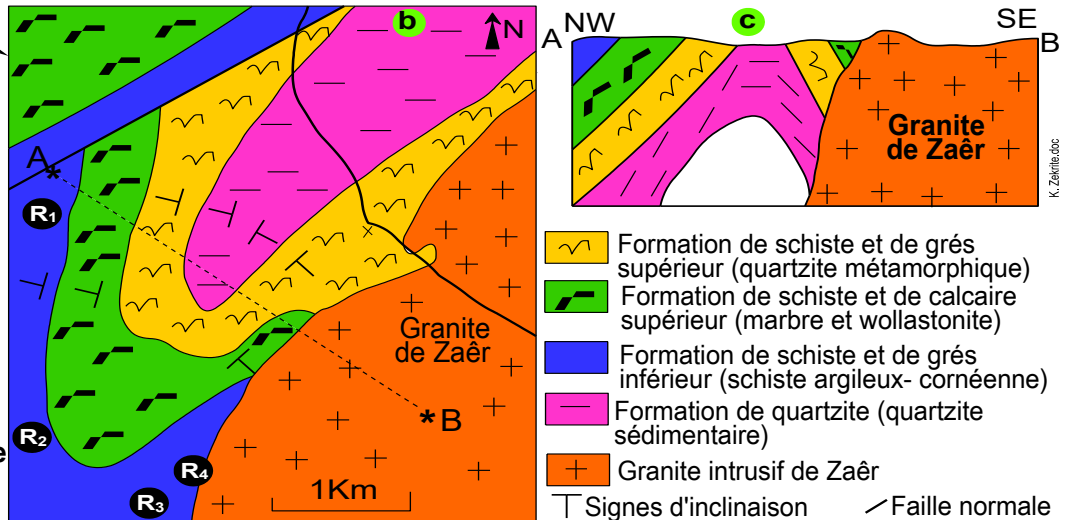


Fig (a): Situation de la région.

Fig (b): Carte géologique simplifiée d'une partie du massif de Zaër.

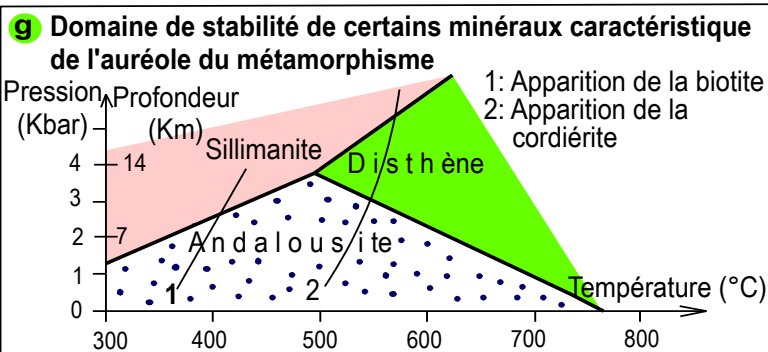
Fig (c): Coupe géologique selon le segment AB.



1 En utilisant les données des fig (a, b et c) **dégager** les principales caractéristiques du granite intrusif.

Dans le but de connaître le type de métamorphisme qui forme la ceinture autour du granite, une étude a été réalisée sur 4 échantillons (R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub> et R<sub>4</sub>) appartenant à la formation du schiste et du grés inférieur (dont l'emplacement est indiqué sur la fig b). Les figures (d, e et f) résument l'étude pétrographique de ces échantillons. La figure (g) représente un diagramme de stabilité de certains minéraux caractéristiques de ces roches.

Roche	Minéraux	Structure
R <sub>1</sub> : Schiste argileux	Séricite, chlorite	Minéraux de petite taille orientés
R <sub>2</sub> : Schiste	Biotite, andalousite	
R <sub>3</sub> : Cornéenne	Andalousite, biotite, Cordiérite	Minéraux de grande taille non orientés
R <sub>4</sub> : Enclaves de cornéenne dans du granite		



2 Fig (d, e, f) : **décrire** les modifications que montre les roches en s'approchant du massif granitique de Zaër.

3 Figure (c) et (d), **hachurer ou colorier** sur le diagramme les zones (conditions P/T) correspondantes aux roches R<sub>2</sub> et R<sub>3</sub>. **Déterminer** les valeurs approximatives de pression et de température auxquelles ont été portées ces roches R<sub>2</sub> et R<sub>3</sub>. **Comment varient** les facteurs de métamorphisme en se dirigeant de la roche R<sub>2</sub> à R<sub>3</sub>.

4 **Montrer** que le métamorphisme autour du granite est de type thermique, **justifier**, pourquoi on qualifie ce métamorphisme par métamorphisme de contact.

5 **Etablir** la relation entre le granite de Zaër et l'auréole de métamorphisme.

