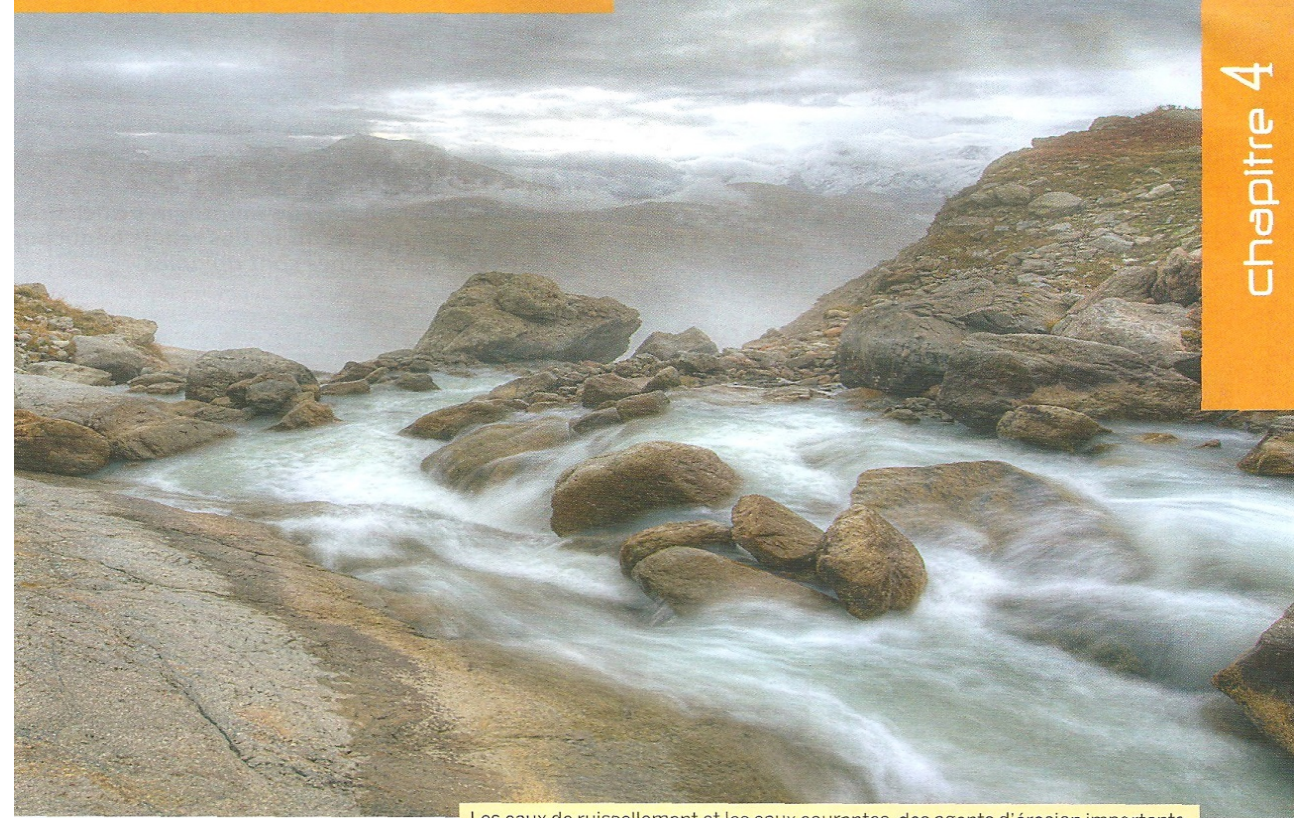


PARTIE 2

LES CONTINENTS ET LEUR DYNAMIQUE

CHAPITRE 2

La disparition des reliefs



Les eaux de ruissellement et les eaux courantes, des agents d'érosion importants.

La disparition des reliefs

LES ACTIVITÉS DU CHAPITRE

- | | | |
|---|---|-----|
| 1 | L'aplanissement des chaînes de montagnes | 210 |
| 2 | L'altération des roches | 212 |
| 3 | Le transport des produits issus de l'altération | 214 |
| 4 | Des réajustements isostatiques | 216 |
| 5 | L'étirement des chaînes de montagnes | 218 |

L'aplanissement des chaînes de montagnes

L'observation des massifs montagneux permet de distinguer les chaînes de montagnes anciennes des chaînes de montagnes récentes. En effet, les massifs anciens présentent des reliefs beaucoup moins élevés. Au cours des temps géologiques, les chaînes de montagnes sont aplanies.

A Les massifs montagneux en France



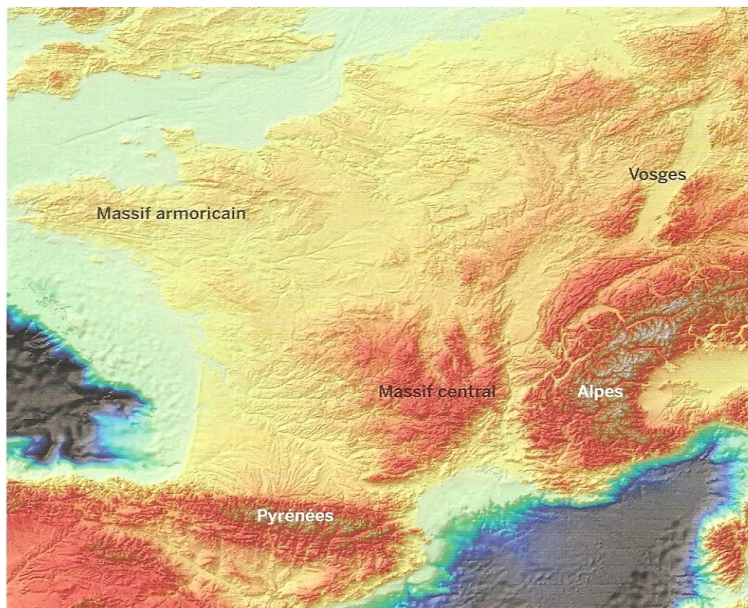
Paysage du Massif armoricain



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).



