



Paysage des Pyrénées



Paysage du Massif central

# Thème 1B TP 6: le recyclage de la croûte continentale

On cherche à comprendre les mécanismes de recyclage de la croûte continentale.



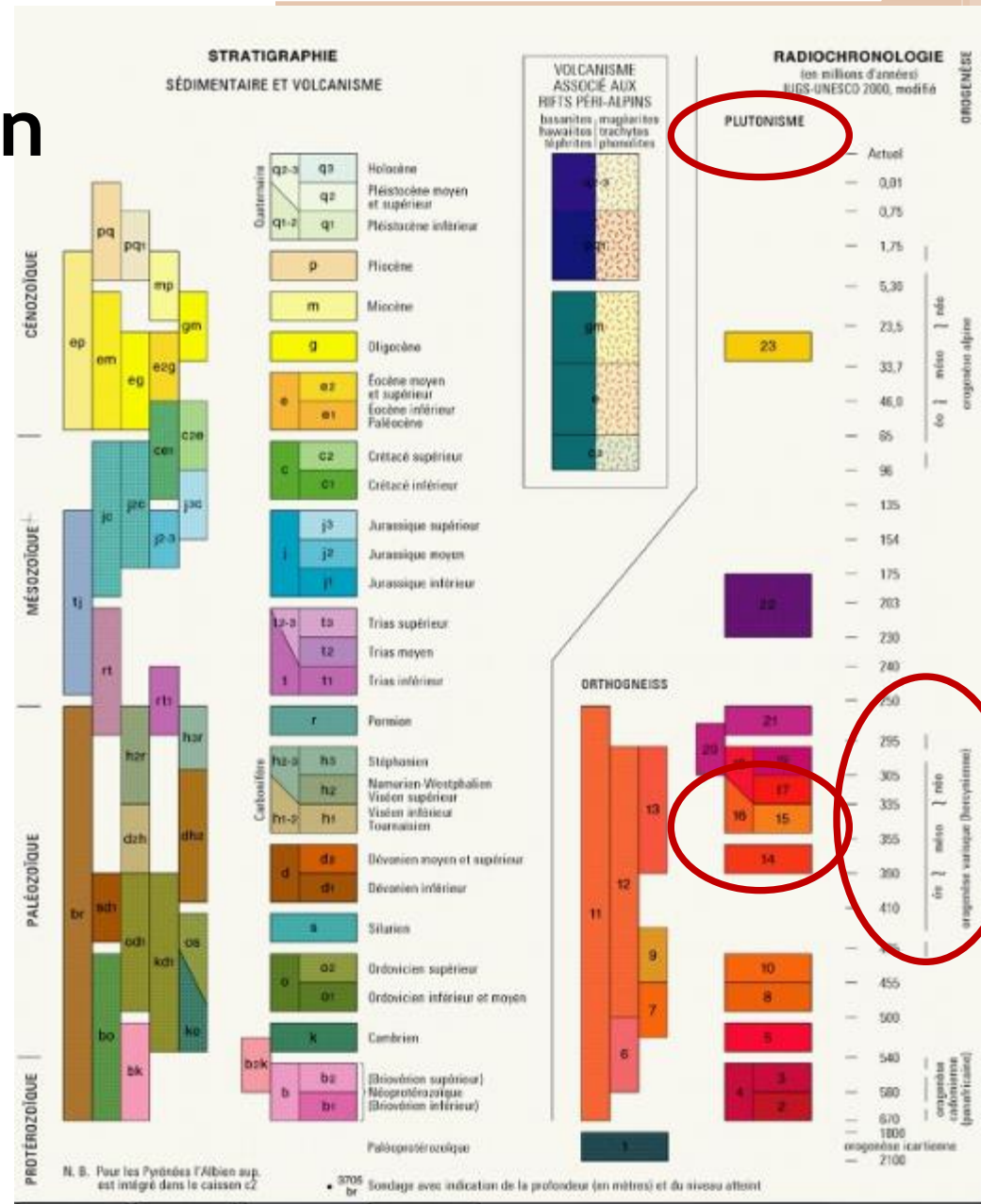
*Lycée E. Delacroix <sup>1</sup>ale S*

- Au TP précédent vous avez mis en évidence le principal mécanisme d'accrétion de la croûte continentale, le magmatisme des zones de subduction. De plus, vous avez démontré au TP3 l'épaississement crustal associé aux zones de collision dû à un empilement mais aussi à une anatexie crustale (fusion partielle de la croûte).
- **On cherche à comprendre les mécanismes de recyclage de la croûte continentale.**

# Activité 1 : étude d'affleurements d'un massif ancien

Utiliser la légende de la carte géologique de la France au 1/1 000 000<sup>e</sup>

- 1- Chercher les roches plutoniques, marqueurs de l'accrétion continentale
- 2- chercher la légende « orogénèse hercynienne »
- 3- identifier la couleur et les numéros à trouver sur la carte => ici couleur rouille-rouge-orange, n° 14, 15, 16, 17.