## Réponses :

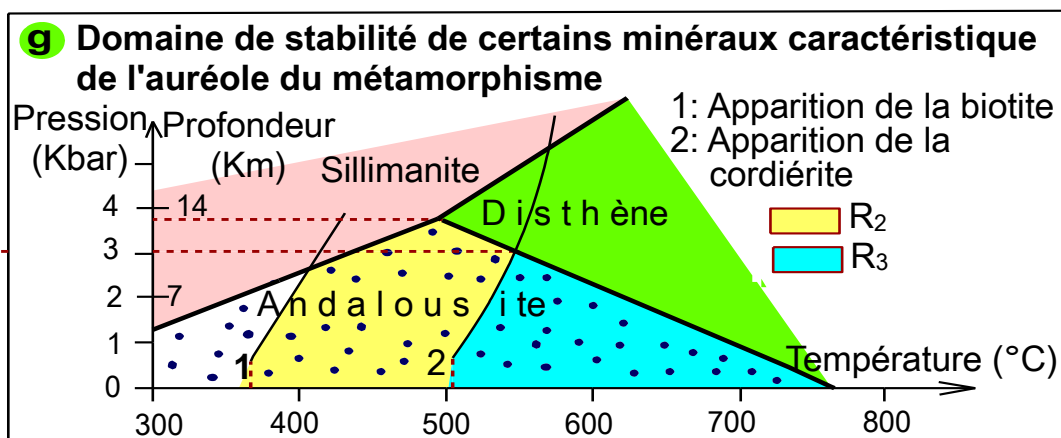
### ❶ Au niveau de la carte et de la coupe géologique, le granite de Zaêr:

- Se présente sous forme d'un seul massif elliptique de faible étendue géographique (moins de 10km<sup>2</sup>).
- Présente des limites nettes, la zone de contact du granite avec les roches métamorphiques adjacentes ne contient pas de faciès de transition (mélange de roche métamorphique et granitiques comme la migmatite).
- Se présente dans une position discordante (وضع تنافر) avec les couches avoisinantes, il n'est pas affecté par la déformation, mais il recoupe les formations plissées (l'anticlinal) comme un intrus qui a digéré et a occupé la place du flan SE de l'anticlinal, ce qui indique que le granite de Zaêr est introduit dans les couches plus récemment aux contraintes qui ont donné le plissement.
- Entouré d'une ceinture étroite ne dépassant pas 2 Km de roches métamorphiques. Cette ceinture est appelée auréole de métamorphisme (هالة التحول).
- Entouré d'une faille normale.

### ❷ En s'approchant du granite intrusif de Zaêr, on note :

- Une modification de la composition minéralogique des roches, il y'a disparition de minéraux indicateurs de faible degré de métamorphisme (comme la séricite et la chlorite) et apparition de minéraux indicateurs d'un degré élevé de métamorphisme (comme l'andalousite et la cordiérite).
- Une augmentation de la taille des minéraux avec une disparition de leur orientation.
- A la limite du massif granitique, on rencontre des enclaves : cornéenne emprisonné dans la matière granitique.

### ❸ L'emplacement des roches R<sub>2</sub> et R<sub>3</sub> sur le graphique pression- température :



- Le schiste R<sub>2</sub> contient de la biotite et l'andalousite, et ne renferme pas la cordiérite, le domaine de stabilité de ces minéraux sera entre la courbe 1 et 2 dans le domaine de stabilité de l'andalousite (voir fig g)

➤ La cornéenne R<sub>3</sub> renferme la biotite, l'andalousite et la cordiérite, le domaine de stabilité de ces minéraux sera à droite de la courbe 2 dans le domaine de stabilité de l'andalousite (voir fig g)

↪ Valeurs de pression et température qu'a subi les roches R<sub>2</sub> et R<sub>3</sub> :

Roche	Pression	Température
R <sub>2</sub> : Schiste à biotite et andalousite	P < 3,8kbar Prof < 12km	360<T<500°C
R <sub>3</sub> : Cornéenne à biotite andalousite et cordiérite	P < 3kbar Prof < 10,5km	500<T<700°C

↪ Evolution des facteurs de métamorphisme en se dirigeant de la roche R<sub>2</sub> à R<sub>3</sub> :

Lorsqu'on passe de la roche R<sub>2</sub> à R<sub>3</sub> (donc en s'approchant du granite), on note une augmentation progressive de la température avec une diminution faible de la pression.

④ Les témoins qui indiquent que le métamorphisme autour du granite est de type thermique et justification de la nomination « métamorphisme de contact ».

↪ L'absence d'orientation des minéraux dans les roches hautement métamorphisées, indique que ces roches ont subi une faible pression

↪ La présence de la cornéenne, faciès caractéristique du métamorphisme de haute température et basse pression.

↪ Les assemblages minéralogiques des roches R<sub>2</sub> et R<sub>3</sub> témoignent que ces roches ont subi une faible pression et une haute température (P<4kbar et T>360°C).

Ces indices prouvent que le métamorphisme de l'auréole est de type thermique (basse pression, haute température), et que le flux de chaleur est issu du massif granitique, c'est la raison pour laquelle on parle de « métamorphisme de contact ».

⑤ La relation entre le granite de Zaêr et l'auréole de métamorphisme.

Lorsque le magma granitique, encore très chaud, est introduit dans des roches froides, il y'a transfert de la chaleur et « cuisson » des roches de bordure créant une ceinture de métamorphisme thermique. L'auréole métamorphique de contact est donc le résultat de l'intrusion granitique.

