

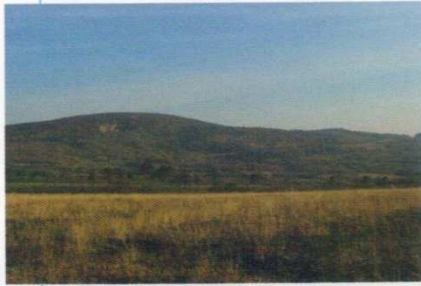
Chapitre IV La disparition des reliefs

Vestiges d'anciennes chaînes de montagnes datant de plusieurs centaines de millions d'années observables sur tous les continents.

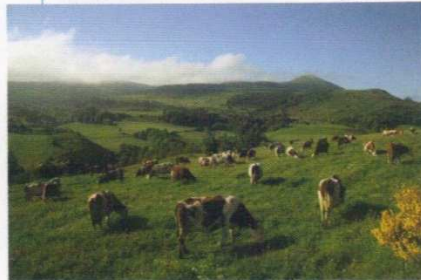
Quels sont les processus responsables de la disparition des reliefs ?

Que deviennent les produits issus du démantèlement des chaînes de montagnes ?

- I - Chaînes de montagnes anciennes et récentes



Paysage du Massif armoricain



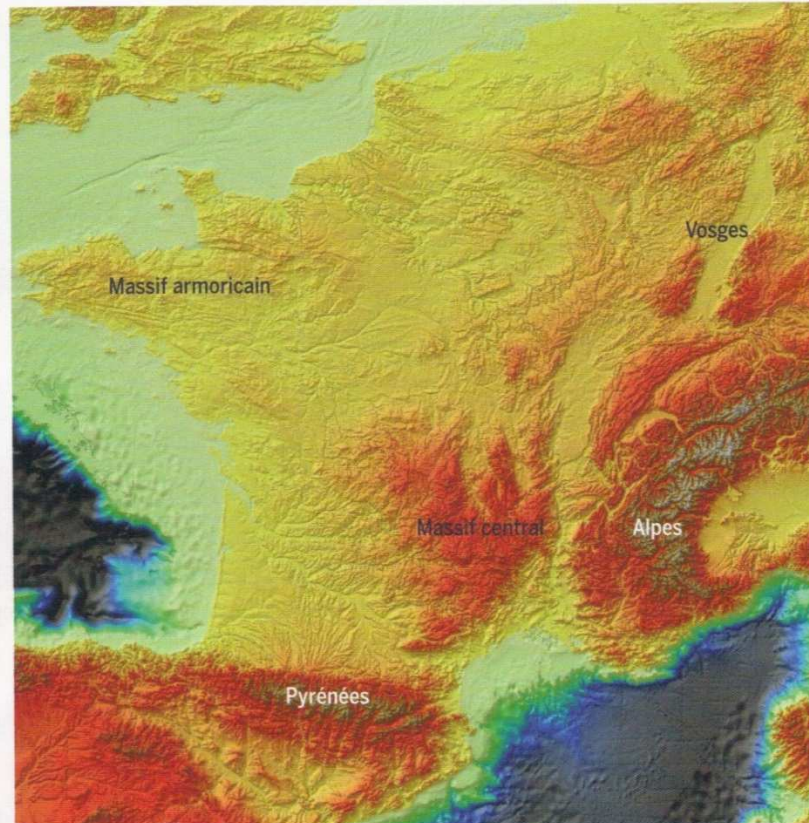
Paysage du Massif central



Paysage des Pyrénées

Les principaux massifs montagneux français se distinguent par une variété de paysage et de relief. Les géologues distinguent ces massifs selon leur ancienneté dans l'échelle des temps géologiques. En effet, le Massif armoricain, le Massif central et le Massif vosgien se sont formés à la fin de l'ère primaire, entre - 360 et - 250 millions d'années.

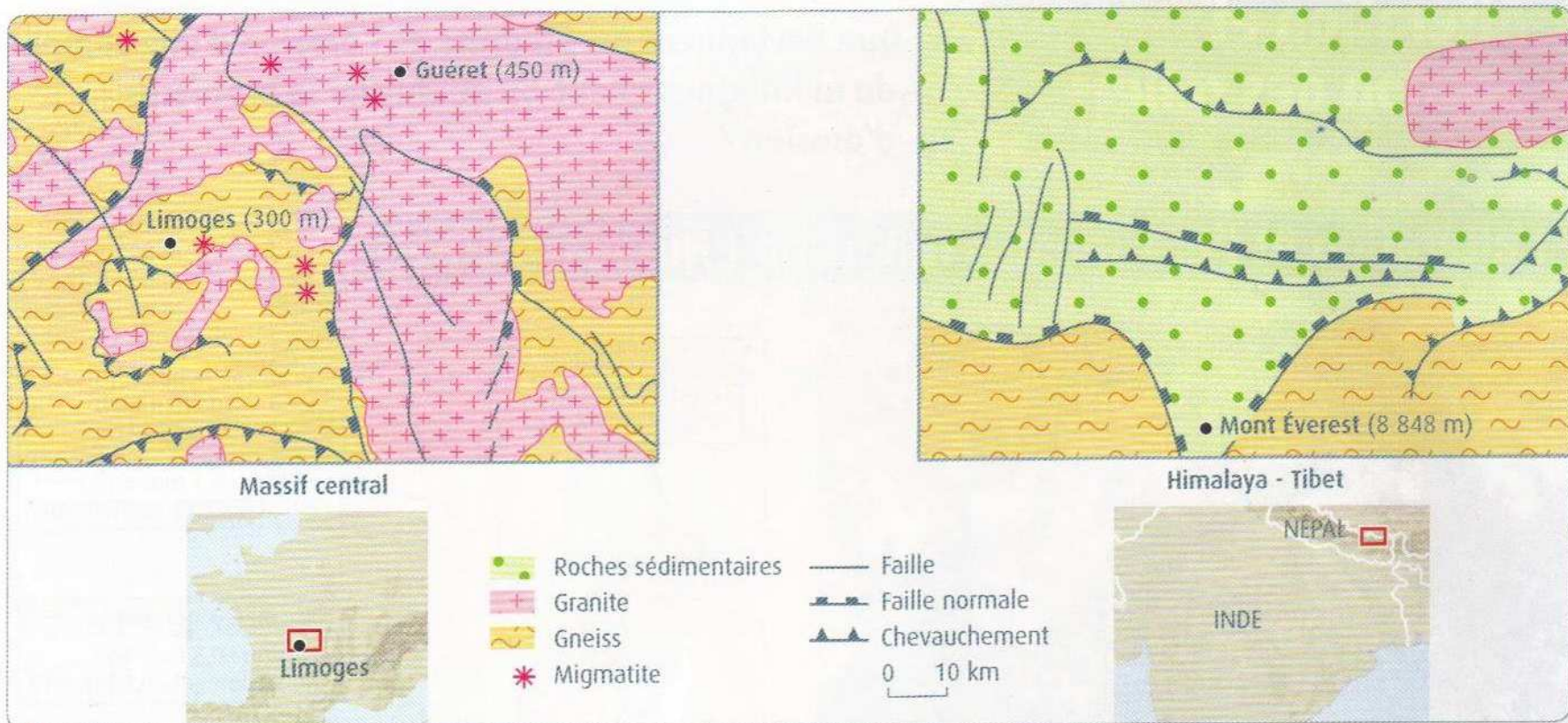
Les Pyrénées et les Alpes sont des chaînes de montagnes dont la formation a débuté plus récemment au cours de l'ère tertiaire (Cénozoïque), il y a 30 à 40 millions d'années.



Modèle numérique du relief de la France : il s'agit d'une représentation de la topographie construite par ordinateur à partir de données d'altitude du terrain (réalisé par J.-D. Champagnac, Swiss Federal Institute of Technology).



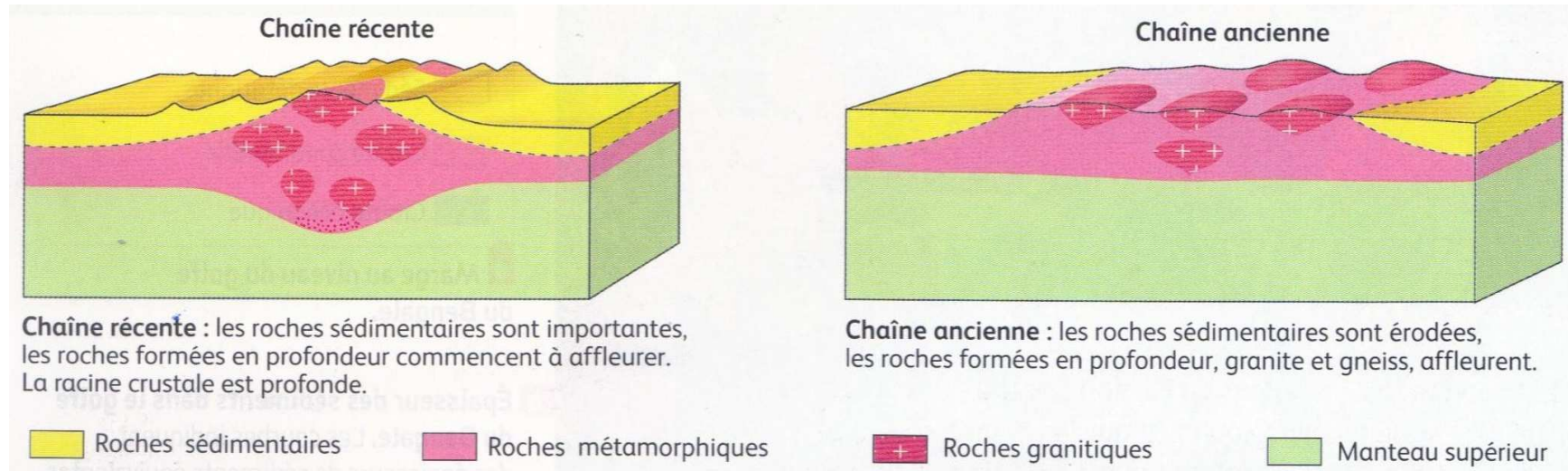
Paysage des Alpes



2 Cartes géologiques simplifiées d'une partie du Massif central et d'une partie de l'Himalaya-Tibet (haut Himalaya sédimentaire). Les deux zones étudiées ont la même superficie.