Paysage des Alpes

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.

Doc. 1 Des chaînes de montagnes d'âges différents.

B La destruction des reliefs au cours du temps

L'érosion d'une chaîne de montagnes s'accompagne d'une remontée vers la surface des roches profondes, qui, ainsi, se refroidissent. Or, dans certains minéraux, il est possible de repérer des traces qui dépendent de la température et qui permettent une datation. On peut donc établir une **thermochronologie**, c'est-à-dire une histoire thermique de ces minéraux.

L'apatite, par exemple, est un minéral qui contient de l'uranium. L'isotope ^{238}U , radioactif, se désintègre spontanément à un rythme connu, ce qui provoque un désordre du réseau cristallin, appelé **trace de fission** (photographie ci-contre). L'observation et le comptage de ces traces, dans un minéral actuellement recueilli à la surface, permettent de déterminer à quelles époques ce minéral a franchi l'isotherme 110°C , puis l'isotherme 60°C (la technique précise est trop complexe pour être expliquée ici).

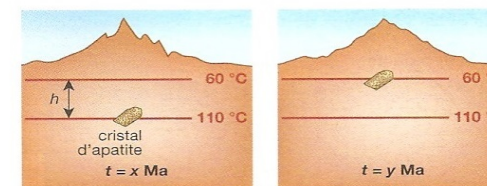
En établissant une hypothèse sur le **gradient géothermique** de l'époque sous la chaîne de montagnes, on peut évaluer la distance verticale qui séparerait ces deux isothermes.

Si l'on suppose que l'altitude de la chaîne a peu changé durant cette période, la hauteur franchie par l'apatite correspond à la hauteur de roches qui a été déblayée en surface pendant le même temps $t = (x - y)$ Ma.

Un calcul simple permet alors d'estimer la vitesse d'exhumation de la chaîne de montagnes, encore appelée **vitesse d'érosion**.



Cristal d'apatite avec ses traces de fissions spontanées



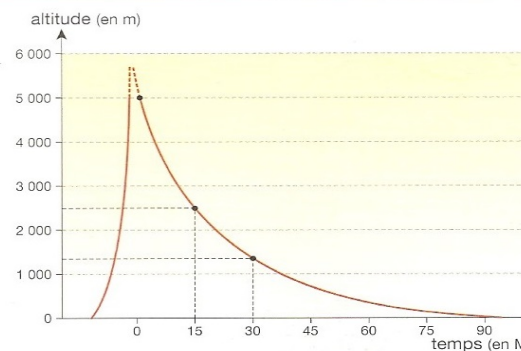
Doc. 2 Une technique d'estimation de la vitesse d'érosion d'une chaîne de montagnes : la thermochronologie.

Dans les Alpes centrales, les données thermochronologiques montrent que, depuis 38 Ma, une épaisseur de roches de 24 km (à comparer avec l'altitude moyenne régionale de 2 km) aurait été enlevée du dôme Lépointin (Alpes suisses), avec une augmentation du taux d'érosion depuis 5 millions d'années.

Au niveau de la chaîne de l'Himalaya, c'est une épaisseur de 20 à 25 km de roches qui a été enlevée depuis 20 millions d'années.

D'une façon plus générale, il est possible de définir, approximativement, l'évolution de l'altitude d'une chaîne de montagnes au cours du temps (graphique ci-contre) :

- par l'estimation des volumes de sédiments issus de l'érosion de diverses chaînes de montagnes anciennes et déposés dans les bassins océaniques ;
- par l'estimation des volumes restants des chaînes.



Évolution de l'altitude d'une chaîne de montagnes en fonction du temps

Doc. 3 Quelques dizaines de millions d'années pour aplanir une chaîne de montagnes.

Pistes d'exploitation

PROBLÈME À RÉSOUDRE ➤ Quel est, approximativement, le temps nécessaire pour qu'une chaîne de montagnes s'aplanisse ?

Doc. 1 Comparez les paysages montagneux des différents massifs français.

Doc. 2 Expliquez en quoi la thermochronologie permet d'estimer une vitesse d'érosion.

Doc. 3 Donnez un ordre de grandeur de la vitesse d'érosion dans les Alpes et dans l'Himalaya aux échelles de temps indiquées. Montrez que les vitesses d'érosion trouvées ne sont pas en correspondance avec l'évolution de l'altitude d'une chaîne de montagnes au cours du temps.

Lexique, p. 406

L'altération des roches

L'érosion permet d'enlever une quantité importante de roches aux chaînes de montagnes, modifiant ainsi le relief. Dans un premier temps, les roches sont dégradées ou altérées. On distingue deux types d'altération : l'altération physique et l'altération chimique.