### III/ Comparaison entre le granite intrusif et le granite d'anatexie :

	Granite d'anatexie	Granite intrusif
<b>L'étendue</b>	Large surface (peu dépasser 25 km <sup>2</sup> )	Très limitée (moins de 10km <sup>2</sup> )
<b>Les limites</b>	floues	Nettes
<b>Roches avoisinantes</b>	Migmatites et roches métamorphiques du métamorphisme régional	Enclaves et auréole de métamorphisme
<b>Relation avec le métamorphisme</b>	Le granite s'inscrit dans le cadre du métamorphisme thermodynamique avoisinant.	Le granite provoque le métamorphisme de contact avoisinant.

## Activité 2 : La granitisation et sa relation avec la tectonique des plaques

Le granite, roche magmatique, résulte du refroidissement d'un magma acide en profondeur, sa liaison avec les roches métamorphiques impose sa relation avec la formation des chaînes de montagnes.

➔ **Comment se fait la genèse du magma granitique et dans quelles circonstances ?**

### Doc 1 : Fusion partielle expérimentale des roches argileuses

Trois roches argileuses A, B et C sont soumises à une pression de 2kbar (c'est la même pression régnant à une profondeur de 7 à 8km) et une température comprise entre 700 et 800°C. A partir d'une température voisine de 700°C, les roches métamorphiques issues des roches argileuses, subissent une fusion partielle, un liquide appelé liquide anatectique apparaît et donne après refroidissement une roche granitique, ce phénomène est appelé anatexie. Le tableau ci-dessous précise la composition minéralogique des roches argileuses d'origine et de la roche granitique résultante du refroidissement du liquide anatectique, ainsi que la température du début de fusion.

Minéraux	Composition des roches argileuses (%)		
	A	B	C
Quartz	15	20	24
Illite	35	70	60
Kaolinite	50	10	10
Divers	0	0	06
T° anatectique	695°C	725°C	715°C

Minéraux	Composition de la roche anatectique (%)
Quartz	42
Feldspath potassique	50
plagioclase	08

### Doc 2 : Conditions d'anatexie dans le globe terrestre

La fusion partielle est facilement atteinte dans les conditions du géotherme de collision.

La courbe d'anatexie indique les conditions au-delà desquelles les roches commencent à fondre en produisant un magma de composition granitique. Les migmatites sont des roches, qui dans un diagramme pression température, se situent entre le solidus et le liquidus.

**La courbe du solidus : sépare le domaine partiellement fondu du domaine solide.**

**La courbe du liquidus : sépare le domaine purement liquide du domaine partiellement fondu (liquide + cristaux).**

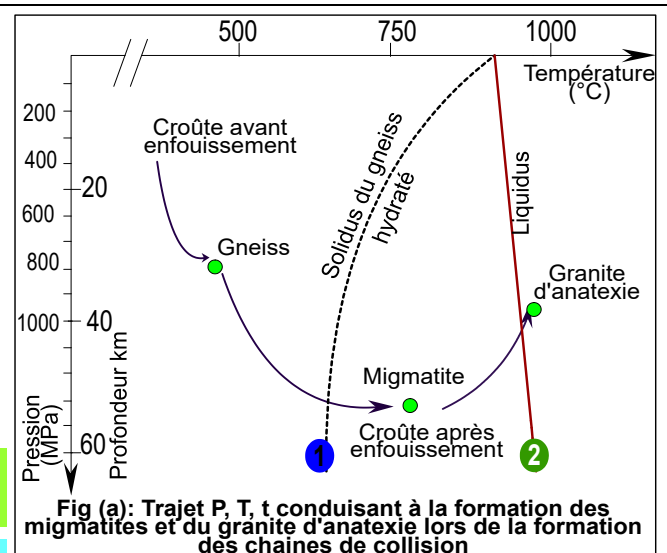


Fig (a): Trajet P, T, t conduisant à la formation des migmatites et du granite d'anatexie lors de la formation des chaînes de collision

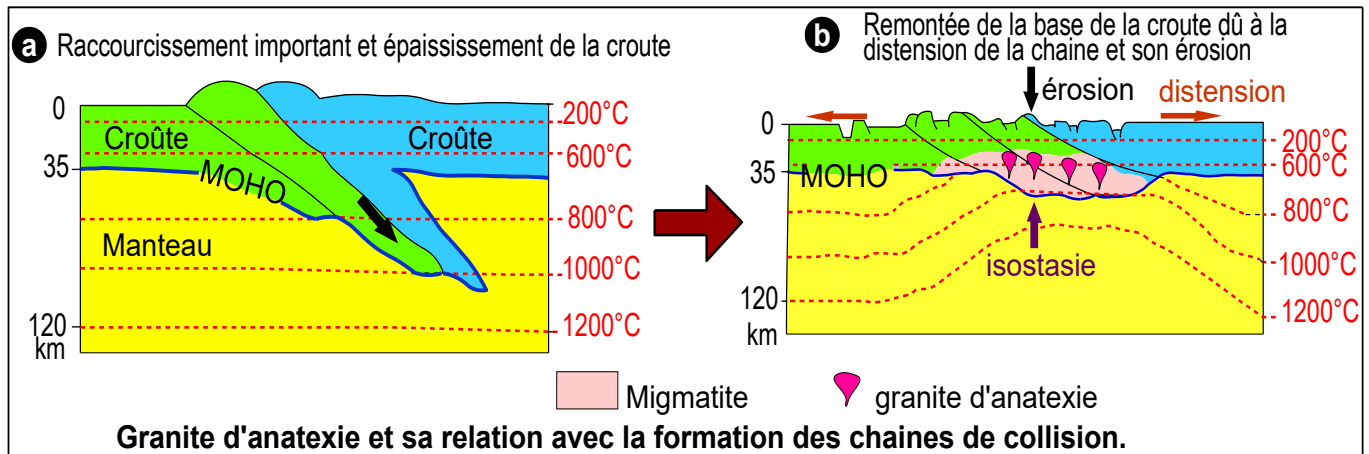
① **Analyser** l'expérience du doc 1. Définir les termes suivants : liquide anatectique, température anatectique et anatexie.