Les roches formées ou transformées en profondeur (comme les roches granitiques et les roches métamorphiques) affleurent plus généralement dans les chaînes de montagnes anciennes que dans les chaînes de montagnes récentes.

Chaînes de montagnes récentes et anciennes



Chaîne récente : formation débutée il y a quelques dizaines de millions d'années
présence de reliefs élevés
proportion importante de roches sédimentaires à l'affleurement
hauts reliefs compensés en profondeur par une racine crustale

Chaîne ancienne : disparition des reliefs
remontée et disparition de la racine crustale
roches formées et/ou transformées en profondeur portées à l'affleurement

Conclusion

Une chaîne de montagnes dont la formation a débuté il y a quelques dizaines de millions d'années est considérée comme une chaîne récente. Elle se caractérise par la présence de reliefs élevés et par une proportion relativement importante de roches sédimentaires à l'affleurement. Les hauts reliefs sont compensés en profondeur par une racine crustale.

Au cours des temps géologiques, ces reliefs sont voués à disparaître ce qui provoque la remontée et la disparition de la racine crustale. Les roches formées et/ou transformées en profondeur sont portées à l'affleurement.

Bilan

- L'étude comparée de plusieurs chaînes de montagnes (ou **orogènes**) montre que les caractéristiques des ces dernières évoluent au cours des temps géologiques. L'Himalaya-Tibet est un exemple d'orogène récent: sa formation a débuté il y a quelques dizaines de millions d'années. Le Massif central et le Massif armoricain appartiennent à la chaîne hercynienne, qui est un orogène ancien: sa formation a débuté il y a plusieurs centaines de millions d'années.
- Une chaîne de montagnes récente est caractérisée par de hauts reliefs et par une **racine crustale** profonde. À l'affleurement, des roches sédimentaires côtoient des roches formées ou transformées en profondeur.
- Au cours des temps géologiques les hauts reliefs disparaissent, provoquant un **réajustement isostatique** et une remontée de la racine crustale. Des roches formées ou transformées en profondeur peuvent alors se trouver à l'affleurement. Ainsi, certains massifs de chaînes de montagnes anciennes se caractérisent par un relief et une racine crustale réduits et par une forte proportion de **roches plutoniques** et **métamorphiques** à l'affleurement.

| Chaîne de montagnes | Himalaya- Tibet | Massif armoricain, Massif central |
|--|-------------------------------|-----------------------------------|
| Caractéristiques | | |
| Âge du début de la collision | Quelques dizaines de Ma | Quelques centaines de Ma |
| Type de chaîne | Récente | Ancienne |
| Reliefs | Élevés | Absents à modérés |
| Racine crustale | Présente et profonde | Absente ou peu profonde |
| Proportion de roches d'origine profonde à l'affleurement | Modérée dans certains massifs | Forte dans certains massifs |

Comparaison des caractéristiques de quelques chaînes de montagnes.

- II - Les mécanismes à l'origine de la disparition des reliefs

1) Altération des roches et érosion des reliefs

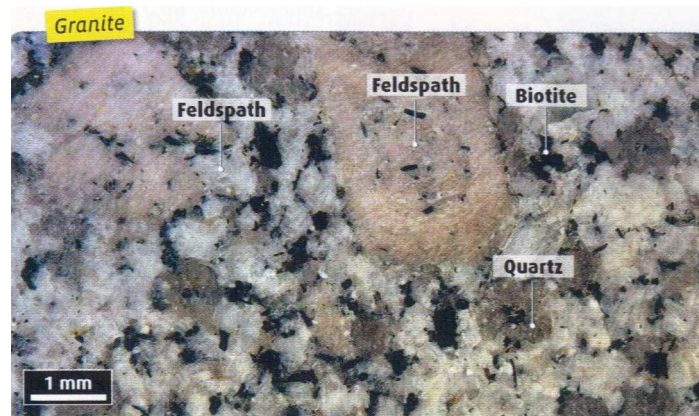
Chaînes de montagnes :

- systèmes dynamiques. Leurs reliefs élevés résultent à la fois :
 - des mécanismes responsables de leur élévation
 - de mécanismes qui tendent à les faire disparaître
- systèmes instables. Dès la naissance des reliefs, des mécanismes tendent à les détruire, jusqu'à ce que la croûte continentale épaissie retrouve son épaisseur normale au bout de quelques dizaines de Ma.

Comment l'altération et l'érosion participent-elles à l'effacement des reliefs ?

Altération : modification chimique et physique d'une roche sous l'action d'un agent naturel de surface comme l'eau.

Erosion : ensemble des phénomènes qui altèrent, enlèvent les débris et particules issus de l'altération et modifient le relief.

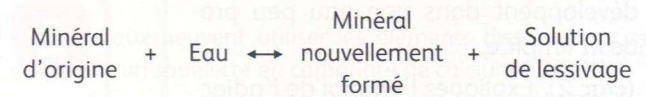




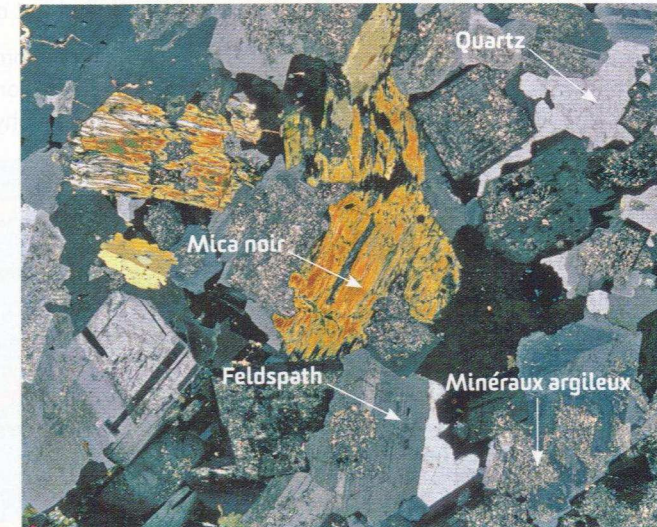
a Affleurement granitique dans le massif du Forez.

Le granite du Forez s'est formé il y a environ 400 Ma au cœur du Massif Central. Au contact de la pluie, du gel, et des êtres vivants, la roche s'altère ; elle se fragmente puis finit par se désagréger en arène granitique : sable très grossier, hétérogène, constitué de fragments de granite, de grains de quartz, de cristaux de feldspaths altérés, d'argiles, et d'oxydes de fer.

La principale réaction chimique d'altération des roches est l'hydrolyse, dont le bilan s'écrit :



b Arène granitique.



c Lame mince de granite altéré (LPA).

muscovite (mica blanc) + H₂O → illite (minéral argileux) + K⁺ (cation soluble)

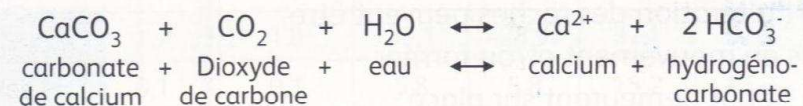
L'altération d'une roche calcaire



a Karst dans le massif de la Chartreuse.

► L'eau de pluie, chargée de gaz carbonique s'écoule dans les failles ou fissures du massif de calcaire. Sous l'effet de l'**altération** chimique de la roche, les fissures s'élargissent et forment des paysages typiques de type karstique.

► Équation bilan des réactions chimiques responsables de la dissolution des carbonates :

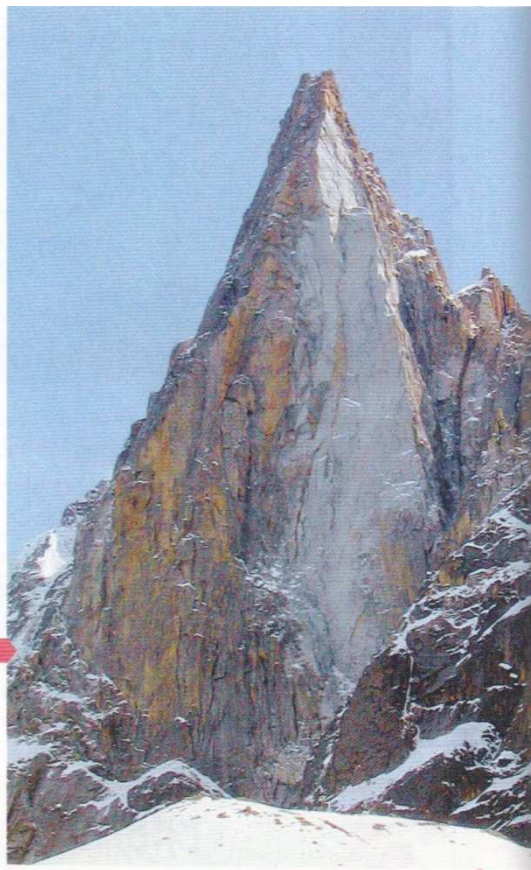


| | Eau de pluie (valeurs moyennes) | Eau circulant dans le calcaire |
|-------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| Ca ²⁺ | 1,4 | 65 |
| Mg ²⁺ | 0,3 | 3,4 |
| K ⁺ | 0,3 | 0,3 |
| Na ⁺ | 1,9 | 1,3 |
| Cl ⁻ | 3,1 | 1,6 |
| HCO ₃ ⁻ | traces | 199 |
| SO ₄ ²⁻ | 2,1 | 9 |

b Tableau comparatif de la composition chimique d'une eau de pluie et d'une eau ayant circulé dans des calcaires (valeurs en mg.L⁻¹).