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.

Doc. 1 Des roches soumises aux facteurs climatiques et biologiques.

• 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



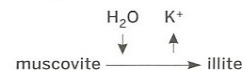
Le développement des racines peut entraîner l'agrandissement des fissures au sein des roches et faciliter leur altération (*photographie*). De plus, les racines ont tendance à acidifier le milieu. Ce rejet d'ions H^+ peut interférer avec des cations qui constituent les minéraux des roches environnantes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

B L'altération chimique

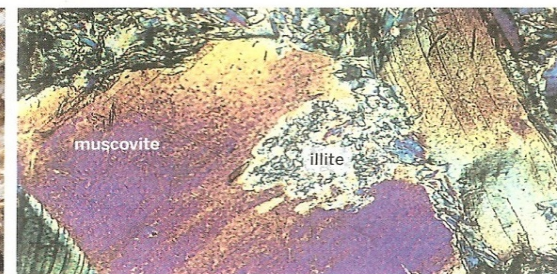
La principale réaction chimique responsable d'une altération est l'hydrolyse, c'est-à-dire la destruction des minéraux par l'eau. Dans le cas d'un granite soumis à l'action de l'eau, on constate des auréoles d'altération autour des micas et des feldspaths (*photographies*). Ces minéraux appartiennent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

présentent une charpente formée par des molécules SiO_4 entre lesquelles se trouvent différents cations (K^+ , 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



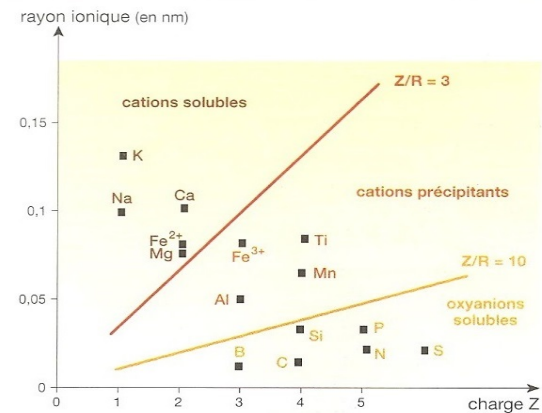
Lame mince d'un granite altéré observée au microscope en lumière polarisée analysée

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.

Pistes d'exploitation

PROBLÈME À RÉSOUDRE ➤ Quels sont les mécanismes à l'origine de l'altération des roches ?

Doc. 1 Quels agents d'érosion sont ici mis en évidence ?

Doc. 2 Montrez que l'hydrolyse entraîne une modification de la structure des minéraux.

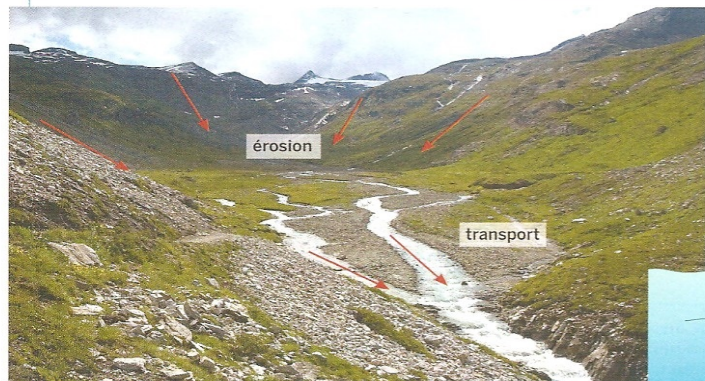
Doc. 3 Expliquez en quoi la solubilité des ions détermine la formation de futures roches.

Doc. 1, 2 et 3 Montrez que l'eau est l'agent principal de l'altération des roches.

Le transport des produits issus de l'altération

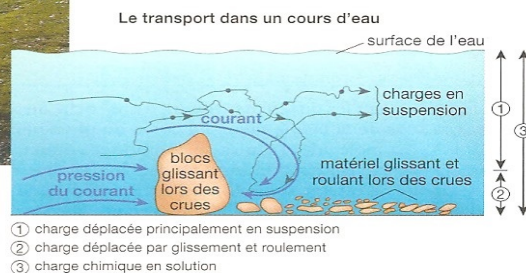
L'érosion correspond à la diminution des reliefs résultant du départ des produits de l'altération. Ces derniers, principalement transportés par l'eau, se déposent plus ou moins loin sous forme de sédiments et sont à l'origine des roches sédimentaires. Voyons ici l'importance et les modalités de ce transport.

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.



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.

B Le dépôt des produits de l'érosion dans des bassins sédimentaires

Les éléments mis en suspension ou en solution par l'altération des roches continentales rejoignent finalement un bassin océanique. Lorsque le fleuve a une influence dominante sur le milieu marin, un delta se forme. C'est le cas, par exemple, de la formation du delta du Rhône dans le sud-est de la France. Mais, c'est dans l'est de l'Inde et au Bangladesh que se trouve le plus grand delta du monde, couvrant une superficie de $105\,000 \text{ km}^2$, le delta du Gange (photographie ci-contre). Il est formé par les apports des fleuves Gange et Brahmapoutre.