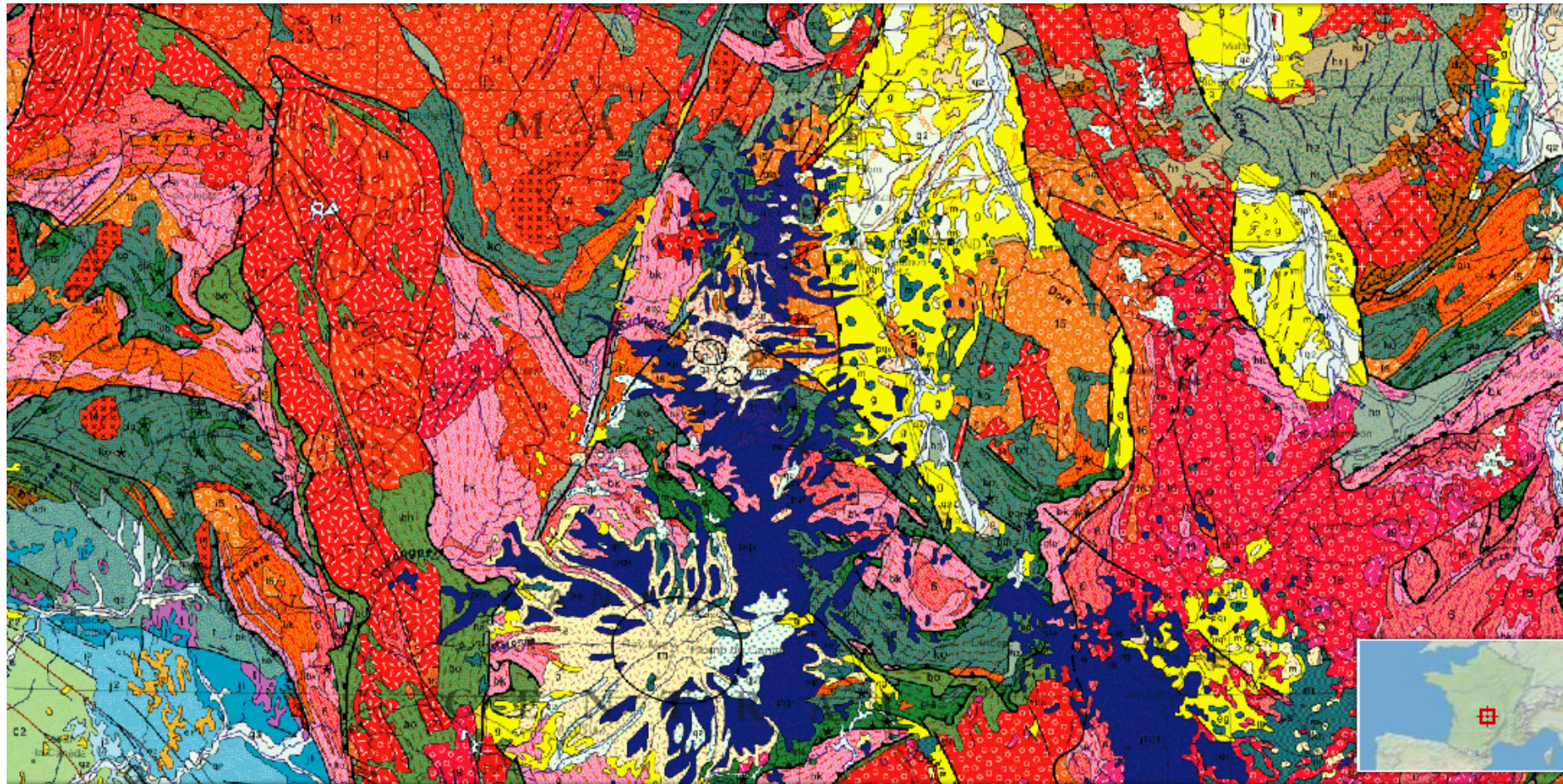


SRS : Lambert 93

X : 997304.05 Y : 6576241.20

*D'après InfoTerre BRGM*

# Des affleurements d'anciennes roches plutoniques datées de l'hercynien

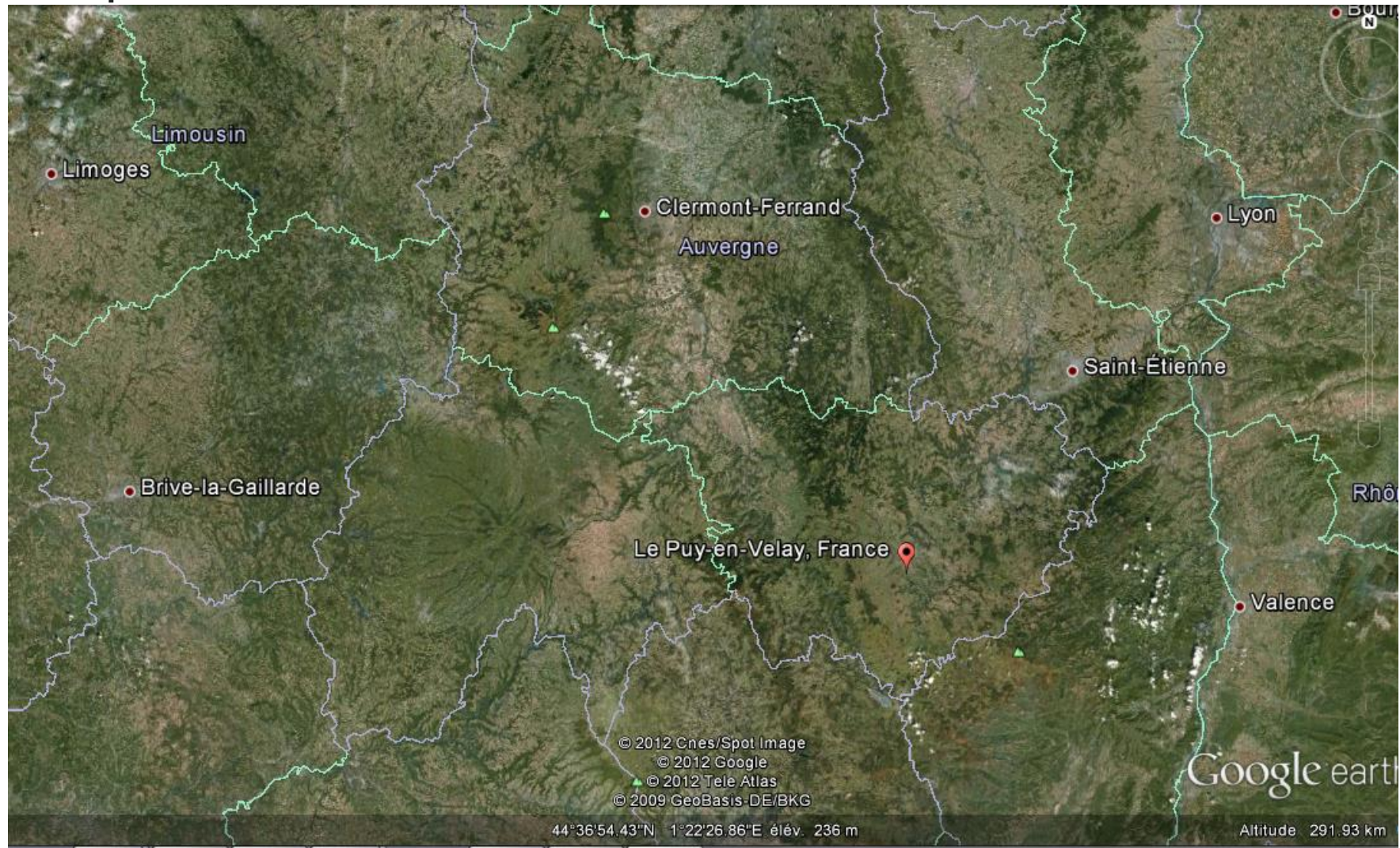


SRS : Lambert 93

X : 754146.36 Y : 6418802.87

Echelle : 1 / 1 000 000

Le Massif Central n'a pas la topographie des Alpes... d'où son qualificatif de massif ancien...



## La topographie des massifs anciens: Massif Armoricaïn, Massif Central



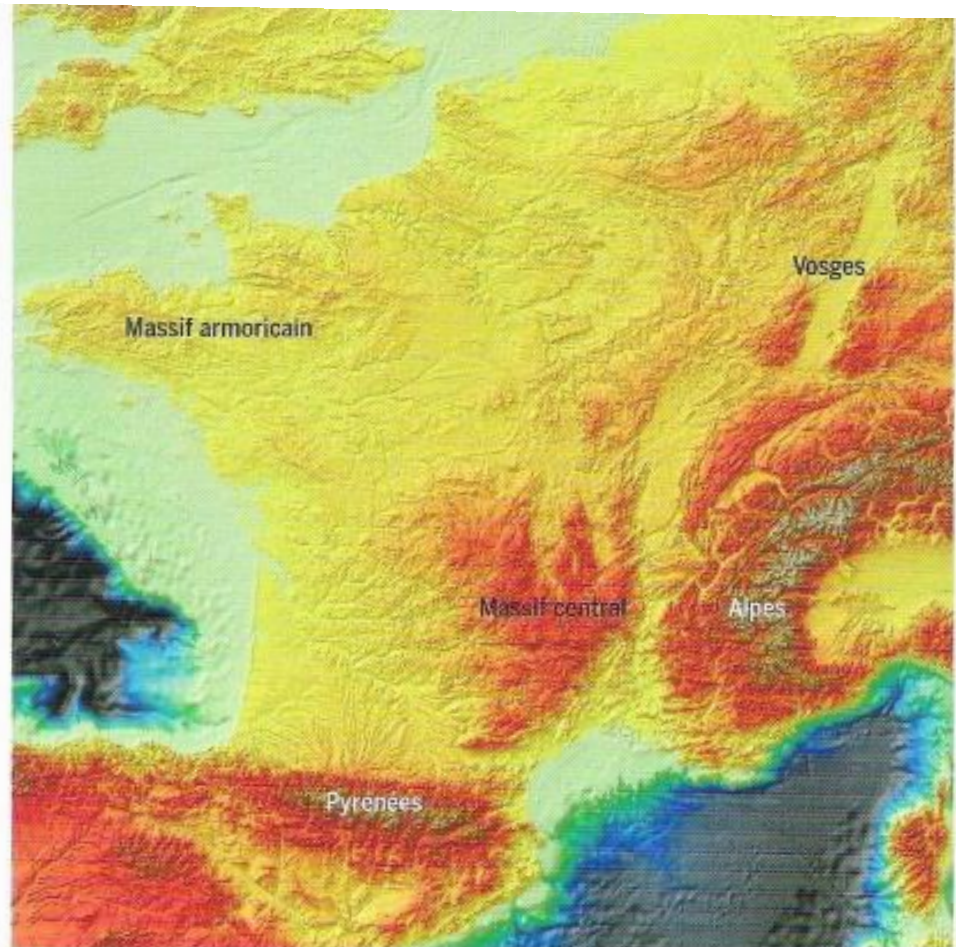
Paysage du Massif armoricain



Paysage du Massif central



Paysage des Pyrénées



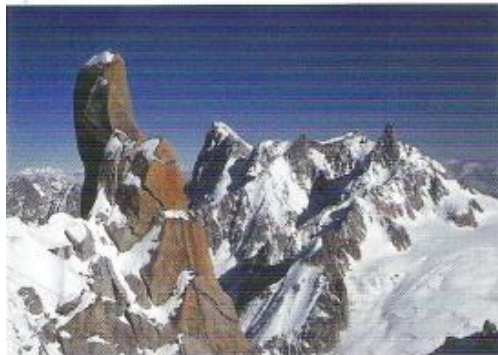
Modèle numérique du relief de la France : il s'agit d'une représentation de la topographie construite par ordinateur à partir de données d'altitude du terrain (réalisé par J.-D. Champagnac, Swiss Federal Institute of Technology).