② Doc 2 et 3, **établir la relation** entre les chaînes de collision et le phénomène d'anatexie.

③ **Réaliser** un schéma global explicatif de la formation du granite d'anatexie et le granite intrusif et leur relation avec le métamorphisme avoisinant.

### Doc 3 : Formation des granites dans les chaînes de Collision

Dans les chaînes de collision, les roches enfouies sont soumises à une forte pression et température. A la fin de la formation de la chaîne, les forces compressives s'arrêtent, la distension post-orogénique et l'érosion, font remonter ces roches vers la surface, leur pression diminue, mais leur température reste élevée. Ces conditions conduisent à la fusion partielle ou totale des roches et la formation du magma anatectique. Ce magma peut se refroidir sur place donnant naissance à un granite d'anatexie lié aux migmatites ou migrer près de la surface sans y arriver pour donner le granite intrusif



### Réponses :

① Sous l'effet de la pression et surtout de la température élevée, les roches argileuses fondent partiellement, ce qui engendre un liquide anatectique de composition chimique stable, quelle que soit la roche mère d'origine, et qui donne, après son refroidissement des roches granitiques.

**Liquide anatectique** : liquide primaire issu de la fusion des roches sédimentaires, caractérisé par une composition chimique stable, quelle que soit la roche mère d'origine.

**Température anatectique** : température qui correspond au début de la fusion partielle de roches sédimentaires, elle est d'environ 700°C.

**Anatexie** : Processus de la fusion partielle (origine de la migmatite), ou totale des roches (origine du granite d'anatexie) suite à l'élévation très importante de la température ou à un enfouissement profond.

### ② La relation entre les chaînes de collision et le phénomène d'anatexie :

✿ La collision entre deux masses continentales amène des roches de la croûte continentale à des profondeurs de l'ordre de 50 à 70 km où elles subissent une pression et une température élevées. Ces roches se transforment dans le cadre du métamorphisme régional en roches métamorphiques dont le gneiss constitue le degré le plus poussé.

🌸 Après la formation de la chaîne, la racine crustale formée de gneiss métamorphisé remonte, alors sa pression diminue mais sa température reste élevée, ces nouvelles conditions entraînent un phénomène d'anatexie :

- Si la fusion partielle du gneiss n'est pas importante, les gouttes liquides formées restent emprisonnées dans la masse solide donnant naissance à la migmatite : mélange de lits gneissiques et de lits granitiques.