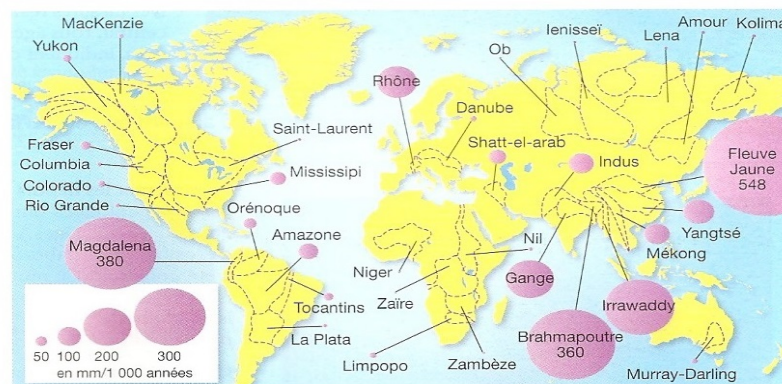
Image satellitale du delta du Gange

La quantité de sédiments déposés dans un bassin en fonction du temps correspond au **flux sédimentaire**. Chaque année, les cours d'eau transportent des continents aux océans, en suspension ou en solution, une masse de sédiments de 18 milliards de tonnes. Le Gange et le Brahmapoutre apportent dans l'océan, à eux seuls, de 1 à 2 milliards de tonnes de sédiments par an.

Doc. 3 L'apport de sédiments dans un bassin océanique : le delta du Gange.

À partir de l'estimation des flux sédimentaires pour les grands bassins fluviaux de la planète et en considérant une densité moyenne des continents égale à $2,7$, il est possible, malgré des incertitudes, d'estimer le volume de roches enlevé chaque année aux continents. En connaissant les surfaces continentales concernées par chaque bassin fluvial, une vitesse d'érosion totale par bassin peut être calculée (voir ci-contre). Le chiffre global de l'érosion avoisinerait 100 à 150 mm par millier d'années.

Les records de vitesse d'érosion sont atteints pour les bassins de chaîne active, si l'on excepte le Huang He (fleuve Jaune), dont le bassin est rendu très sensible à l'érosion par les activités humaines (déforestation, exploitations agricoles sur des terrains en pente...).



Vitesse de dénudation totale (physique et chimique) des continents calculée pour les grands bassins fluviaux

Doc. 4 Des vitesses d'érosion des continents déduites des flux sédimentaires.

Pistes d'exploitation

PROBLÈME À RÉSOUDRE ➤ Que deviennent les produits issus de l'érosion ?

Doc. 1 et 2 Décrivez le transport des produits de l'érosion par un cours d'eau. Établissez un lien entre la charge sédimentaire d'un cours d'eau et l'érosion.

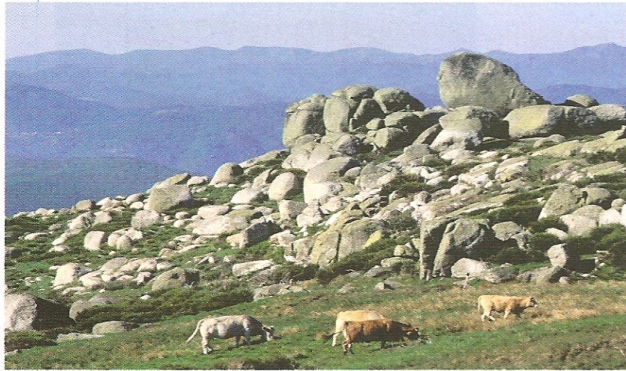
Doc. 4 Comparez les vitesses d'érosion des différents bassins fluviaux de la planète.

Doc. 1 à 4 Montrez que l'altération et l'érosion contribuent à l'effacement des reliefs.

Des réajustements isostatiques

Les vitesses d'érosion trouvées actuellement dans les montagnes jeunes entraîneraient un aplatissement de la chaîne de montagnes en quelques millions d'années. Or, plusieurs dizaines de millions d'années sont nécessaires. La remontée de roches profondes par un réajustement isostatique explique cette différence.

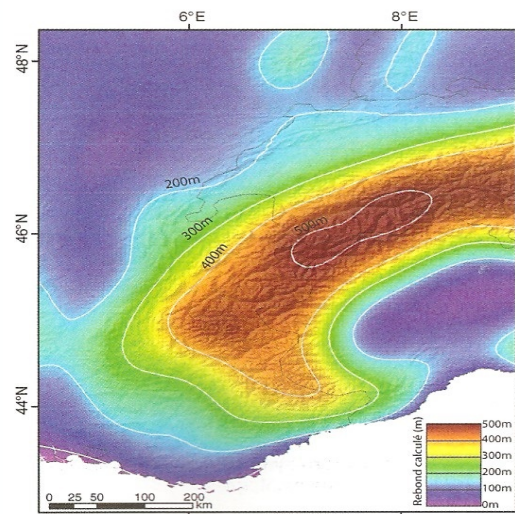
A Des roches plutoniques en surface grâce à l'isostasie



Les techniques de géochronologie, notamment la méthode Rubidium-Strontium (décrite page 152), permettent de dater les granites présents à l'affleurement dans les massifs anciens tels que le Massif central ou le Massif armoricain. Cette méthode de datation permet de dater le moment de la cristallisation des minéraux, c'est-à-dire la « fermeture du système » (température au-dessous de laquelle il n'y a plus de fuite d'éléments radioactifs hors des cristaux). Connaissant la température de cristallisation des minéraux et le **gradient géothermique** moyen sous la chaîne de montagnes, on peut déterminer la profondeur à laquelle le magma a cristallisé. Des mesures réalisées sur différents granites du Massif central, tous âgés d'un peu plus de 300 millions d'années, indiquent des profondeurs allant de 10 à 15 km.