# Les facteurs d'altération

## A L'altération physique

Un certain nombre d'agents sont responsables de la désagrégation mécanique des roches et donc d'une modification du relief. Les principaux agents sont le gel, la glace, les variations de température et les végétaux.

### • L'action du gel



Dans les régions où l'eau subit des phénomènes de gel-dégel, elle peut entraîner la fracturation des roches. En effet, en passant de l'état liquide à l'état solide, le volume de l'eau augmente d'environ 10 %. Ainsi, quand l'eau infiltrée dans les fissures d'une roche gèle, l'augmentation du volume d'eau provoque l'éclatement de la roche (« geler à pierre fendre »!).

### • L'action des variations de température



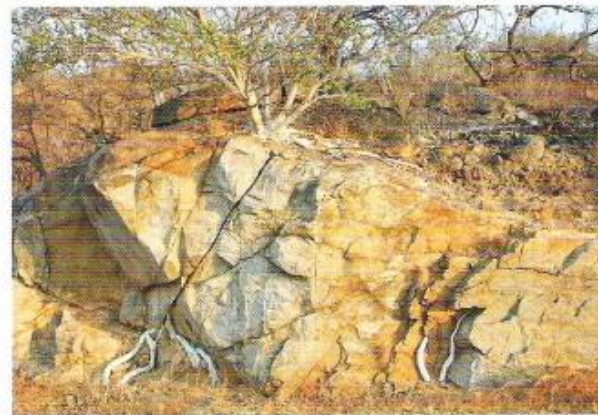
Les variations brutales de température (par exemple entre le jour et la nuit) peuvent entraîner la désagrégation d'une roche, surtout si celle-ci est composée de minéraux n'ayant pas le même **coefficient de dilatation**. Ce phénomène est particulièrement important en haute montagne et dans les déserts.

### • L'action des glaciers

La pression exercée sur les roches par le déplacement des glaciers peut les transformer en matériaux très fins (limons, poussières...), on parle de « farine glaciaire ». Celle-ci peut être visible après le retrait du glacier comme sur la *photographie ci-contre*.



### • L'action des végétaux



Le développement des racines peut entraîner l'agrandissement des fissures au sein des roches et faciliter leur altération (*photographie*). De plus, les racines ont tendance à acidifier le milieu. Ce rejet d'ions  $H^+$  peut interférer avec des cations qui constituent les minéraux des roches environnantes et, ainsi, favoriser l'altération chimique.

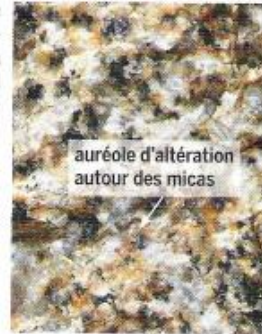
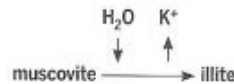
# Les facteurs d'altération

## B L'altération chimique

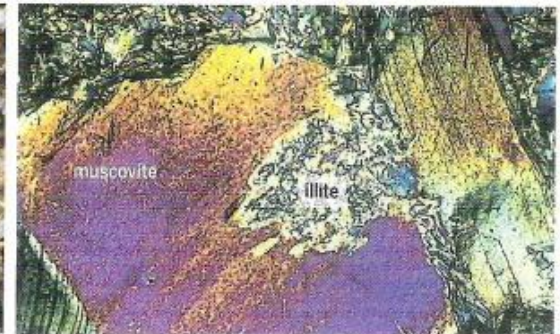
La principale réaction chimique responsable d'une altération est l'hydrolyse, c'est-à-dire la destruction des minéraux par l'eau. Dans le cas d'un granite soumis à l'action de l'eau, on constate des auréoles d'altération autour des micas et des feldspaths (*photographies*). Ces minéraux appartiennent à la famille des silicates, c'est-à-dire qu'ils

présentent une charpente formée par des molécules  $\text{SiO}_4$  entre lesquelles se trouvent différents cations ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ...). Sous l'action de l'eau, ces cations vont être mis en solution de façon plus ou moins importante. Ainsi, la structure du minéral est modifiée avec formation de nouveaux minéraux et d'ions pouvant être lessivés.

L'altération par hydrolyse de la muscovite (mica blanc présent dans le granite) entraîne la formation de l'illite, un minéral argileux, pouvant lui-même être altéré par la suite.



Granite altéré observé à l'œil nu



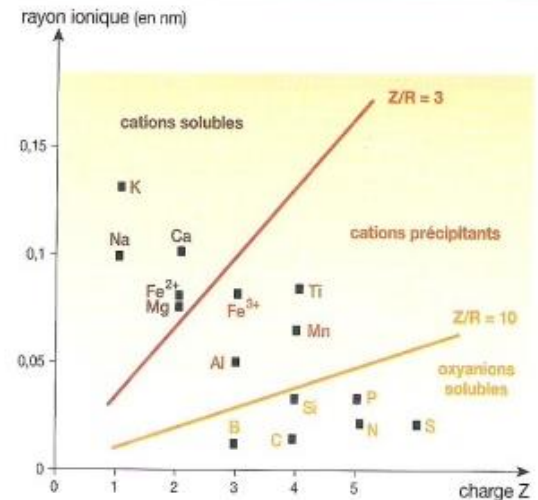
Lame mince d'un granite altéré observée au microscope en lumière polarisée analysée

### Doc. 2 L'altération par le phénomène d'hydrolyse.

Les ions constituant les différents cristaux d'une roche ne réagissent pas tous de la même façon au cours du phénomène d'hydrolyse. La molécule d'eau va se comporter comme un **dipôle** dont la force d'attraction, vis-à-vis d'un ion, va déterminer la solubilité de cet ion. Cette force d'attraction dépend du **potentiel ionique (PI)**, c'est-à-dire du rapport entre la charge  $Z$  de l'ion et son rayon ionique  $R$ .

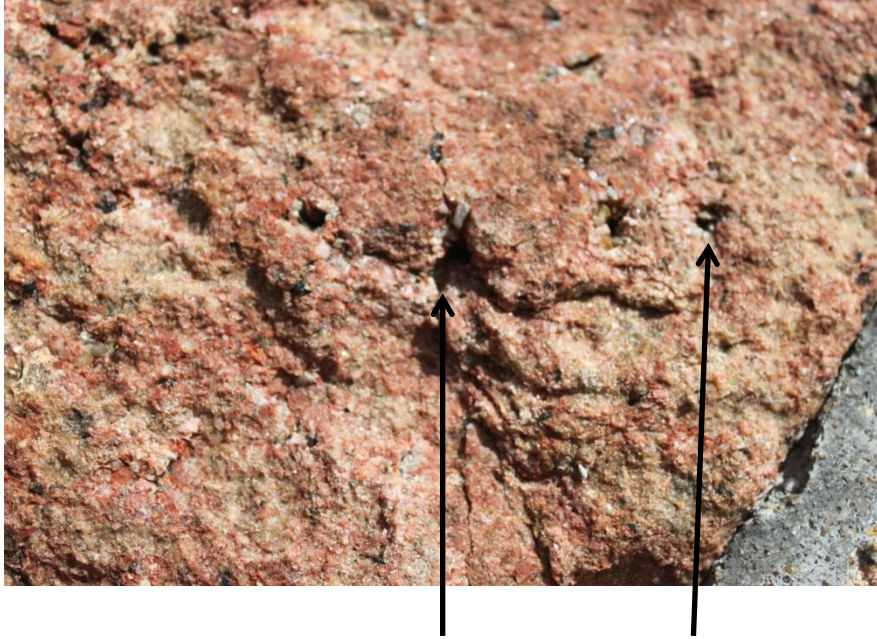
Le *diagramme ci-contre* permet de déterminer trois classes d'ions en fonction de leurs potentiels ioniques :

- les **cations solubles** : ils ont une charge faible et sont attirés par l'eau, formant des éléments solubles pouvant ainsi être évacués vers les océans et constituer des calcaires, par exemple ;
- les **cations précipitants** : ils sont insolubles et précipitent sous la forme d'hydroxydes (ils sont à l'origine de gisements métallifères, par exemple, de bauxite) ;
- les **oxyanions solubles** : avec un petit diamètre et une charge élevée, ils sont solubles et peuvent être évacués vers les océans où ils se recombinaient avec les cations solubles permettant ainsi la formation de carbonates, sulfates ou phosphates, par exemple.