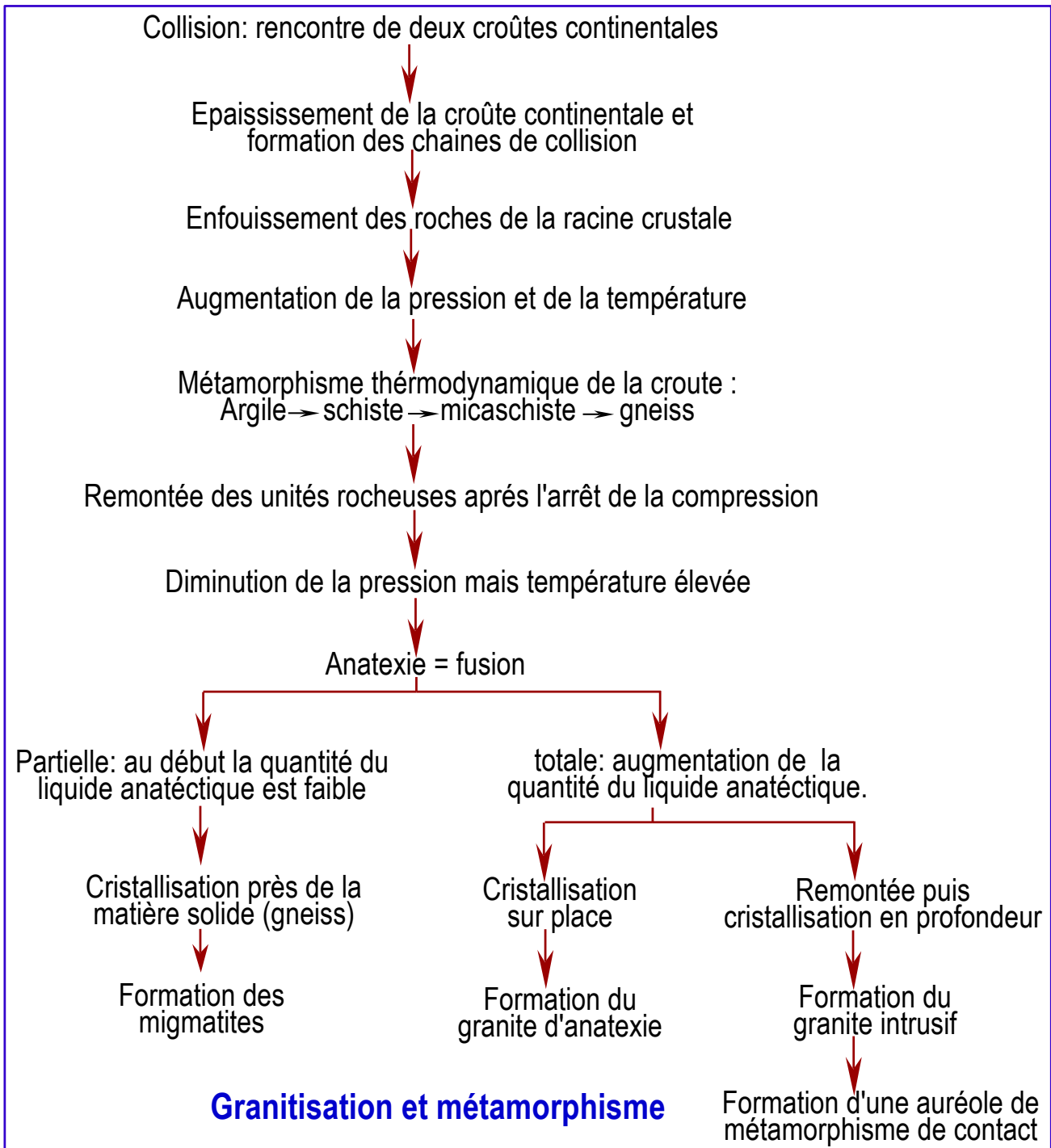
- Si la fusion partielle du gneiss est plus importante, ou totale, les produits de la fusion peuvent se rassembler pour former un magma de composition granitique.

🌸 Le magma granitique formé suite à l'anatexie peut :

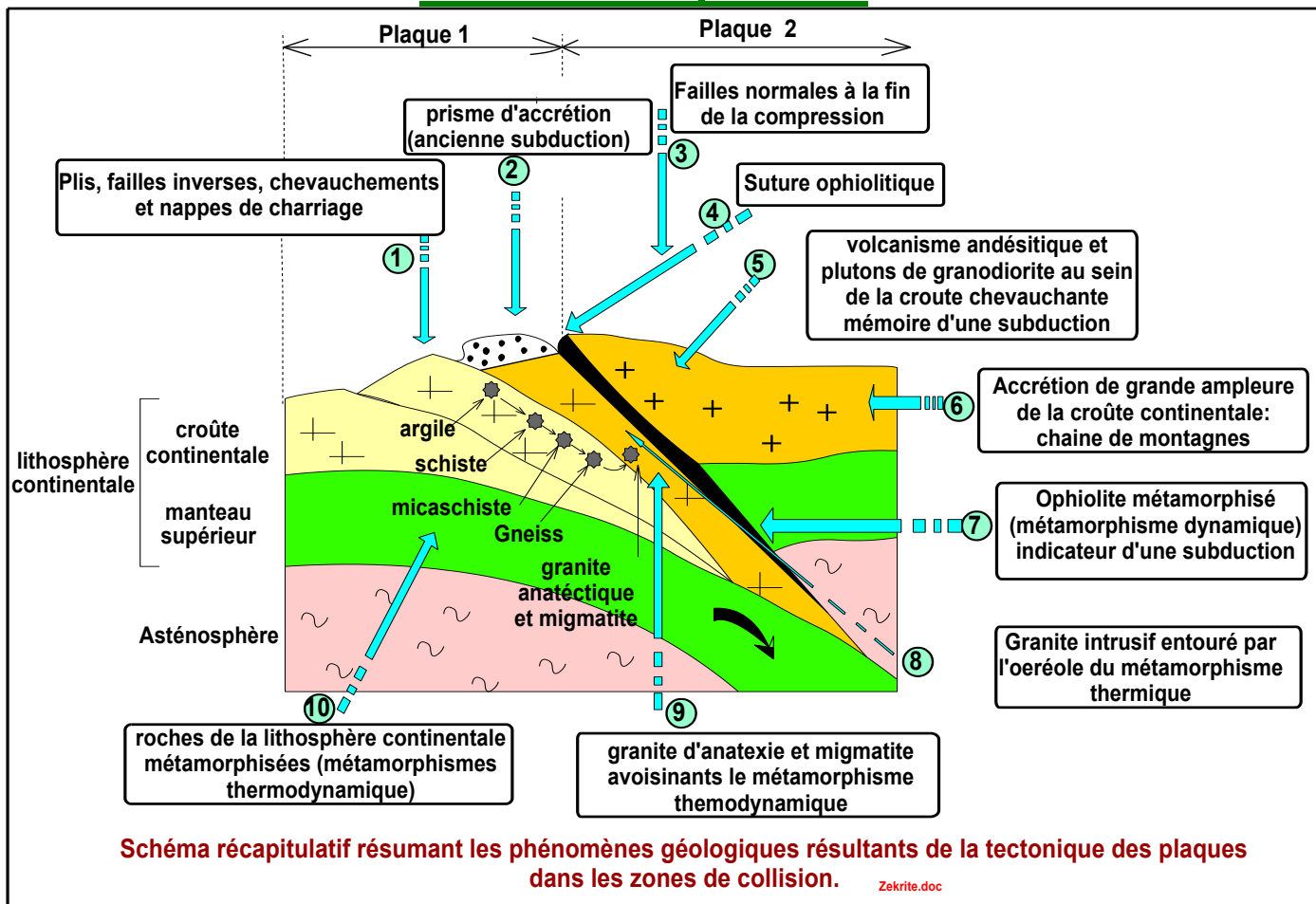
- Se refroidir sur place pour donner un granite d'anatexie avoisinant les migmatites.