► Paysage granitique du mont Lozère

Doc. 1 Des granites formés en profondeur affleurent, aujourd'hui, en surface.



En mesurant les dépôts sédimentaires dans les **bassins périalpins**, les géologues ont pu estimer le volume de sédiments qui a quitté la chaîne. À partir de cette estimation, un modèle d'érosion a été élaboré, puis le **modèle présenté ci-contre** a été construit. Ce modèle met en évidence une remontée isostatique liée à l'érosion dans les Alpes : c'est le rebond isostatique (le principe général de l'isostasie est défini aux pages 144 et 145).

On parle de rebond isostatique car l'érosion, en enlevant du matériel continental, allège les masses rocheuses en surface, ce qui entraîne une remontée de croûte continentale profonde pour rétablir l'équilibre gravitaire.

La remontée de roches profondes est estimée à 500 mètres en un million d'années (soit 0,5 mm/an) dans la zone interne des Alpes. En s'éloignant de cette zone, la remontée isostatique est de plus en plus faible, jusqu'à 200 mètres seulement dans la zone périalpine.

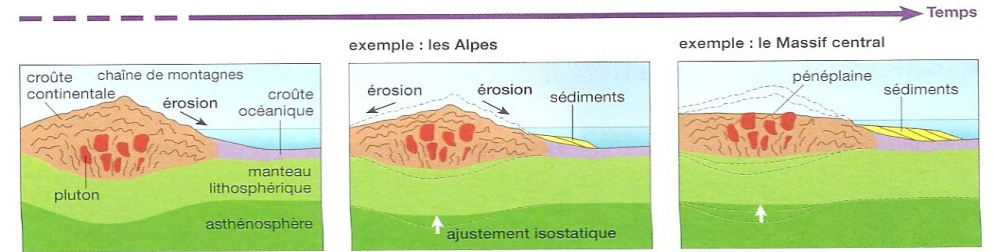
► Modèle du rebond isostatique lié à l'érosion dans les Alpes

Doc. 2 Relation entre l'érosion et la remontée isostatique dans les Alpes.

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.

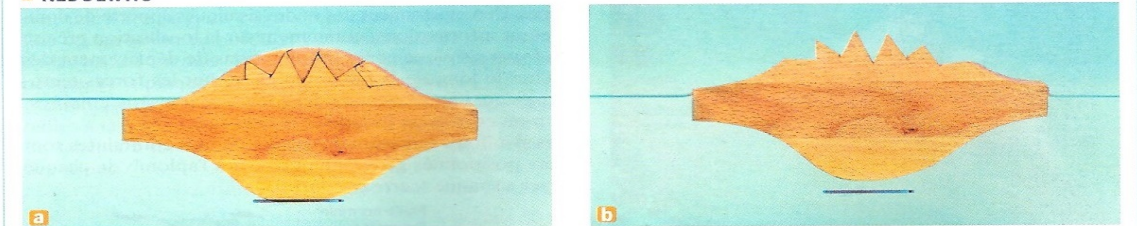
On souhaite montrer que lorsque l'érosion enlève du matériel léger en surface, cela entraîne une remontée de matériaux profonds par réajustement isostatique.

■ 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.

Pistes d'exploitation

PROBLÈME À RÉSOUDRE ► En quoi l'isostasie peut-elle expliquer la présence en surface de roches plutoniques formées au cours d'une orogénèse ?

Doc. 1 Montrez que la technique d'étude des granites ne permet pas de connaître la profondeur de formation du magma.

Doc. 1 à 4 Expliquez le rôle joué par l'isostasie dans l'aplatissement des chaînes de montagnes.

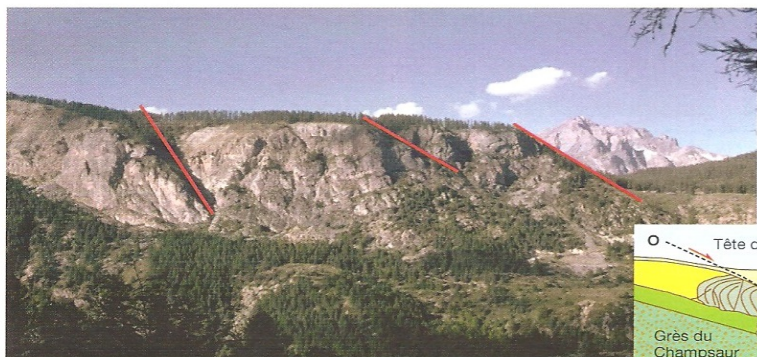
Doc. 2 En quoi le modèle proposé établit-il un lien entre l'érosion et l'isostasie ?

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.