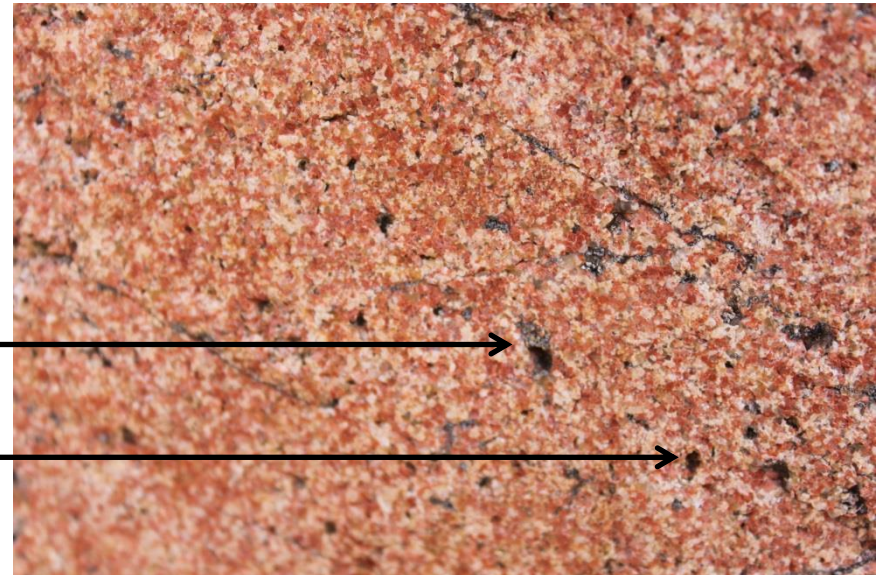


### Doc. 3 La solubilité des ions dépend de leur potentiel ionique.

# Mise en évidence d'une érosion différentielle sur le granite rose de Bréhat



Les micas noirs, sont  
les minéraux les  
premiers altérés par  
l'eau



# Le transport des produits issus de l'altération

L'érosion correspond à la diminution des reliefs résultant du départ des produits de l'altération. Ces derniers, principalement transportés par l'eau, se déposent plus ou moins loin sous forme de sédiments et sont à l'origine des roches sédimentaires. Voyons ici l'importance et les modalités de ce transport.

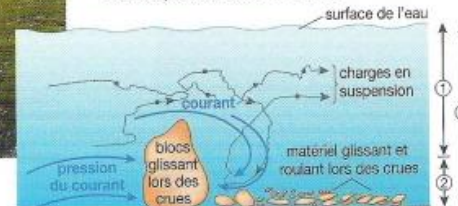
## A Le transport des éléments par les cours d'eau



La naissance d'un cours d'eau dans les Alpes

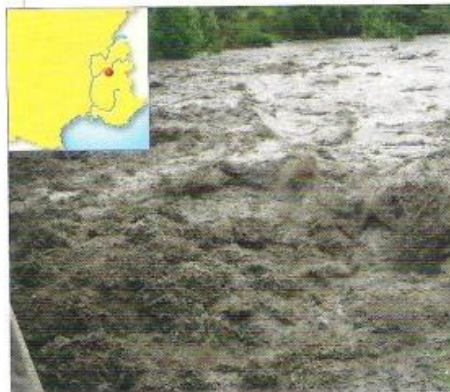
Outre le vent et la glace, l'eau est le principal agent de transport des éléments issus de l'altération des roches (*schéma ci-dessous*). Les ions sont transportés en solution, les particules en suspension. Pour des particules de taille importante, le transport s'effectue en roulant ou en glissant au fond de l'eau : lors des crues, c'est la pression exercée par le courant qui fait rouler les blocs.

Le transport dans un cours d'eau



- ① charge déplacée principalement en suspension
- ② charge déplacée par glissement et roulement
- ③ charge chimique en solution

### Doc. 1 Les rivières et les fleuves transportent des éléments en suspension et en solution.



L'Isère en crue en mai 2008

Il est possible de déterminer la **charge sédimentaire** d'un cours d'eau, c'est-à-dire la masse de sédiments transportés par unité de temps à travers une section transversale. Parmi la matière transportée, on distingue la matière en suspension (MES) et la matière dissoute totale (MDT). Il est possible, à l'aide d'un préleveur automatique, d'analyser des échantillons d'eau et de mesurer les concentrations en MES et en MDT.

De telles mesures ont été réalisées sur l'Isère au niveau de la ville de Grenoble (point rouge sur la carte). Le bassin de l'Isère, situé en amont, apporte au Rhône une quantité importante de matières issues principalement des Alpes.

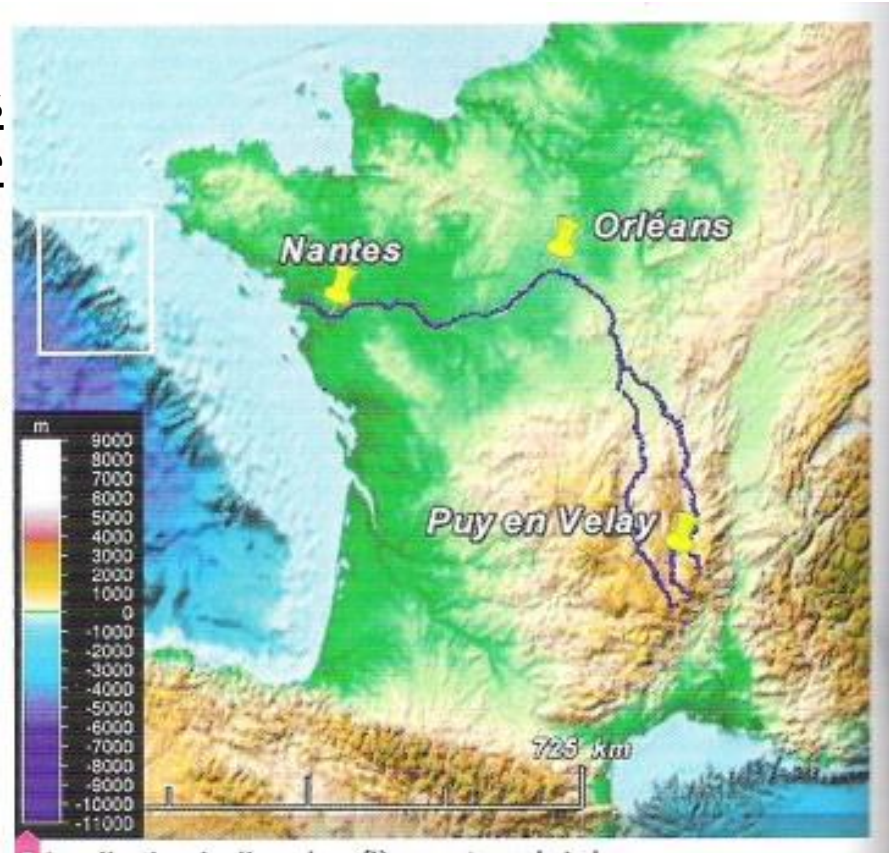
La répartition des flux annuels de MES et de MDT est sensiblement équivalente, respectivement de  $2 \text{ Mt} \cdot \text{an}^{-1}$  (mégatonnes par an) et de  $1,73 \text{ Mt} \cdot \text{an}^{-1}$ . Le flux annuel de MES devient véritablement prépondérant sur le transit de MDT lors de crues importantes (*photographie*).