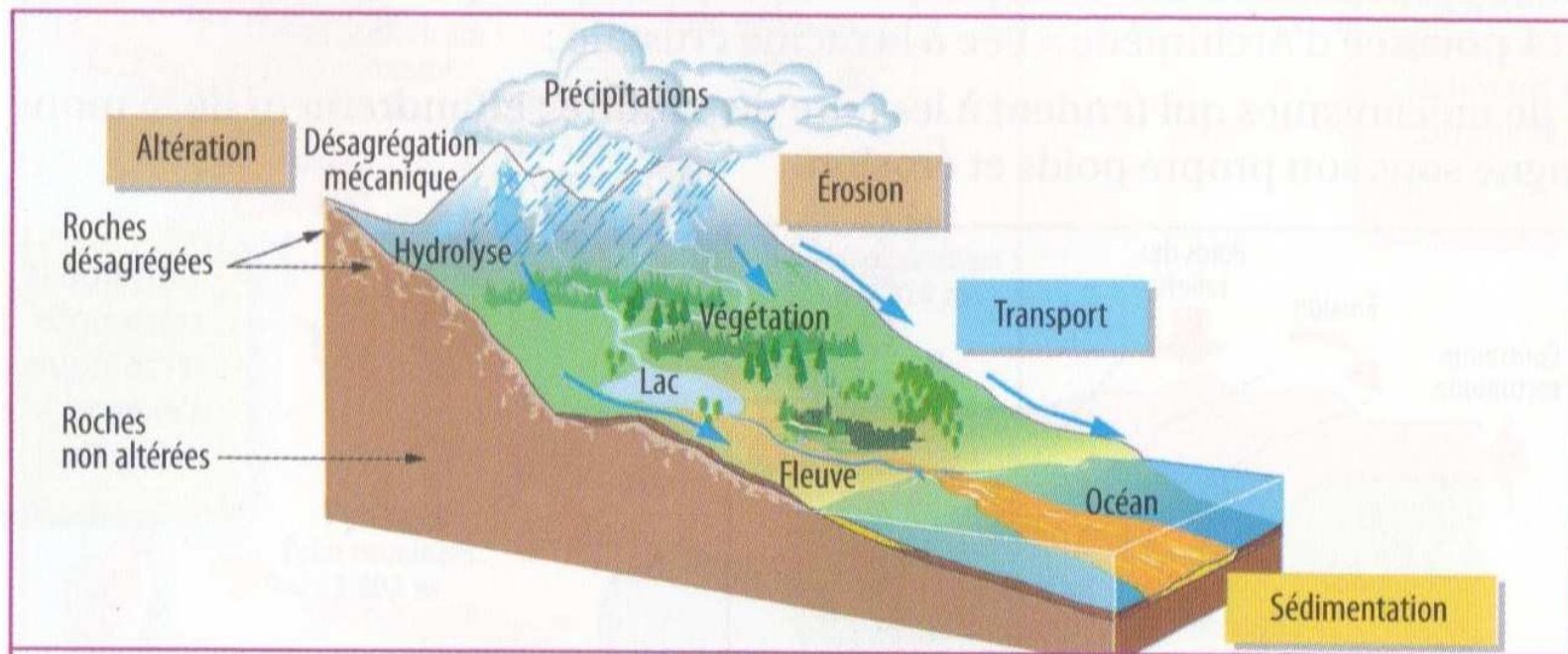
Altération : ensemble des mécanismes physiques et chimiques transformant la roche mère en particules, libérant des ions emportés en solution ou formant de nouveaux minéraux.

► En haute altitude, les reliefs sont soumis à une intense **érosion**. Sous l'action du gel et du dégel dans les **diaclasses**, la roche éclate et forme des éboulis qui sont entraînés par les glaciers et les eaux de ruissellement.



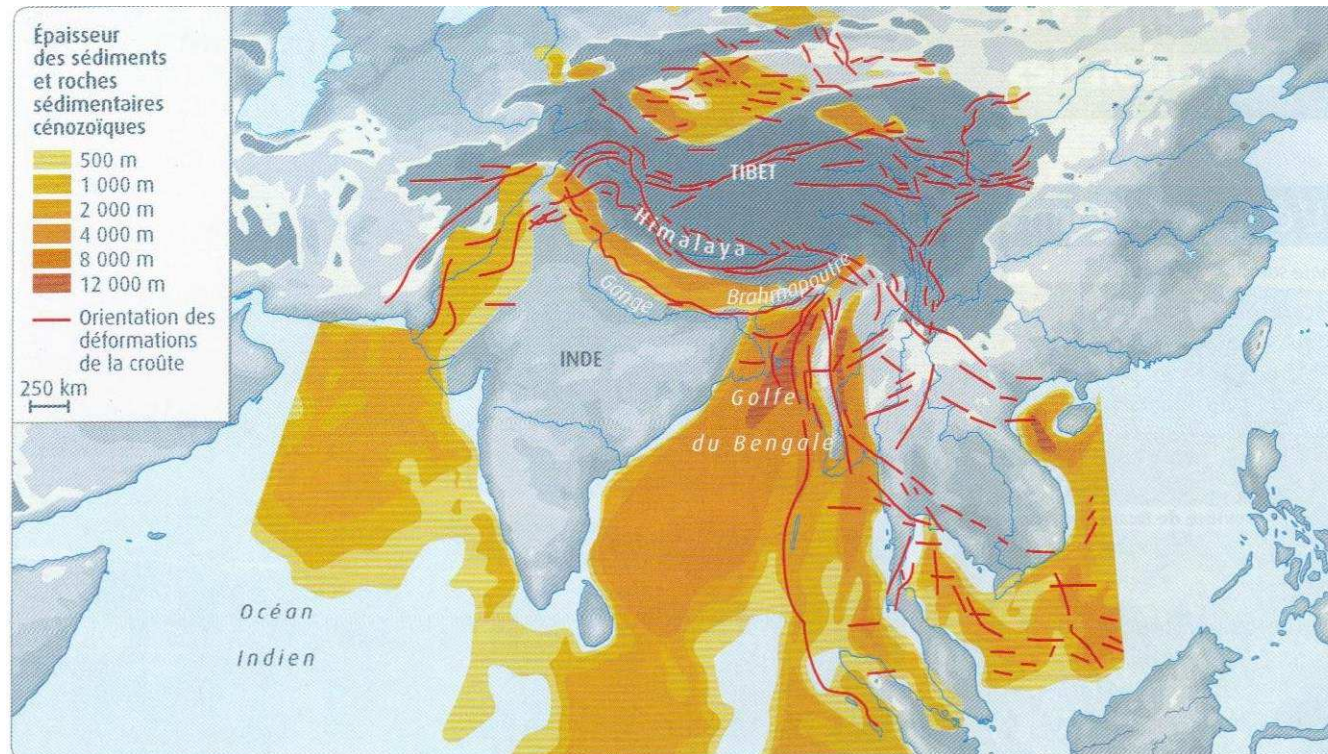
Face ouest des Drus (3 764 m), sommets granitiques du massif du Mont Blanc. Un éboulement a eu lieu en 2005 et a mis à nu la zone en gris clair au centre de l'aiguille.



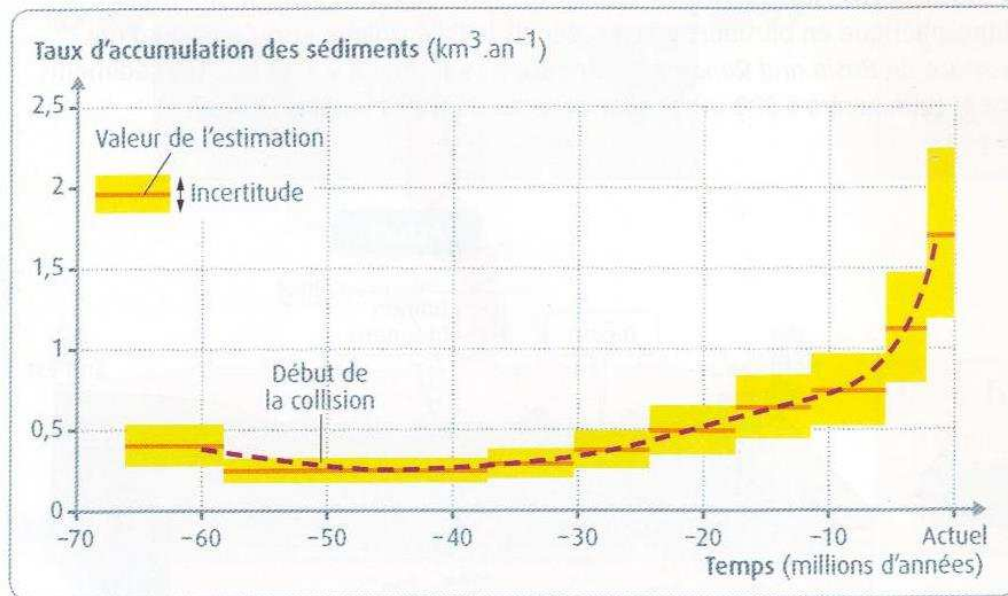


Doc. 1. Altération, érosion et disparition des reliefs

2) Transport des produits de démantèlement des chaînes de montagnes



4 Carte des bassins sédimentaires cénozoïques (de - 65 Ma à l'actuel) associés à l'Himalaya-Tibet. Les sédiments transportés par le réseau hydrographique s'accumulent dans ces bassins. Après consolidation, ils forment des roches sédimentaires détritiques. Les ions transportés par le réseau hydrographique précipitent sous forme de carbonates (essentiellement de calcium et de magnésium), formant d'autres types de roches sédimentaires (calcaires).