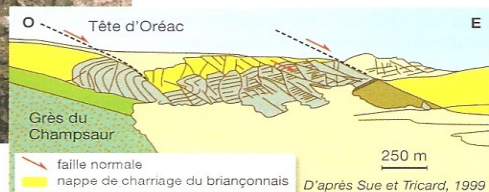
A Des indices d'une extension au cœur des Alpes

• Des observations de terrain

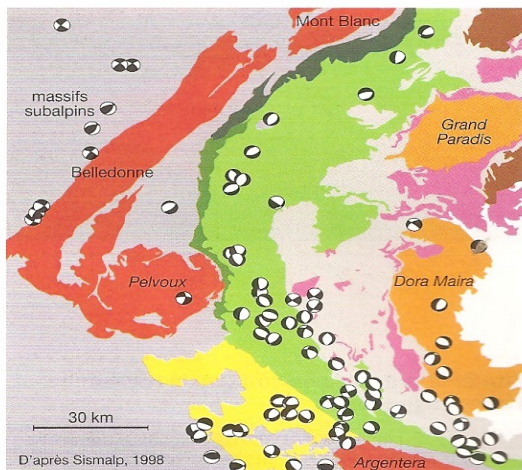


Des failles normales découpent les roches dans les Alpes internes

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.

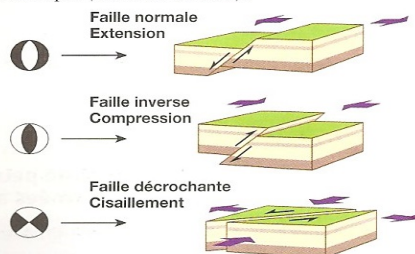


• Des données sismiques interprétées



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.

Doc. 1 Des observations de terrain et des données sismiques dans les Alpes.

B L'étirement entraîne un aplanissement des chaînes de montagnes

• Données géodésiques

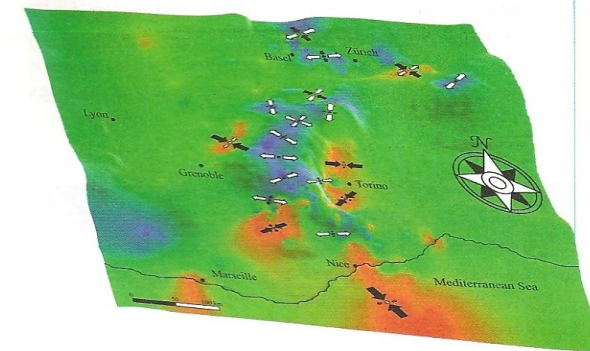
Un réseau de 14 stations GPS permanentes, installé dans les Alpes occidentales, enregistre des données en continu depuis la fin de l'année 1997 (réseau REGAL). Les données sont récupérées quotidiennement. Ces mesures permettent d'évaluer les déformations de la croûte terrestre et mettent en évidence 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

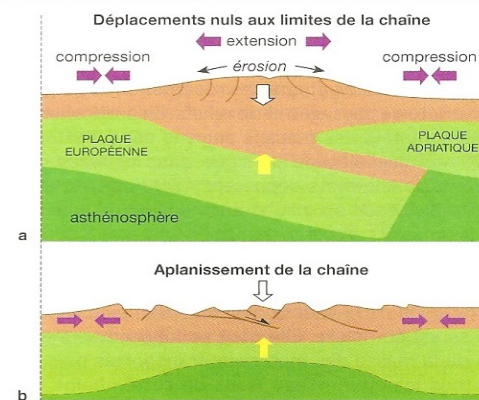
• Données sismotectoniques

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.



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

Pistes d'exploitation

PROBLÈME À RÉSOUDRE En quoi l'extension constatée dans les chaînes de montagnes pourrait-elle participer à la disparition des reliefs ?

Doc. 1 Montrez que la plupart des failles actives dans les Alpes indiquent une extension.

Doc. 1, 2 et 3 Expliquez comment des phénomènes tectoniques participent à la disparition des reliefs.

Doc. 2 En quoi les résultats des mesures géodésiques sont-ils en conformité avec les études sismiques ?

Chapitre 4 La disparition des reliefs

Nous savons que les paysages évoluent, notamment sous l'action de l'eau. L'eau érode les roches, transporte les matériaux issus de l'érosion puis les dépose ; ces dépôts sont à l'origine des roches sédimentaires. En classe de Terminale, nous allons essayer de comprendre quelles peuvent être les conséquences de ces phénomènes au niveau des chaînes de montagnes.

1 L'aplanissement des chaînes de montagnes

■ Une opposition entre montagnes jeunes et montagnes anciennes

Les géologues distinguent des massifs anciens et des chaînes de montagnes récentes. Le Massif armoricain, le Massif central et les Vosges sont des massifs anciens qui se sont formés à la fin de l'ère primaire, entre - 360 et - 250 millions d'années. Les Pyrénées et les Alpes, en revanche, sont des chaînes de montagnes dont les reliefs ont commencé à être formés, il y a 30 à 40 millions d'années seulement.

Chaînes anciennes et chaînes récentes se distinguent par une variété de paysages et de reliefs. En particulier, les plus hauts sommets des massifs anciens dépassent rarement 1000 mètres d'altitude alors que, dans les Alpes, plusieurs dizaines de sommets dépassent 4000 mètres. Ces différences d'altitude s'expliquent par la longue érosion subie par les massifs anciens.

■ Une estimation de la vitesse d'érosion

L'estimation de la vitesse d'érosion d'une chaîne de montagnes est complexe. Elle peut se fonder sur une estimation de la masse des matériaux transportés puis déposés par tous les cours d'eau issus de cette chaîne de montagnes (voir plus loin).