Ces mesures permettent de dresser un bilan d'érosion sur le bassin de l'Isère qui serait en moyenne de  $350 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$ , soit, compte tenu de la superficie du bassin, une érosion totale de  $3,73 \text{ Mt} \cdot \text{an}^{-1}$ .

### Doc. 2 La charge sédimentaire d'un cours d'eau, l'Isère par exemple, provient de l'érosion.

# Activité 2 : transport et sédimentation des produits d'érosion

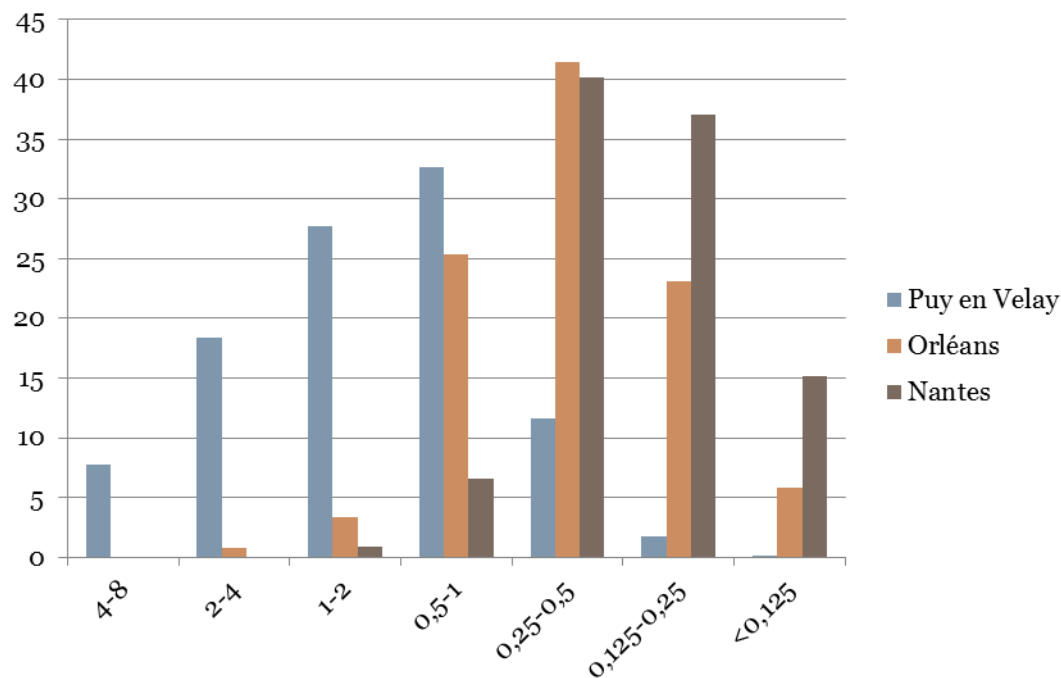
## Document 1 : Localisation des lieux de prélèvements sur la Loire



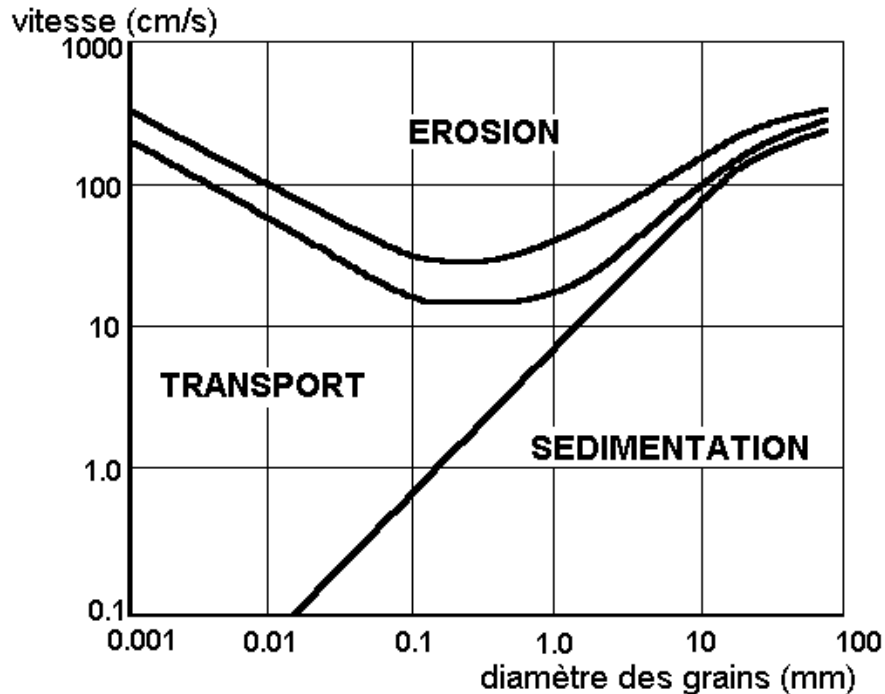
Le transport des particules issues de l'érosion des reliefs est surtout assuré par l'eau et le vent. Ainsi les particules résultant de l'érosion des roches du Massif Central sont véhiculées par la Loire et se déposent dans le lit du fleuve en fonction de leur taille et de la vitesse du courant.

## Document 2 : Résultats de tamisage du sable de Loire prélevé à différents endroits.

classe granulométrique	Puy en Velay	Orléans	Nantes
4-8	7,8	0	0
2-4	18,4	0,8	0
1-2	27,7	3,4	0,9
0,5-1	32,7	25,4	6,6
0,25-0,5	11,6	41,5	40,2
0,125-0,25	1,7	23,1	37,1
<0,125	0,1	5,8	15,2



## Document 3 : comportement des particules en fonction de leur granulométrie et de la vitesse du courant (diagramme de Hulström)



1. Lorsque l'eau circule à une vitesse de  $1\text{m.s}^{-1}$ , une particule de 1 mm :

- a. est érodée.
- b. est transportée.
- c. sédimente.

2. Une particule de 0,1 mm de diamètre est transportée uniquement par de l'eau circulant à :

- a.  $0,1\text{ cm.s}^{-1}$
- b.  $1\text{ cm.s}^{-1}$
- c.  $10\text{ cm.s}^{-1}$
- d.  $100\text{ cm.s}^{-1}$

3. Une particule de 0,012 mm de diamètre va uniquement sédimenter si la vitesse de courant est de :

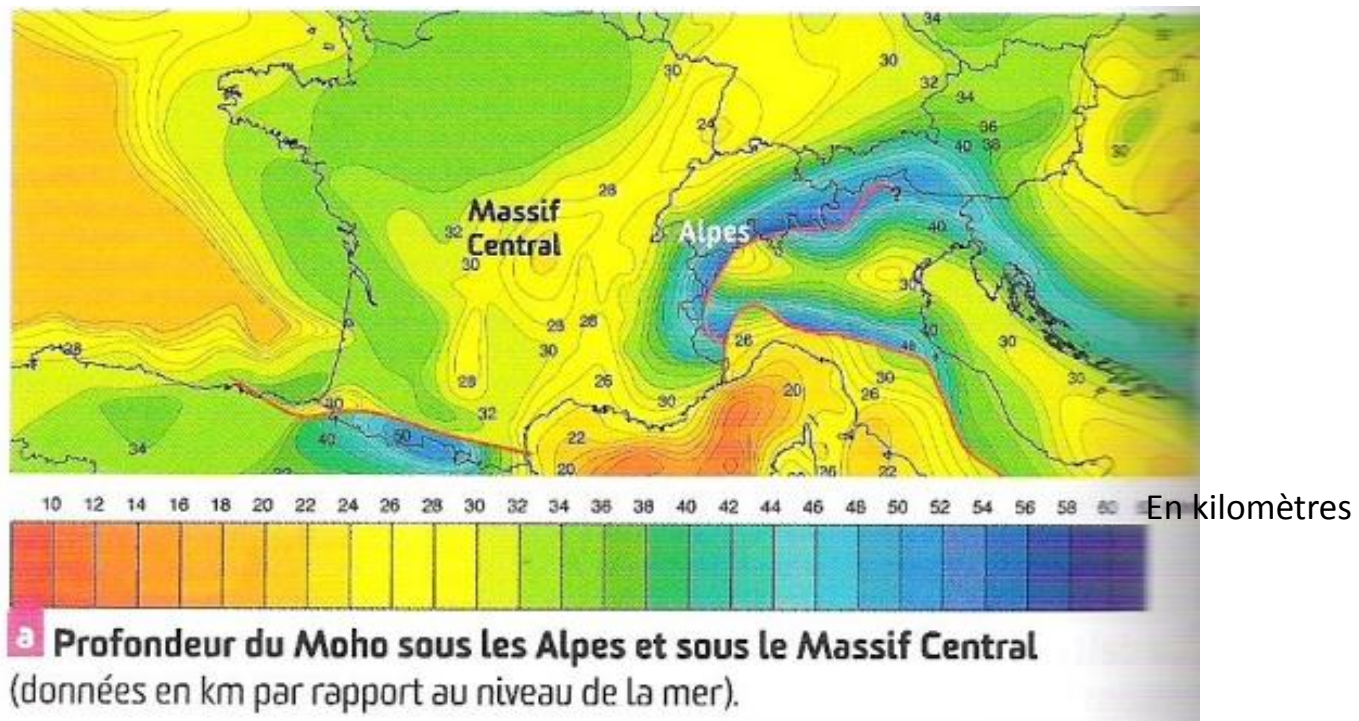
- a.  $0,1\text{ cm.s}^{-1}$
- b.  $1\text{ cm.s}^{-1}$
- c.  $10\text{ cm.s}^{-1}$
- d.  $100\text{ cm.s}^{-1}$