5 Évolution du taux d'accumulation des sédiments dans les bassins associés à la chaîne Himalaya-Tibet depuis 65 Ma. La superficie de cette chaîne est estimée à 5 000 000 km^2 .

Conclusion

Au sein d'une chaîne de montagnes, l'eau reste le principal agent d'altération et d'érosion des minéraux, des roches et des massifs montagneux.

Les produits de l'altération et de l'érosion sont des débris de roches de tailles variables, les sédiments, et des ions dissous dans l'eau.

Ces formes solides ou solubles sont transportées par le réseau hydrographique dans les bassins sédimentaires continentaux ou marins plus ou moins éloignés de la chaîne de montagnes dont ils sont issus. Les produits du démantèlement s'y déposent par sédimentation.

Ces processus sédimentaires à l'origine de la disparition des reliefs débutent dès la formation de la chaîne de montagnes, la vitesse d'érosion est de l'ordre de quelques dixièmes de mm/an.

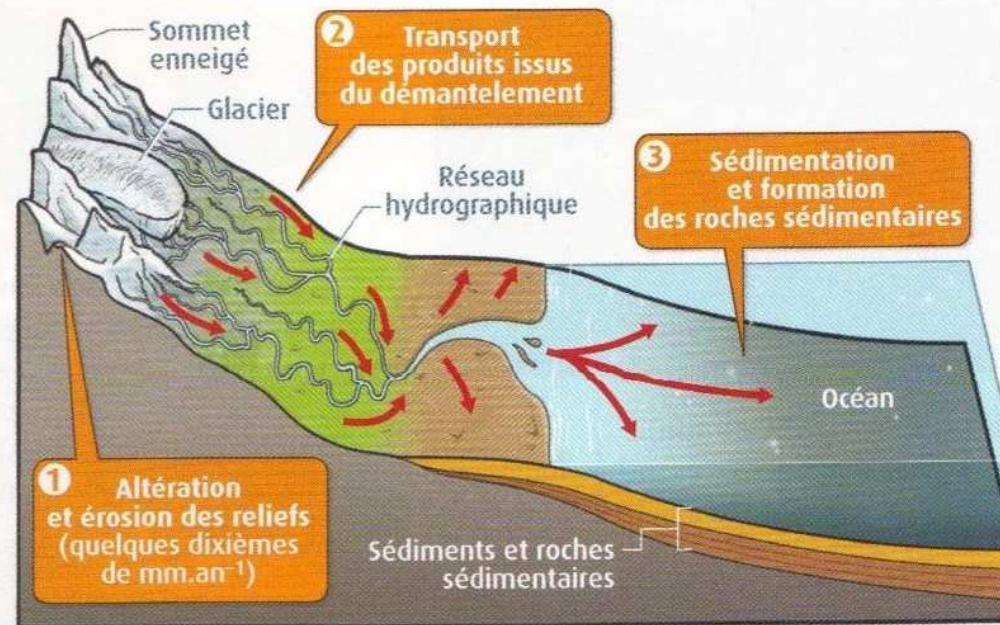
Bilan

- Tout relief à la surface de la Terre est soumis aux phénomènes d'altération et d'érosion qui tendent à le démanteler. Les glaciers et les eaux de ruissellement sont des acteurs efficaces de la disparition des reliefs. Les glaciers réduisent les roches en débris, favorisant ainsi l'altération des minéraux par hydrolyse.

- Les produits issus du démantèlement sont des débris solides (sédiments) et des ions dissous. Ils sont transportés par le réseau

hydrographique dans des bassins sédimentaires continentaux ou océaniques associés à la chaîne de montagnes. Les sédiments s'y déposent et forment, après consolidation, des roches sédimentaires détritiques. Les ions dissous y précipitent et forment d'autres types de roches sédimentaires (calcaires). Ces processus impliqués dans la disparition des reliefs débutent dès la formation de la chaîne.

- La vitesse d'érosion d'une chaîne de montagnes récente est de quelques dixièmes de millimètre par an.



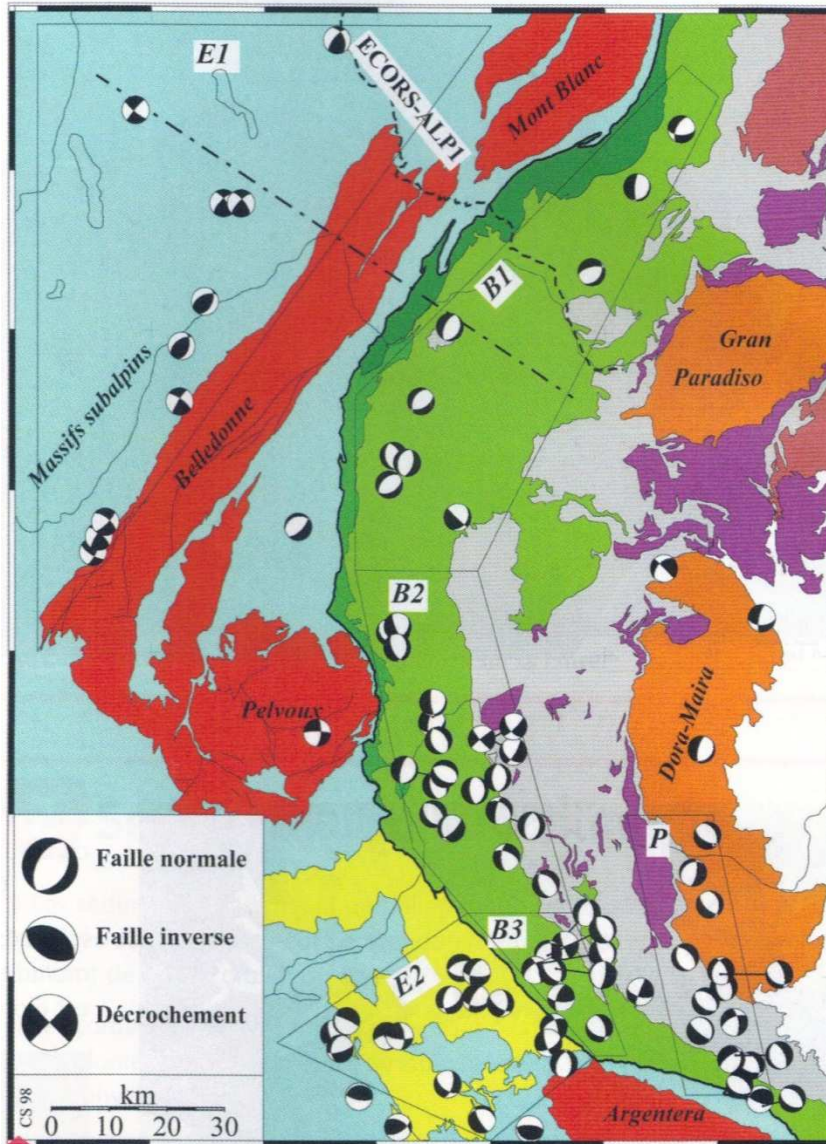
Altération et érosion des reliefs.

3) Phénomènes tectoniques et disparition des reliefs

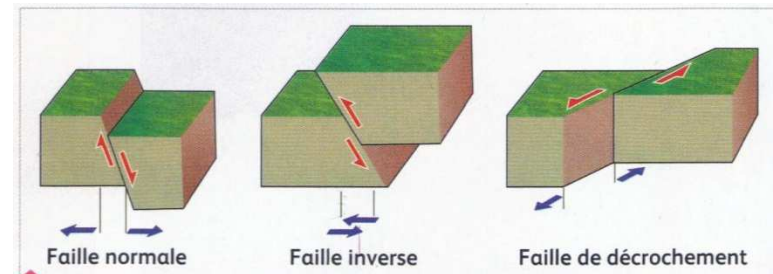
L'érosion des reliefs n'est pas le seul phénomène à l'origine de la disparition des reliefs car, si c'était le cas, il faudrait non pas quelques dizaines de Ma pour que la croûte retrouve une épaisseur normale, mais plusieurs centaines de Ma.

De plus, les volumes de sédiments déposés dans les bassins liés à la destruction des reliefs sont généralement insuffisants pour retrouver le volume initial de la chaîne de montagnes.