Elle peut aussi être réalisée par thermochronologie. Cette technique consiste à estimer la vitesse de remontée vers la surface des roches profondes en se fondant sur des traces présentes dans certains minéraux qui sont dépendantes de la température de la roche. On peut, par exemple, déterminer à quelles époques un minéral a franchi l'isotherme 110 °C, puis l'isotherme 60 °C, lors de cette remontée.

En faisant une hypothèse sur le **gradient géothermique** de l'époque sous la chaîne de montagnes, on peut évaluer la distance verticale qui séparerait ces deux isothermes. Et, si l'on suppose que l'altitude de la chaîne a peu changé

durant cette période, la hauteur franchie par le minéral correspond à la hauteur de roches qui a été déblayée en surface pendant le même temps. Un calcul simple permet alors d'estimer la vitesse d'**érosion**.

Les résultats montrent par exemple que, dans les Alpes centrales, une épaisseur de roches de 24 km a été enlevée depuis - 38 Ma.

2 L'altération des roches

Les roches subissent une **altération physique** et une **altération chimique**, puis sont déblayées par l'eau de ruissellement, les glaciers ou le vent. Ainsi, l'érosion enlève une quantité importante de roches aux chaînes de montagnes et modifie le relief.

■ Une 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.

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

La pression et les frottements exercés sur les roches par le **déplacement des glaciers** peuvent les transformer en matériaux très fins (limons, poussières...) : on parle de « farine glaciaire ».

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.

Enfin, les **racines des végétaux**, en se développant, agrandissent des fissures et contribuent à la désagrégation des roches.

■ Une 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. Ces minéraux appartiennent à la famille des **silicates**, c'est-à-dire qu'ils présentent une charpente formée par des molécules SiO_4 entre lesquelles se trouvent différents cations (K^+ , 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 lessivage de certains ions.

Dans les différents cristaux, les ions ne réagissent pas tous de la même façon au cours du phénomène d'hydrolyse :

- certains **cations** sont **solubles** (Ca^{2+} , Mg^{2+} ...), ils peuvent être évacués vers les océans et constituer des calcaires, par exemple ;
- d'autres **cations** sont **insolubles** (Al^{3+} ...) et précipitent sous la forme d'hydroxydes (ils sont à l'origine de gisements métallifères, par exemple de bauxite) ;
- enfin, certains **anions** sont **solubles** (PO_4^{3-} , SO_4^{2-} ...) et peuvent être évacués vers les océans où ils réagiront avec les cations solubles permettant ainsi la formation de carbonates, sulfates ou phosphates, par exemple.

3 Transport et dépôt des produits issus de l'altération

■ Le transport par les eaux courantes

L'eau est le principal agent de transport des éléments issus de l'altération des roches. Les ions sont transportés en solution, et les particules peuvent rester en suspension tant que la force du courant est suffisante. On définit la **charge sédimentaire** d'un cours d'eau comme l'ensemble des matières en suspension et des matières dissoutes qu'il peut transporter.

Par l'analyse d'échantillons d'eaux sur de longues périodes, il est possible de dresser un bilan d'érosion sur l'ensemble du bassin d'un cours d'eau.

■ Des flux sédimentaires très variables

Finalement, la charge sédimentaire résiduelle d'un cours d'eau rejoint un bassin océanique où elle se dépose. On appelle **flux sédimentaire** la quantité de sédiments déposés dans un bassin en fonction du temps : par exemple, 1 à 2 milliards de tonnes de sédiments sont déposés annuellement par le Gange, dans le Golfe du Bengale. Ces sédiments sont à l'origine des roches sédimentaires, mais les mécanismes de transformation des sédiments en roches ne sont pas au programme de la classe de Terminale.

À partir de l'estimation des flux sédimentaires pour les grands bassins fluviaux de la planète et en considérant une densité moyenne des continents égale à 2,7, il est possible, malgré des incertitudes, d'estimer le **volume** de roches enlevé chaque année aux continents. En connaissant les surfaces continentales concernées par chaque bassin fluvial,

une vitesse d'érosion totale par bassin peut être calculée. Les records de vitesse d'érosion sont atteints pour les bassins des chaînes de montagnes jeunes (Himalaya, Alpes...).

4 L'intervention de phénomènes tectoniques

■ Des réajustements isostatiques

Dans les massifs anciens tels que le Massif central ou le Massif armoricain affleurent des granites âgés de plus de 300 millions d'années et qui se sont formés à des profondeurs allant de 10 à 15 km.

Cette mise à l'affleurement des roches formées en profondeur n'est pas le seul fait de l'érosion. En effet, l'allègement des masses rocheuses en surface dû à l'érosion entraîne une remontée de croûte continentale profonde pour rétablir l'équilibre isostatique : on parle de **rebond isostatique**. On estime que, pour 100 mètres d'érosion, il y a une remontée de la chaîne de 80 mètres.

Ceci permet de comprendre pourquoi une chaîne de montagnes reste « jeune » très longtemps : la baisse d'altitude engendrée par l'érosion est en grande partie compensée par la remontée isostatique.

■ Un effondrement gravitaire de la chaîne 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. Ainsi, dans la zone axiale des Alpes, on observe de très nombreuses **failles normales récentes** qui traduisent une extension des terrains.