# Traces écrites

- L'étude des chaînes de montagnes anciennes (Massif Central par ex) révèle une topographie très faiblement positive. De plus on y observe des **roches plutoniques**, donc initialement formées en profondeur. On en déduit qu'au cours du temps, les montagnes **s'érodent**, présentant ainsi à l'**affleurement** des roches formées en profondeur.
- Les **facteurs d'altération** peuvent être **physiques** (variation de T°C, vent, action mécanique des végétaux, action mécanique des glaciers...) mais également **chimiques** (eau, ions H<sup>+</sup> libérés par les végétaux). L'altération par l'eau est la plus importante. L'érosion qui suit l'altération fait intervenir des **agents de transport**.
- Les particules érodées se retrouvent dans les cours d'eau où elles sont transportées (en suspension ou en solution selon leur diamètre) ou bien elles y sédimentent, selon leur granulométrie et la vitesse du courant.
- La vitesse d'érosion est grande ~ qqs 10 mm.an<sup>-1</sup>.
- Elle dépend du climat, du débit des fleuves drainant les reliefs, et de la hauteur du relief à éroder!

# Activité 3 : les réajustements isostatiques d'une chaîne de montagne vieillissante

## La profondeur du Moho sous le Massif Central



Comment expliquer la disparition de la racine crustale qui équilibrerait le relief hercynien sous le Massif Central?

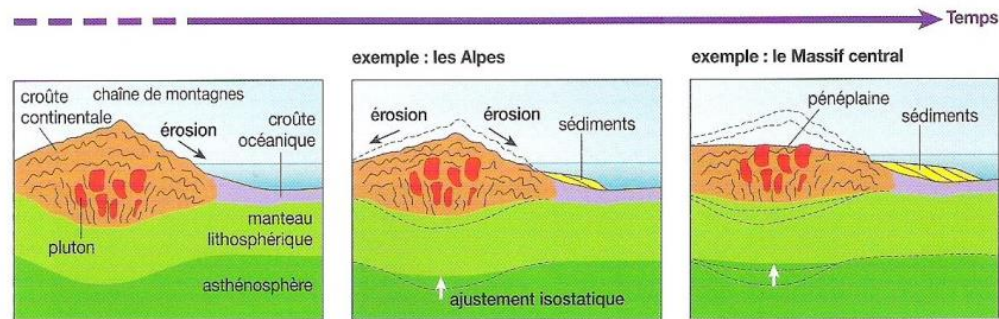
- La vitesse d'érosion étant estimée à qqs mm.an-1, soit qqs km.millions d'années<sup>-1</sup>, les chaînes de montagnes récentes comme les Alpes, formées il y a 40 millions d'années devraient être totalement érodées.
- **Comment expliquer le maintien du relief des montagnes récentes malgré l'érosion ?**

## B Des modèles illustrant la remontée de roches profondes par isostasie

Le rééquilibrage isostatique par rapport à l'érosion se fait dans une proportion de 4/5, c'est-à-dire que, pour 5 m d'érosion, il y a une remontée de 4 m (ou 800 m de rebond pour 1 km d'érosion).

Le taux initial d'érosion de la chaîne est évalué à 1 mètre par 1 000 ans (soit  $1\ 000\text{ m} \cdot \text{Ma}^{-1}$ ), ce qui donne un

taux net d'abaissement de la chaîne de  $200\text{ m} \cdot \text{Ma}^{-1}$ . Le modèle global présenté ci-dessous montre comment des roches plutoniques, formées à la base de la croûte continentale épaissie par la collision, affleurent en surface quelques millions d'années plus tard.



Doc. 3 Un modèle de remontée de roches plutoniques liée à l'isostasie.

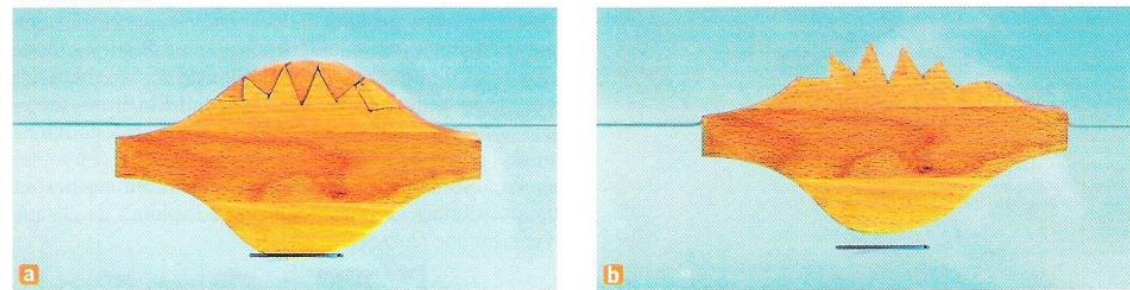
On souhaite montrer que lorsque l'érosion enlève du matériel léger en surface, cela entraîne une remontée de matériaux profonds par réajustement isostatique.

### ■ PROTOCOLE

Une planche est découpée de manière à simuler une masse continentale avec sa **racine crustale** sous une chaîne de montagnes. En surface, des triangles de bois prédécoupés dans la masse peuvent être enlevés pour simuler l'érosion de la chaîne de montagnes.

La planche, légèrement lestée à la base pour qu'elle ne bascule pas, est placée dans un aquarium à moitié rempli d'eau. On trace un repère sur la vitre au niveau du bas de la racine crustale. On enlève les triangles prédécoupés, puis on observe.

### ■ RÉSULTATS



Doc. 4 Un modèle réalisable en classe.

# Recyclage des chaînes de collision

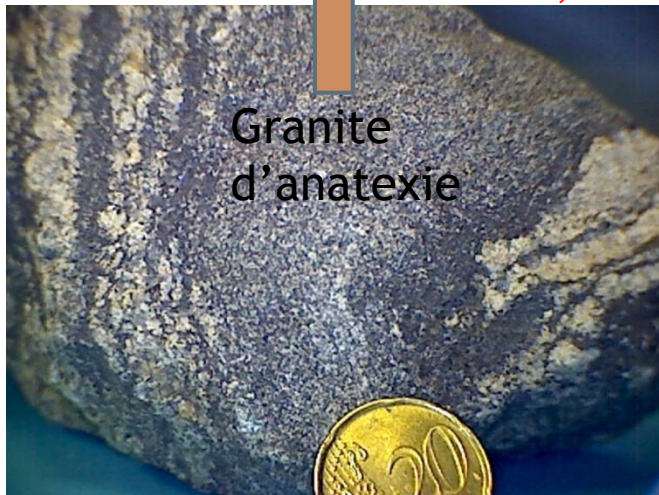


**Granite altéré** => altération d'un ancien massif, cohésion entre les cristaux diminuée d'où érosion facilitée

**Arène granitique** = transport des particules sédimentaires, par l'eau, depuis la zone d'altération

**Conglomérat:** sédimentation des particules sédimentaires de granulométrie variable (selon vitesse du courant), puis joint d'argile par exemple.