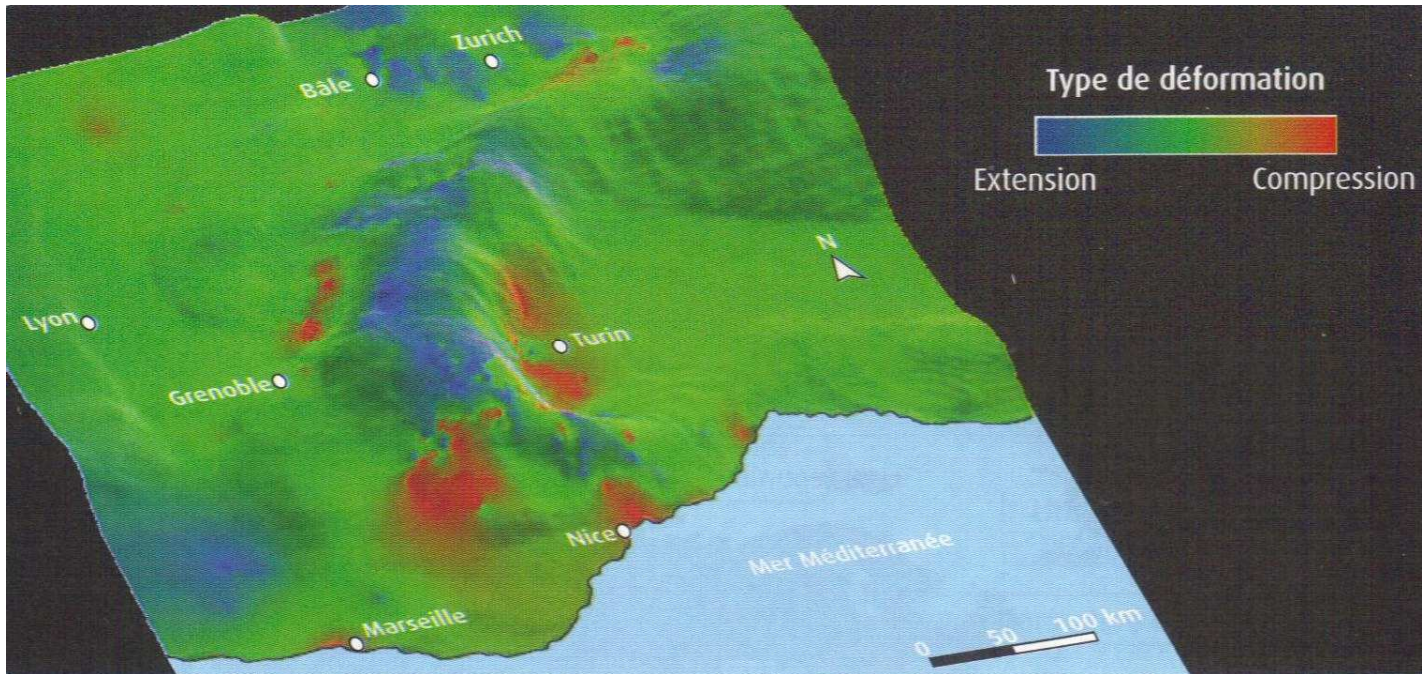
La **sismotectonique** et en particulier l'étude des mécanismes au foyer des séismes permet de distinguer en profondeur les failles normales, des failles inverses et des décrochements.



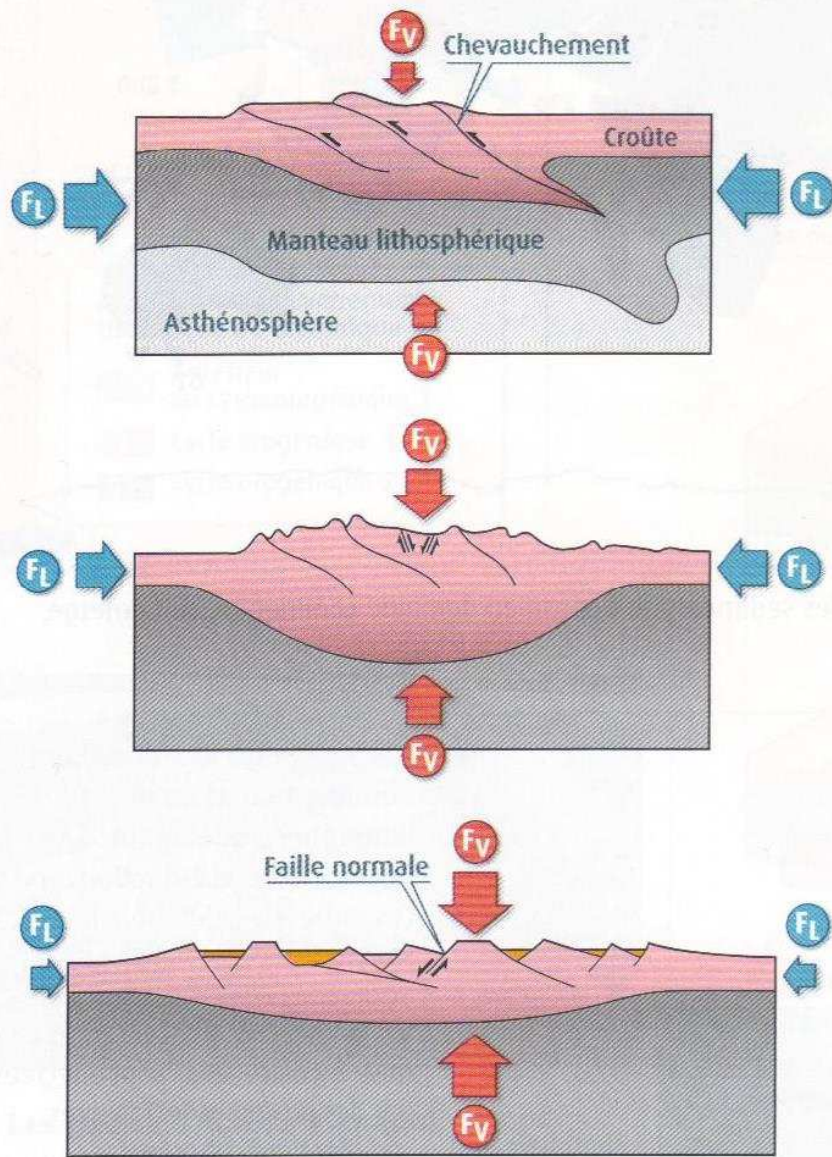
a Mécanismes au foyer calculés dans les Alpes occidentales avec les données Sismalp (Sue, 1998).



b Différents types de failles.

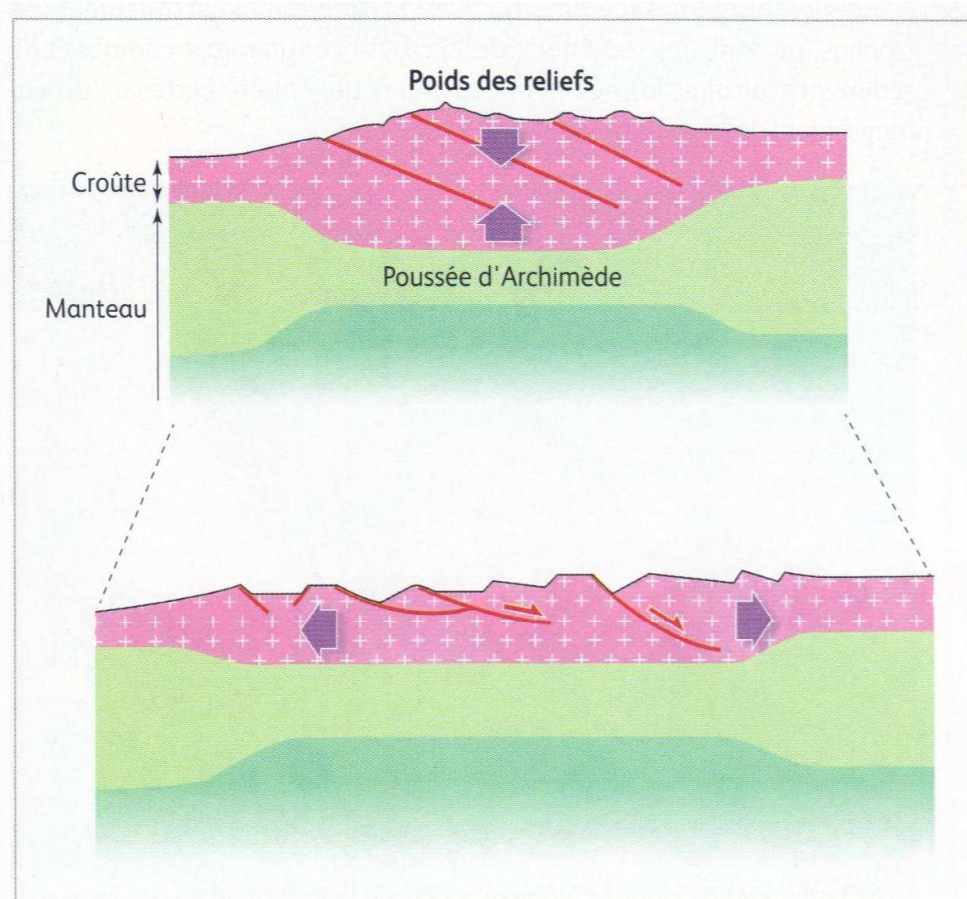


Carte des déformations actuelles dans les Alpes
Les vitesses de déformation sont de l'ordre de 2 mm/an
(+/- 0,5 mm/an)



- 1** $F_L > F_V$
 - ▶ Épaississement crustal
- 2** $F_L = F_V$
 - ▶ L'épaississement crustal est maximal
 - ▶ Le cœur de la chaîne est en extension
- 3** $F_L < F_V$
 - ▶ L'extension se propage en périphérie
 - ▶ La chaîne s'effondre

4 Un modèle d'évolution d'une chaîne de montagnes. Le mouvement de convergence des plaques engendre des forces compressives horizontales sur les roches (forces aux limites de plaques F_L) qui tendent à créer un relief et une racine crustale. Dans le même temps, les roches sont soumises à des forces verticales (forces de volume F_V) liées au poids des reliefs et à la poussée d'Archimède s'exerçant sur la racine. Les forces de volume sont d'autant plus intenses que la croûte est épaisse et elles tendent à l'amincir. L'évolution d'une chaîne de montagnes dépend du rapport entre l'intensité des forces de volume et celle des forces aux limites de plaques.