- Migrer vers la surface sans y arriver pour donner un granite intrusif. La migration est due à la densité relativement faible du magma à travers les cassures (failles normales) de la croûte terrestre.

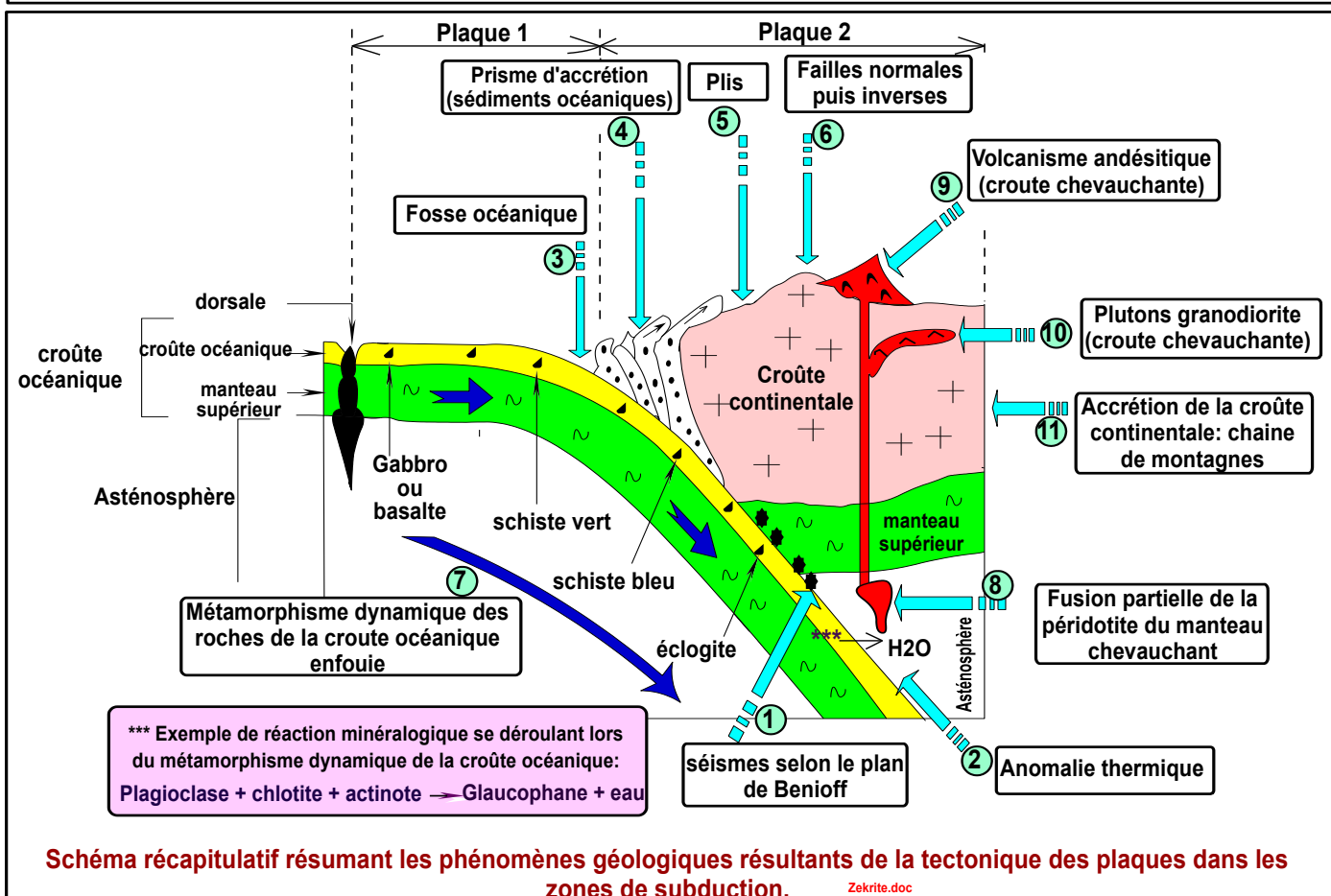
③ Schéma global explicatif de la formation du granite d'anatexie et du granite intrusif et leur relation avec le métamorphisme avoisinant.