Altération, érosion, affleurement



Granite d'anatexie

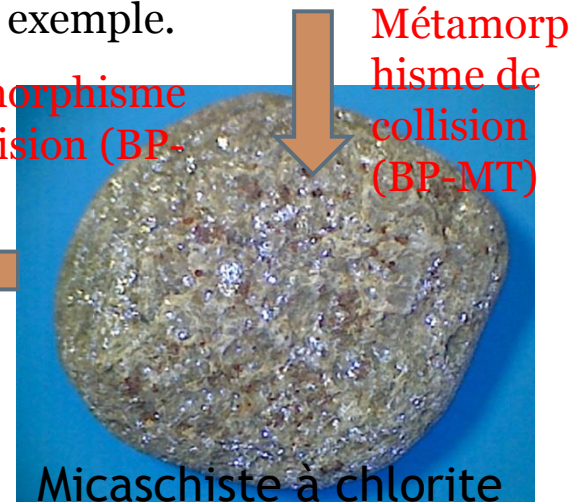
Migmatite

Anatexie crustale



Gneiss

Métamorphisme de collision (BP-HT)



Micaschiste à chlorite

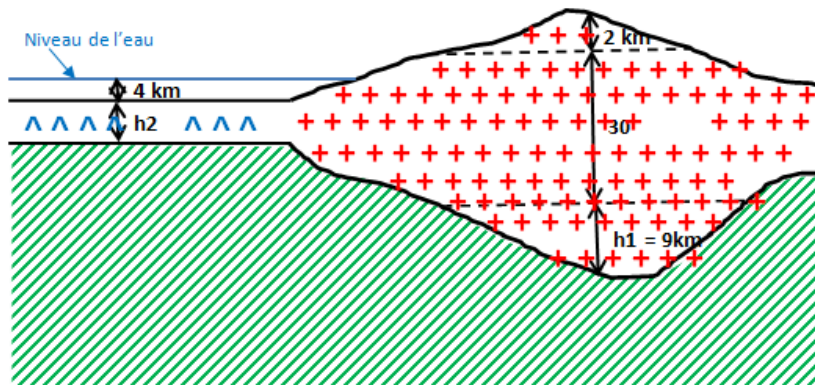
Métamorphisme de collision (BP-MT)

## Calcul du réajustement isostatique suite à l'érosion

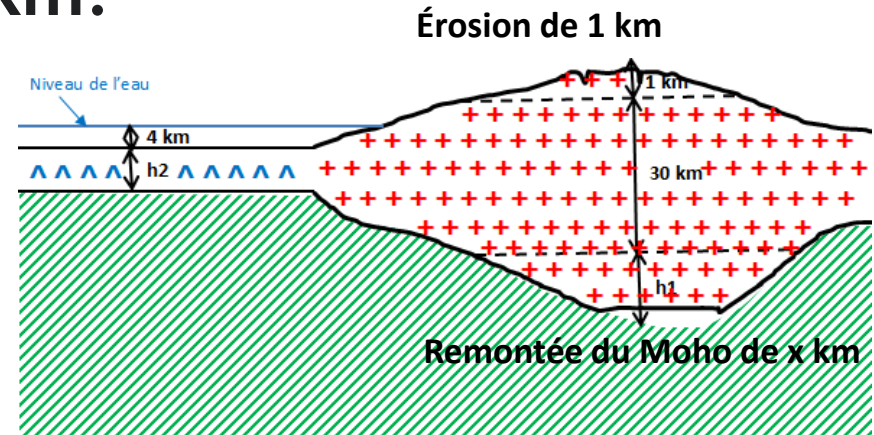
- La disparition d'1 km de hauteur de montagne, correspond-elle à une érosion d'1km ?
  - **Non**, diminuer l'altitude de 1km nécessite une **érosion de 5,5 km**.
  - En effet, vous avez vu au TP2,  $r = 4,5 \times a$
  - Avec  $r$ : épaisseur de la racine crustale et  $a$  : épaisseur du relief
  - Donc si  $a$  perd 1km, alors  $r$  remonte de 4,5 km
- => l'épaisseur totale à éroder est de :

$$1 + 4,5 = 5,5 \text{ km}$$

# Calcul du réajustement isostatique suite à l'érosion: quelle est la variation du relief si le taux d'érosion est de 1km?



Etat initial



Etat final

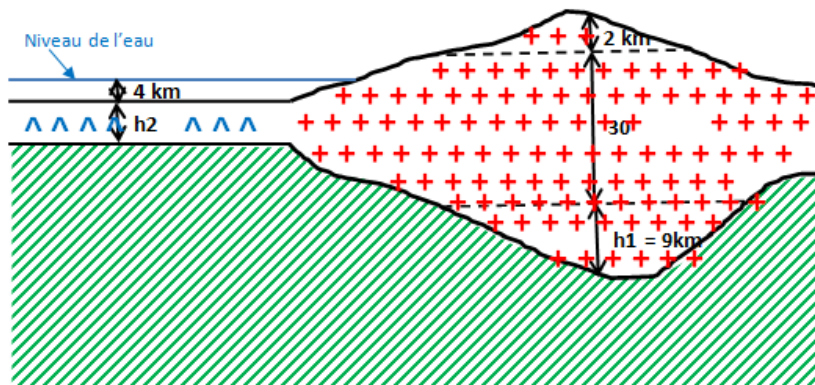
On a vu que le taux d'érosion est de 5,5 km pour une perte d'altitude de 1km. Par règle de trois, on calcule la diminution d'altitude pour un taux d'érosion de 1 km :

diminution d'altitude =  $1 \cdot 1 / 5,5$

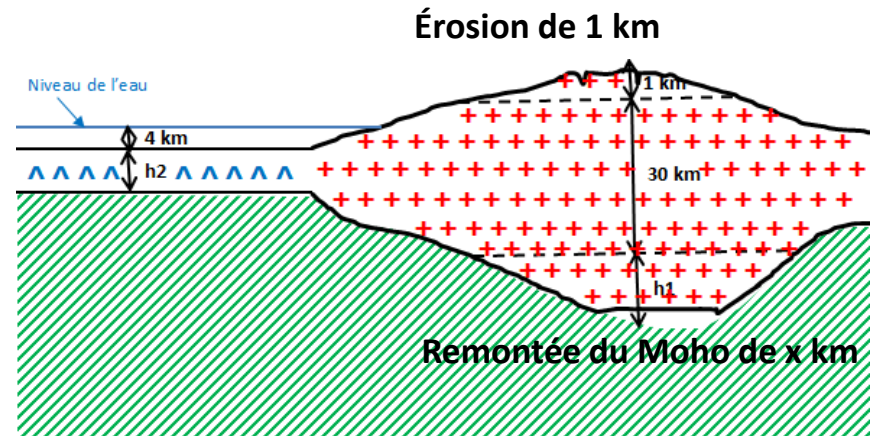
diminution d'altitude = 0,19 km

Donc éroder 1km de montagne, lui fait perdre une altitude de 190 m, le reste, (soit 810 m), est compensé par la remonté du Moho (sur le schéma  $x = 810 \text{ m}$ )

# Une autre façon de calculer le réajustement isostatique suite à l'érosion (si taux d'érosion de 1km)



Etat initial



Etat final

Par principe d'isostasie, si la chaîne perd 1km de hauteur :

$$e_{CCf} \times d_{CC} + e_{ML} \times d_{ML} = e_{CCi} \times d_{CC}$$

A.N.

$$40 \times 2.7 + 3.3 \times e_{ML} = 41 \times 2.7$$

$$e_{ML} = 2.7/3.3$$

$$e_{ML} = 0.8 \text{ km}$$

Ainsi, éroder 1 km de chaîne de montagne induit une remontée du Moho de 800 m.