► Lorsque la croûte est très épaisse, elle se réchauffe à cause des éléments radioactifs qu'elle contient et de la chaleur qu'elle reçoit du manteau sous-jacent. Elle devient déformable en particulier en profondeur et se ramollit.

► Sous l'effet de leur poids insuffisant compensé par la poussée d'Archimède et par une convergence devenue insuffisante, les reliefs s'effondrent et la croûte s'amincit.

► En surface on observe alors des mouvements d'extension.

Effondrement d'une chaîne de montagne et mouvements d'extension.

Conclusion

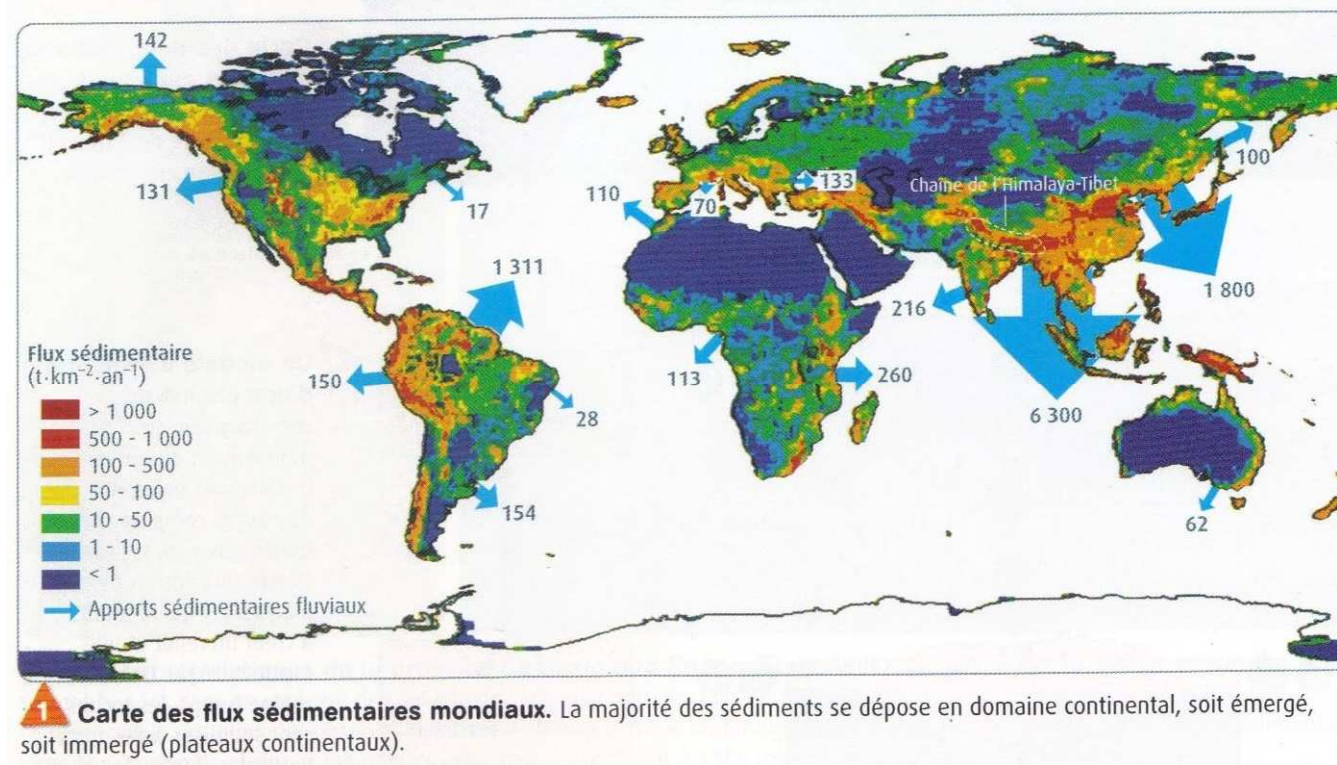
L'effondrement des chaînes de montagnes se manifeste entre autre, sur le terrain, par la présence de bassins sédimentaires formés par le jeu de failles normales. Une partie des sédiments issus du démantèlement des reliefs s'y dépose.

Ces processus tectoniques participant à la disparition des reliefs peuvent débuter pendant la formation des reliefs.

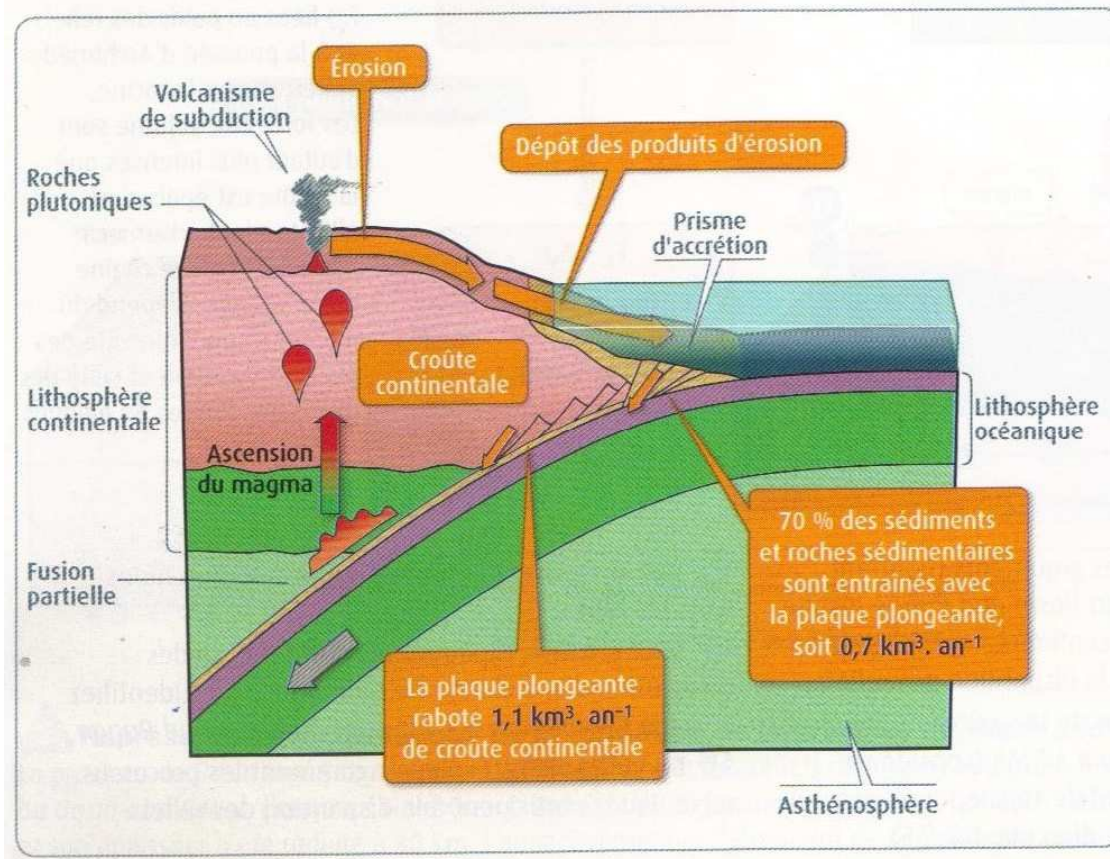
Bilan

- L'évolution d'une chaîne de montagnes est contrôlée par le rapport entre les forces de volume F_V (poids des roches et poussée d'Archimède) et les forces aux limites de plaques F_L (liées à la convergence des plaques).
- Sous l'effet de F_L , la croûte s'épaissit et les reliefs s'érigent. Il en résulte une augmentation de F_V dont l'intensité finit par atteindre celle de F_L . Le cœur de la chaîne commence alors à s'effondrer sous l'effet de F_V comme on l'observe actuellement dans les Alpes.
- Lorsque la convergence diminue ou cesse, l'intensité de F_V devient supérieure à celle de F_L et toute la chaîne de montagnes s'effondre, comme on l'observe actuellement dans la province de *Basin and Range* aux États-Unis. Des processus tectoniques participent donc à la disparition des reliefs.

- III - Recyclage de la croûte continentale



Le recyclage de la lithosphère continentale est essentiellement lié au cycle de l'eau au niveau des chaînes de montagnes.