# Schéma récapitulatif



**Schéma récapitulatif résumant les phénomènes géologiques résultants de la tectonique des plaques dans les zones de collision.**



**Schéma récapitulatif résumant les phénomènes géologiques résultants de la tectonique des plaques dans les zones de subduction.**

## Quelques définitions, concernant l'unité 4 : phénomènes géologiques accompagnants la formation des chaînes de montagne.

**Andésite** : roche volcanique, grise, poreuse de structure microlitique, constituée de cristaux de différentes tailles : des phénocristaux (cristaux de grande taille) et des microlites (cristaux microscopiques) noyés dans une pâte vitreuse (du verre).

**Chevauchement** : est un déplacement horizontal de l'ordre de quelques mètres d'une unité géologique au-dessus d'une autre suite à des forces compressives inégales.

Orogenèse = formation des chaînes de montagnes.

**Collision** : Affrontement (تجابه) et rencontre entre deux masses continentales, accompagné de déformations tectoniques et de formation de relief important.

**Courants de convection** تيارات الحمل الحراري : des mouvements ascendants et descendants de la matière rocheuses qui ont lieu dans l'asthénosphère, ils sont dus aux différences de température donc aux différences de densité en divers points de la masse.

**Cristallisation** : Processus par lequel, au cours de la montée du magma, se forment des corps solides organisés et de tailles différents (cristaux) en fonction de la vitesse de diminution de la température.

**Croute continentale** : la partie superficielle des continents, elle est composée essentiellement de granite. Son épaisseur varie entre 15 km sous les plaines à plus de 70 km sous les montagnes.

**Croute océanique** constitue le plancher des mers et des océans, elle est de nature basaltique, composée de basalte, de dolérite et gabbro.

**Décrochement ou faille transformante**: correspondent à un coulissage horizontal des deux bloc sans déplacement vertical.

**Déformation** : en géologie, elle décrit les changements de forme, d'orientation ou de position d'un corps (roche, portion de la croûte terrestre) soumis à des contraintes. Lorsque ce corps est une roche, la déformation concerne essentiellement la transformation géométrique qui affecte l'aspect, la texture ou les propriétés de cette roche.

**Domaine de stabilité** : Ensemble de conditions de pression et de température dans lesquelles se forme un minéral et reste stable.

**Expansion des fonds océaniques** : appelée aussi modèle du tapis roulant ou plus couramment expansion océanique, est un modèle scientifique élaboré en 1962 par le géologue américain Harry Hess, et qui explique la genèse de la croûte océanique et sa dynamique. Hess, s'appuyant sur de nouvelles données scientifiques (cartes des fonds océaniques avec mise en évidence des rifts et fosses océaniques, flux de chaleur et cartes de l'âge du plancher océanique), propose que la croûte océanique, créée au niveau des dorsales par des courants ascendants et enfouie au niveau des fosses océaniques par des courants descendants (phénomène de subsidence), est continuellement recyclée alors que la croûte continentale, à cause de sa légèreté, dérive à la surface de la Terre. Ce modèle théorique a été constitué à partir du concept de dérive des continents زحزحة القارات développé au début du XXe siècle par Alfred Wegener dont l'hypothèse argumentée n'avait pas reçu un accueil favorable de la communauté scientifique. De manière erronée, Wegener

fait des blocs continentaux le moteur de la dérive des continents alors qu'ils perdent ce rôle au profit des océans selon Hess. Pour ce dernier, les continents sont incorporés dans la croûte terrestre comme des morceaux de bois dans la banquise (جليد) et sont entraînés passivement au gré des ouvertures et fermetures des océans.

**Faille inverse**: faille le long de laquelle les roches au-dessus du plan de faille se déplacent vers le haut par rapport aux roches sous le plan de faille. Les failles inverses se forment lorsque deux blocs de roches sont poussés l'un vers l'autre (rapprochement) en raison d'une compression. La combinaison de plusieurs failles inverses entraîne un soulèvement appelé **Horst**.

**Faille normale**: faille le long de laquelle les roches au-dessus du plan de faille se déplacent vers le bas par rapport aux roches sous le plan de faille. Les failles normales se forment lorsque deux blocs de roches s'éloignent l'un de l'autre (écartement), en raison d'une distension. La combinaison de plusieurs failles normales entraîne un fossé d'effondrement appelé **Grabben**.

**Faille verticale** : correspondent à un mouvement vertical des deux blocs déplacés sans déplacement horizontal.

**Flux géothermique** (flux de chaleur) : Quantité d'énergie thermique (chaleur) dissipée par unité de surface terrestre et par unité de temps.

**Foliation** : structure de certaines roches métamorphiques, caractérisée par l'existence de lits de minéraux, donnant l'aspect de bandes à la roche, par succession de lits à contenu minéralogique différent.

**Gradient géothermique** : Variation de la température selon la profondeur au sein de la terre. Elle varie selon les régions. Au niveau de la partie superficielle de la croûte, le gradient géothermique est de 30°C/km

**Géotherme** est une courbe de la variation de température en fonction de la profondeur. Elle exprime le gradient de température entre la surface et une certaine profondeur

Ophiolite : un complexe de roches appartenant à une portion de lithosphère océanique ancienne, charriée sur un continent lors d'un phénomène de collision (convergence) de deux plaques lithosphériques par obduction.