# Le rebond isostatique

- L'érosion de 1km de relief d'une chaîne de montagne, entraîne un rééquilibrage par remontée du Moho de 0.8 km, on parle de réajustement isostatique. Ce rebond explique pourquoi l'érosion n'aplanit pas rapidement les chaînes de montagnes, elle est compensée par la remontée de la racine crustale.
- Ainsi, éroder 1 km de chaîne de montagne induit une remontée du Moho de 800 m.

# L'étirement des chaînes de montagnes

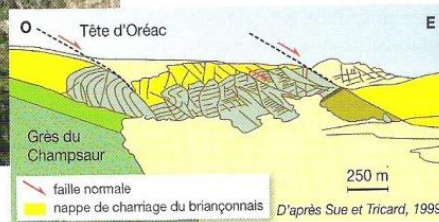
Les chaînes de montagnes se forment par épaissement crustal suite à la collision continentale, avec une compression importante des terrains. Paradoxalement, une extension est constatée au cœur de certaines chaînes de montagnes récentes. Celle-ci pourrait alors participer à l'aplanissement de la chaîne.

## A Des indices d'une extension au cœur des Alpes

- Des observations de terrain

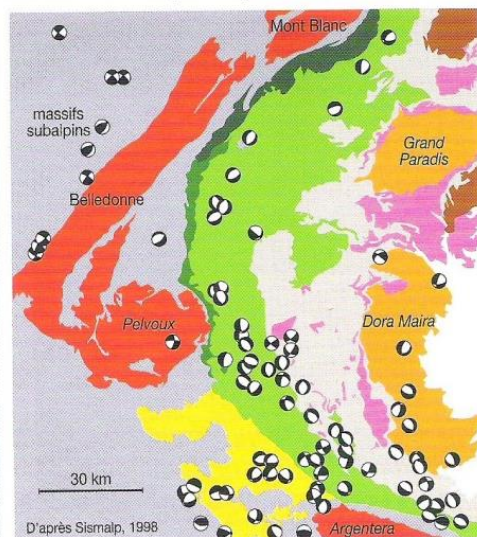


Dans la zone interne des Alpes, il est fréquent d'observer des failles dites normales (traits rouges), comme dans le parc national des Écrins, au niveau de la Tête de La Rochaille et d'Oréac (photographie ci-contre). Ces failles entraînent un affaissement du bloc rocheux situé au-dessus de la faille (toit) : ce type de faille se forme lors d'une extension des terrains.



Des failles normales découpent les roches dans les Alpes internes

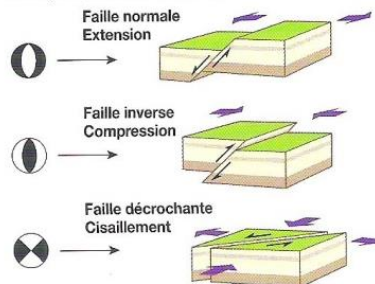
- Des données sismiques interprétées



La nature des failles déduite des séismes, dans les Alpes

De nombreux séismes se produisent chaque année dans les Alpes. L'enregistrement des ondes sismiques apporte de nombreuses informations, notamment sur la localisation précise du foyer sismique et sur les directions de déplacement des roches le long de la faille. On en déduit les forces tectoniques qui s'appliquent sur les roches : extension, compression ou coulissage (schémas ci-dessous).

Des symboles représentant ces différentes contraintes sont alors positionnés géographiquement à l'aplomb de chaque foyer sismique (carte ci-contre).



Des symboles différents indiquent que les failles normales ou inverses peuvent aussi être en partie décrochantes.

# Des forces d'étirement au cœur de la chaîne

- Un séisme étant une rupture brutale de roches, suite à l'accumulation de contraintes, dans un contexte de convergence il est normal d'enregistrer de nombreux séismes dans les Alpes. Or l'étude des séismes dans les Alpes, révèle dans certains endroits une rupture de type faille normale et non inverse ! En l'occurrence en plein cœur de la chaîne, les contraintes exercées semblent être de l'étirement et non de la compression, pourquoi ?
- Cet étirement s'explique par le soulèvement de la chaîne dû au rebond isostatique. Ce soulèvement entraîne au cœur des Alpes des contraintes d'extension (comme les craquelures au centre d'un gâteau mis au four suite à son bombement).
- Aussi ces déformations tectoniques de type failles normales participent à un aplanissement de la chaîne.

## B L'étirement entraîne un aplanissement des chaînes de montagnes

### • Données géodésiques

Un réseau de 14 stations GPS permanentes, installé dans les Alpes occidentales, enregistre des données en continu depuis la fin de l'année 1997 (réseau REGAL). Les données sont récupérées quotidiennement.

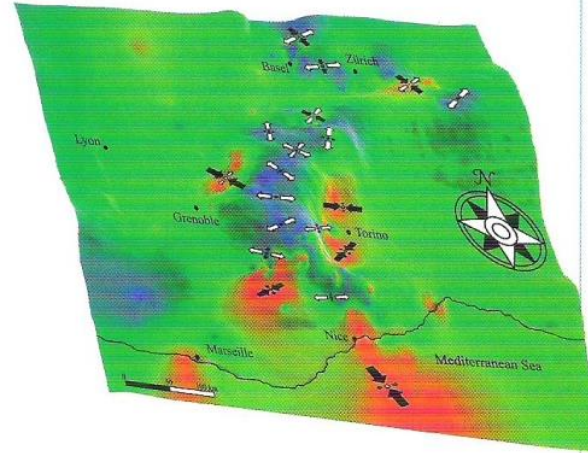
Ces mesures permettent d'évaluer les déformations de la croûte terrestre et mettent en évidence des déplacements de quelques millimètres. Les résultats sont surprenants : plutôt que de confirmer l'idée généralement admise d'un raccourcissement de l'ensemble de la chaîne du fait de la convergence, ces résultats montrent une extension est-ouest dans la partie centrale des Alpes occidentales. Ainsi, Lyon s'éloigne actuellement de Turin d'environ 0,5 mm/an.



Une station GPS du réseau REGAL

### • Données sismotectoniques

L'étude des relations entre séismes et tectonique (voir document 1) permet d'établir les déformations régionales dans les Alpes : les zones en extension sont en bleu, les zones en compression sont en rouge.



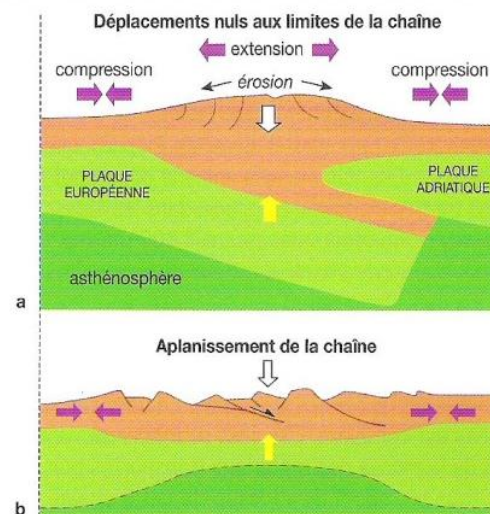
### Doc. 2 Des mesures géodésiques en accords avec des données sismotectoniques dans les Alpes.

À la suite de la phase active de collision avec compression latérale, charriages et épaissement de la croûte et de la lithosphère, un équilibre entre les forces tectoniques et les forces gravitaires est atteint. La croûte épaisse et légère est en équilibre (isostasie) sur le manteau plus dense. En enlevant de la matière, l'érosion perturbe cet équilibre et entraîne un soulèvement par réajustement isostatique.

Actuellement, au niveau des Alpes (a), les géologues constatent une extension au cœur de la chaîne, ce qui entraîne une compression en bordure. Les mouvements aux limites de la chaîne sont nuls : la convergence entre la plaque européenne et la plaque adriatique semble stoppée.

L'ensemble de ces processus créerait des conditions favorables à la réalisation de l'aplanissement final de la chaîne. Le schéma b illustre une évolution possible de la chaîne des Alpes.

forces tectoniques   
 gravité   
 isostasie   
 b



### Doc. 3 Un modèle de « l'effondrement » gravitaire d'une chaîne de montagnes.