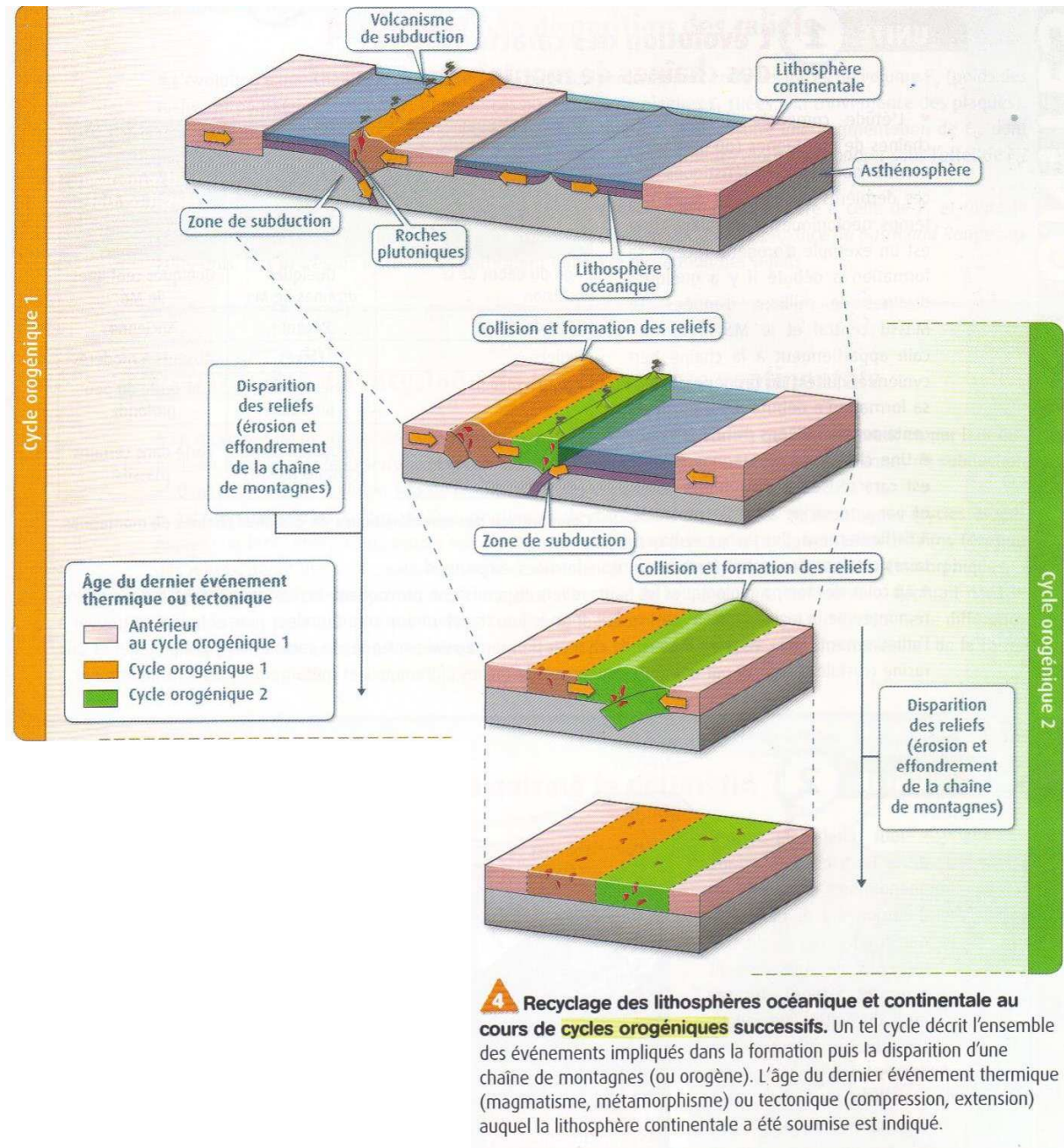
2 Recyclage de la lithosphère continentale et de la lithosphère océanique dans une zone de subduction.

Les roches de la lithosphère sont recyclées si elles disparaissent dans le manteau asthénosphérique ou si, après leur mise en place, elles sont affectées par des processus tectoniques, sédimentaires (érosion/sédimentation), magmatiques ou métamorphiques. Les zones de subduction sont des lieux de disparition de la lithosphère. La quasi-totalité de la lithosphère océanique y disparaît. Les valeurs indiquées ci-contre concernent la disparition de la lithosphère continentale à l'échelle de la planète. Volume total de la lithosphère continentale: $27 \cdot 10^9 \text{ km}^3$.

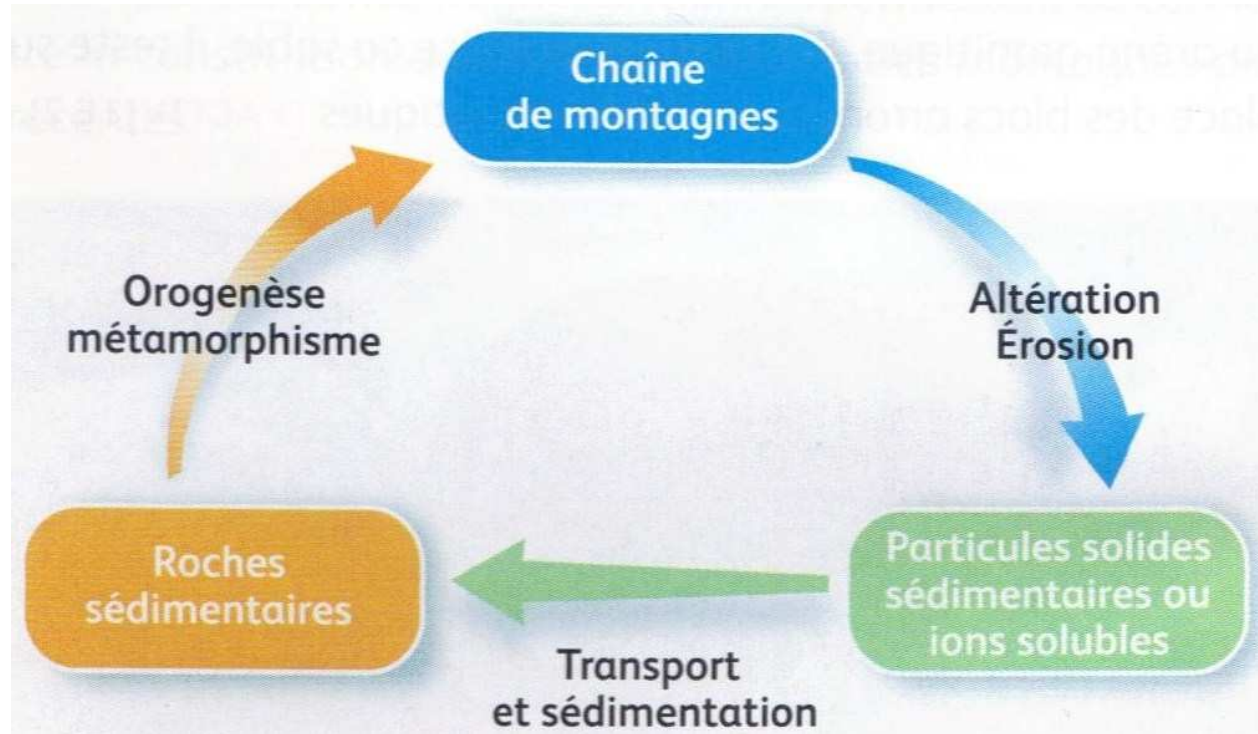
Le démantèlement des reliefs par les agents atmosphériques est à l'origine de sédiments qui peuvent être ensuite, soit de nouveau incorporés dans une chaîne de montagnes, soit (dans une moindre mesure) entraînés dans le plan de subduction.

Recyclage de la lithosphère continentale par des processus magmatiques, métamorphiques et tectoniques au niveau des chaînes de montagnes de subduction et de collision.

Recyclage de la lithosphère océanique : 100% du volume incorporé dans le manteau au niveau des zones de subduction (200 Ma).

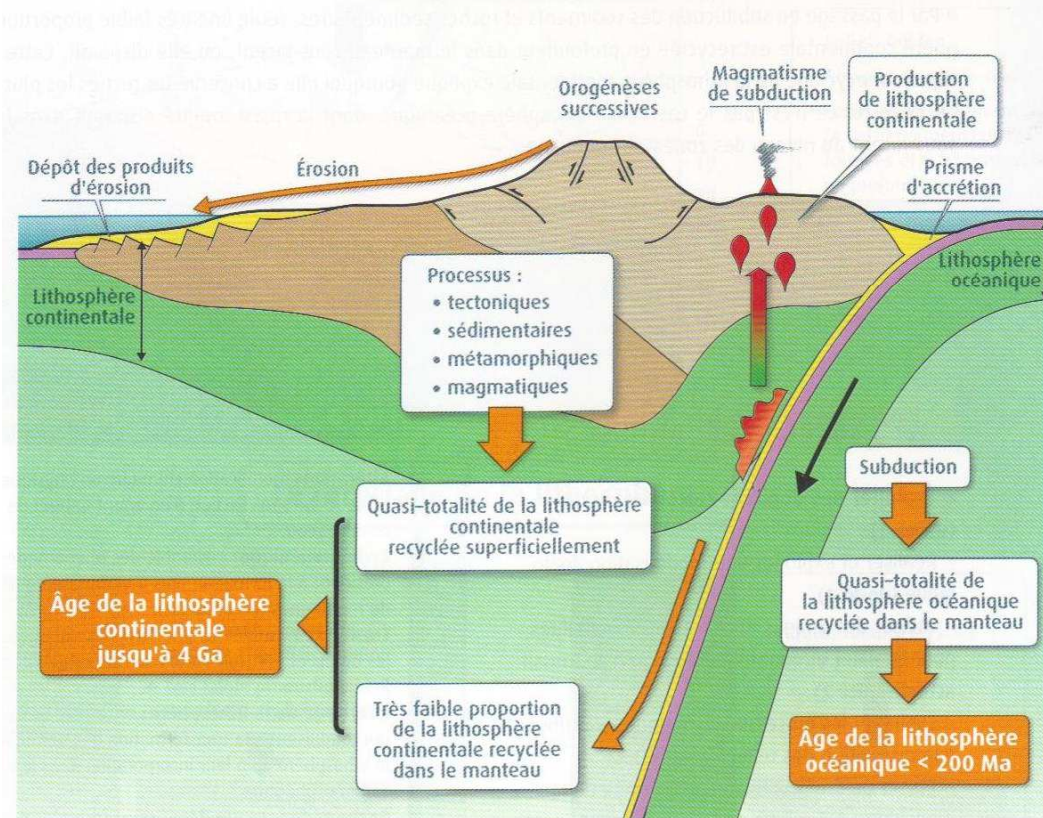


Recyclage de la croûte continentale



Bilan

- Le **recyclage de la lithosphère** se traduit par la transformation des roches qui la constituent ou par leur disparition dans le manteau sous-jacent. La lithosphère continentale est recyclée dans les zones de subduction et dans les zones de collision lors de la formation des chaînes de montagnes.
- Au cours des cycles successifs de formation et de disparition des chaînes de montagnes (**cycles orogéniques**), la lithosphère continentale est transformée par des processus tectoniques, sédimentaires (érosion des reliefs, dépôt des sédiments, formation des roches sédimentaires), magmatiques et métamorphiques.
- Dans les zones de subduction, seule une petite fraction de la lithosphère continentale disparaît dans le manteau sous-jacent, tandis que la quasi-totalité de la lithosphère océanique y est recyclée. Cette différence explique pourquoi seule la lithosphère continentale a pu conserver les roches les plus anciennes de la Terre.