**Granodiorite** : roche plutonique, de structure grenue formée de grands cristaux soudés sans pâte vitreuse.

Isotherme : Courbe, ligne imaginaire passant par les points du globe où la température moyenne est la même.

Foyer d'un séisme ou hypocentre : le point où prend naissance la rupture à l'origine du séisme.

**Lithosphère** : couche superficielle rigide de la terre scindée (fragmentée) en plaques et composée par la croûte (continentale ou océanique) et de la partie rigide du manteau supérieur. L'épaisseur de la lithosphère continentale est supérieure à 30km alors que l'épaisseur de la lithosphère océanique varie de 6 à 10km.

**LVZ : Low Velocity Zone** = zone à faibles vitesses : est la zone du manteau supérieur terrestre au travers de laquelle les ondes sismiques se propagent à faible vitesse du fait que la péridotite, roche du manteau, est en état de fusion partielle. Cette zone délimite la lithosphère sus-jacente de l'asthénosphère sous-jacente.

**Minéral indicateur** : minéral stable dans des conditions de pression et de température données correspondant aux conditions de sa formation, ce qui permet la détermination des conditions de genèse de la roche qui la renferme.

**Nappe de charriage** : ensemble de strates rocheuses déplacés sous l'action des forces tectoniques compressives sur des dizaines de kilomètres et chevauchant d'autres formations rocheuses. L'unité déplacée est appelée unité chevauchante = allochtone, l'unité chevauchée est dite autochtone).

**Obduction** : processus par lequel une plaque tectonique océanique chevauche sur une autre plaque continentale.

**Plaque lithosphérique** : est un bloc rigide et stable de la lithosphère terrestre limité par des frontières actives caractérisées par un séisme et un volcanisme important. Les plaques sont en mouvement les unes par rapport aux autres sur l'asthénosphère, c'est la théorie de la tectonique des plaques نظرية تكتونية الصفائح.

**Prisme d'accrétion** موشور التضخم : un ensemble de couches sédimentaires océaniques en écailles accolées de grande altitude formé au niveau de la fosse océanique. Ils résultent d'un rabotage كشط partiel des sédiments déposés sur la croûte océanique par la plaque chevauchante pendant l'enfouissement de la plaque océanique. Ces produits n'existent que dans les zones où l'accumulation est importante.

**Roches magmatiques** : ou roches éruptives, se forment quand un magma se refroidit et se solidifie. Il existe deux familles de roches magmatiques qui se forment dans des circonstances différentes: Quand le magma remonte à la surface de la terre lors d'une éruption volcanique, sa solidification donne naissance à des **roches volcaniques**. La plus répandue est le basalte, une roche sombre, mate, dure, compacte et peu cristallisée. Mais, si le magma n'atteint pas la surface terrestre : il se cristallise en profondeur au sein de poches pouvant mesurer plusieurs dizaines de kilomètres. Au fil des millénaires, la cristallisation des magmas engendre des **roches plutoniques**. La plus répandue est le granite.

**Roches métamorphiques** : qualifient les roches (sédimentaires ou magmatiques) qui ont subi des transformations (structurales et minéralogiques) à l'état solide du fait d'une élévation de la température et/ou de la pression.

**Roches sédimentaires** : roches qui se forment à la surface de la terre (roches exogènes) par accumulation de dépôts. Ils proviennent de la succession de 4 étapes : l'érosion, le transport, la sédimentation et la diagenèse. Ils se déposent le plus souvent en couches ou lits superposés, appelés strates. Ils renferment parfois des fossiles.

**Schistosité** : caractéristique de roches clivables selon des plans parallèles et fragiles.

**Séquence métamorphique** : Ensemble de roches métamorphiques issues d'une même roche d'origine ayant subi des degrés de métamorphisme croissants.

**Silicate d'alumine** : silicate multiforme, dont les unités tétraédriques (à 4 facettes), (SiO<sub>4</sub>) sont liées par des atomes d'aluminium ; (Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>), et donnant, par conséquent, selon les conditions de pression et de température, des minéraux indiquant les conditions thermodynamiques, dominantes au moment de leur formation.

**Solidus** : courbe expérimentale montrant les conditions de pression et de température dans lesquelles un mélange de minéraux ou de roches passe de l'état liquide ou semi - liquide à l'état totalement solide.

**Les plis** : sont des déformations souples et continues des couches rocheuses sous forme d'ondulations en saillie (anticlinal) ou en creux (synclinal). La position du plan axial et le pendage des flans définissent différents types de plis : pli droit, déjeté, déversé ou couché.

**Subduction** : processus par lequel une plaque tectonique océanique (de densité élevée) plonge sous une autre plaque généralement continentale de faible densité, ou sous une autre plaque océanique : Subduction intra-océanique :

**Zones de divergence** : ce sont les dorsales médio-océaniques où naît une nouvelle croûte océanique, elles sont donc à l'origine de l'expansion des fonds océaniques : اتساع قعر المحيطات.

**Zones de convergence** : ce sont les zones de subduction, d'obduction et de collision.

**Zones de décrochement** (friction) : zones de failles transformantes مناطق احتكاك: فوالق محولة.