Le recyclage de la lithosphère océanique et de la lithosphère continentale.

Bilan général

L'évolution des chaînes de montagnes

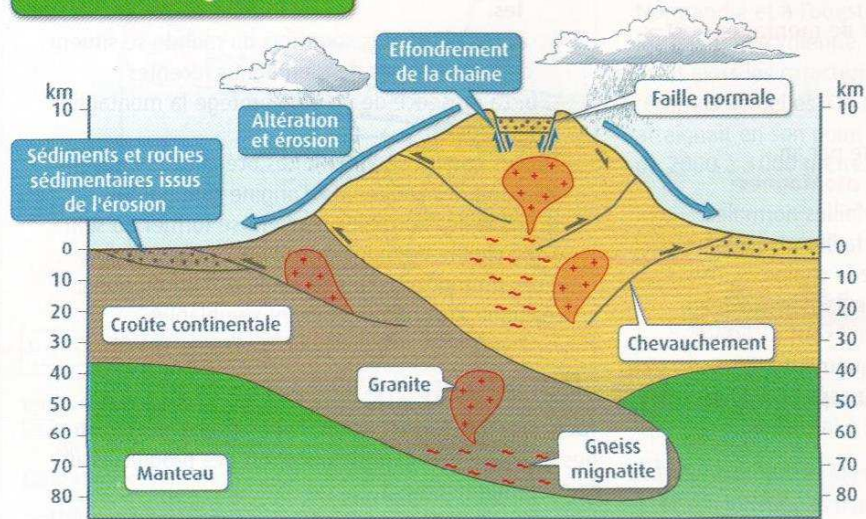
- Les hauts reliefs qui caractérisent les chaînes de montagnes à l'époque de leur formation sont des systèmes instables qui tendent à disparaître.
- L'**altération** et l'**érosion** contribuent au démantèlement des parties superficielles des reliefs. Les produits de ce démantèlement sont transportés principalement par l'eau jusque dans des bassins sédimentaires plus ou moins éloignés des reliefs. Les sédiments s'y déposent puis forment, après consolidation, des **roches sédimentaires détritiques**. Les ions dissous y précipitent, formant d'autres types de roches sédimentaires. Ces processus se produisent dès la naissance d'une chaîne de montagnes.
- Lorsque les forces liées au poids des reliefs et à la poussée d'Archimède contrebalancent celles liées à la convergence des plaques lithosphériques, l'épaississement maximal de la croûte est atteint et le cœur de la chaîne de montagnes commence à s'effondrer. L'effondrement se propage ensuite au reste de la chaîne.
- Ces processus sédimentaires et tectoniques entraînent un rééquilibrage isostatique associé à une remontée de la racine crustale située à l'aplomb de la chaîne de montagnes. L'ensemble de ces phénomènes exhume des roches formées et/ou transformées en profondeur, qui affleurent ainsi en grande proportion dans certaines chaînes anciennes.

Le recyclage de la lithosphère continentale

- Le **recyclage** de la lithosphère continentale a lieu pour l'essentiel au sein même de cette lithosphère où, lors des **cycles orogéniques** successifs, les roches sont transformées par des processus sédimentaires, tectoniques, métamorphiques et magmatiques.
- Par le passage en subduction des sédiments et roches sédimentaires, seule une très faible proportion de lithosphère continentale est recyclée en profondeur dans le manteau sous-jacent, où elle disparaît. Cette caractéristique du recyclage de la lithosphère continentale explique pourquoi elle a conservé les roches les plus anciennes de la Terre. Ce n'est pas le cas de la lithosphère océanique, dont la quasi-totalité disparaît dans le manteau sous-jacent au niveau des zones de subduction.

La disparition des reliefs

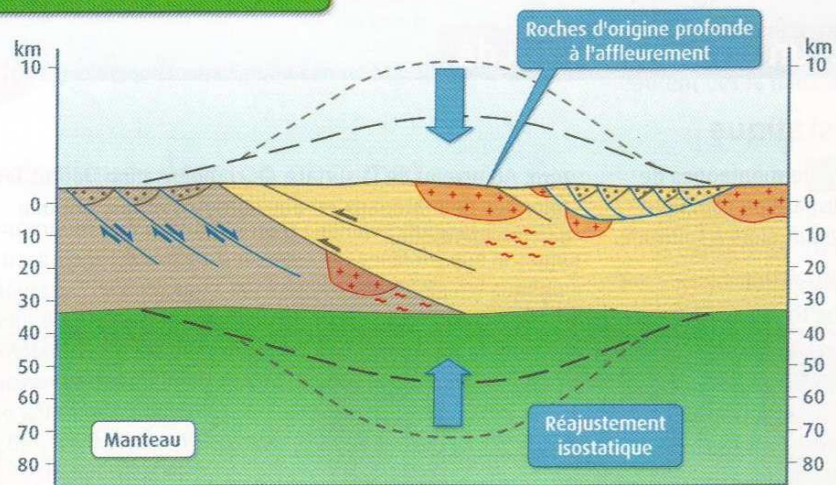
Chaîne de montagnes récente



- Reliefs élevés
- Racine crustale profonde

- Altération et érosion
- Effondrement de la chaîne
- Réajustement isostatique

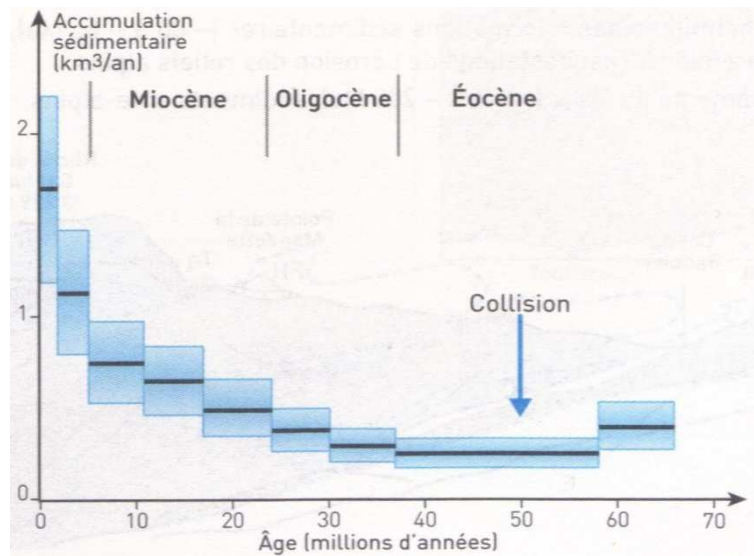
Chaîne de montagnes ancienne



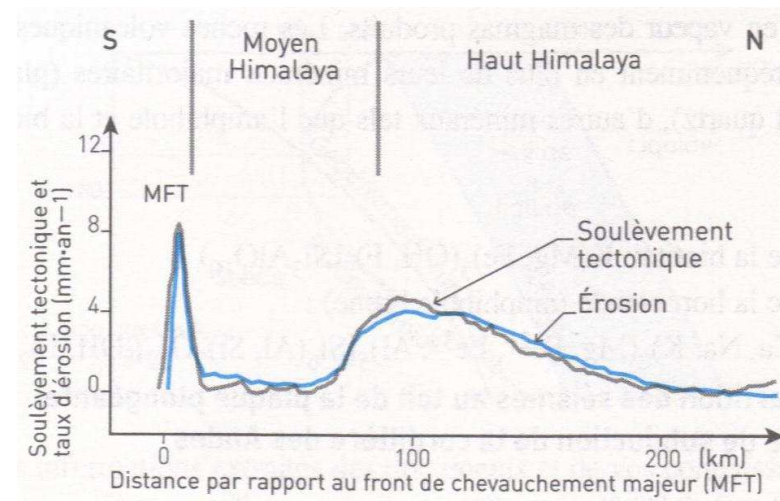
- Reliefs faibles
- Absence de racine crustale
- Forte proportion en surface (à l'affleurement) de roches formées et/ou transformées en profondeur

Le recyclage de la lithosphère





Doc 1 : taux d'accumulation des sédiments himalayens dans les bassins tectoniques depuis 70 Ma



Doc 2 : couplage entre tectonique et érosion pour la chaîne himalayenne (estimé par une modélisation numérique validée par des mesures de terrain)