Des données sismiques et des données géodésiques ont confirmé cette extension est-ouest dans la partie centrale des Alpes occidentales. Ainsi, Lyon s'éloigne actuellement de Turin d'environ 0,5 mm par an.

Les géologues expliquent ces observations de la manière suivante :

- vers la fin de la phase active de collision, l'épaississement de la croûte et de la lithosphère aboutit à un équilibre entre les forces tectoniques et les forces gravitaires (la croûte épaisse et légère est en équilibre sur le manteau plus dense) ;
 - l'érosion perturbe cet équilibre en enlevant de la matière et entraîne un soulèvement par réajustement isostatique ;
 - à la fin du processus de convergence, la compression étant très réduite, un « effondrement » de la chaîne dans sa région centrale se produit sous l'effet du poids des reliefs.
- L'ensemble de ces processus crée des conditions favorables à la réalisation de l'aplanissement final de la chaîne.

Chapitre 4 La disparition des reliefs

À RETENIR

L'aplanissement des chaînes de montagnes

Les **massifs anciens** (Massif central, Massif armoricain et Vosges) sont les vestiges d'anciennes chaînes de montagnes dont les reliefs étaient comparables à ceux d'une **chaîne récente** (Alpes, Pyrénées). Ces différences d'altitude actuelles s'expliquent par la longue **érosion** subie par les massifs anciens.

Différentes méthodes permettent d'estimer la **vitesse d'érosion** d'une chaîne de montagnes.

L'altération des roches

Les roches subissent une désagrégation physique et une altération chimique.

Différents agents sont responsables de la **désagrégation mécanique** des roches et donc d'une modification du relief : les principaux sont le **gel**, la **glace**, les **variations de température** et les **végétaux**.

Le principal agent de l'**altération chimique** des roches est l'**eau** : de nombreux minéraux subissent une **hydrolyse**. La structure des minéraux (par exemple des feldspaths et des micas) est modifiée avec formation de nouveaux minéraux et libération d'ions qui peuvent être lessivés.

Transport et dépôt de produits issus de l'altération

L'eau est le principal **agent de transport** des éléments issus de l'altération des roches. Les ions sont transportés en solution, les particules en suspension. On définit la **charge sédimentaire** d'un cours d'eau comme l'ensemble des matières en suspension et des matières dissoutes qu'il peut transporter.

Les matériaux transportés rejoignent finalement un bassin océanique où ils se déposent. On appelle **flux sédimentaire** la quantité de sédiments déposés dans un bassin en fonction du temps. À partir de l'estimation des flux sédimentaires pour les grands bassins fluviaux de la planète, il est possible d'évaluer approximativement le volume de roches enlevé chaque année aux continents.

L'intervention de phénomènes tectoniques

La mise à l'affleurement de roches formées en profondeur il y a des centaines de millions d'années n'est pas le seul fait de l'érosion. En effet, à mesure que l'érosion « allège » la chaîne de montagnes, la croûte continentale profonde remonte par **réajustement isostatique**. La baisse d'altitude engendrée par l'érosion est ainsi en grande partie compensée par la remontée isostatique.

Vers la fin du processus de convergence, la compression étant très réduite, la chaîne de montagnes a tendance à **s'effondrer** dans sa région centrale par le jeu de nombreuses **failles normales**.

Mots-clés

- Agent d'érosion
- Désagrégation d'une roche
- Altération d'une roche
- Charge sédimentaire d'un cours d'eau
- Flux sédimentaire
- Vitesse d'érosion
- Réajustement isostatique

Capacités et attitudes

- ▶ Recenser, extraire et organiser des informations pour comprendre :
 - l'aplanissement progressif des chaînes de montagnes ;
 - le rôle de l'eau dans l'érosion des reliefs ;
 - le rôle de phénomènes tectoniques dans la disparition des reliefs.
- ▶ Utiliser le microscope polarisant afin d'identifier l'altération chimique des minéraux d'une roche.
- ▶ Utiliser des modèles pour simuler le réajustement isostatique.

SCHÉMA BILAN

LA DISPARITION DES RELIEFS

Un aplanissement des chaînes de montagnes dû à l'érosion

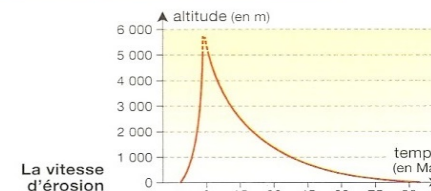


1 ÉROSION
L'eau est le principal agent d'altération des roches. Cette altération se fait par hydrolyse des minéraux.

2 TRANSPORT
Les produits de l'érosion des reliefs sont transportés, sous forme solide ou soluble, par les eaux courantes.



3 SÉDIMENTATION
Les matériaux transportés par les cours d'eau finissent tôt ou tard par se déposer dans la mer.

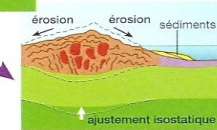


L'intervention de phénomènes liés à la dynamique du globe

Des réajustements isostatiques



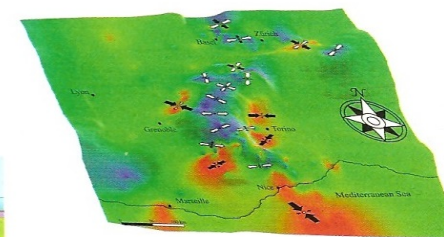
Des roches formées en profondeur...



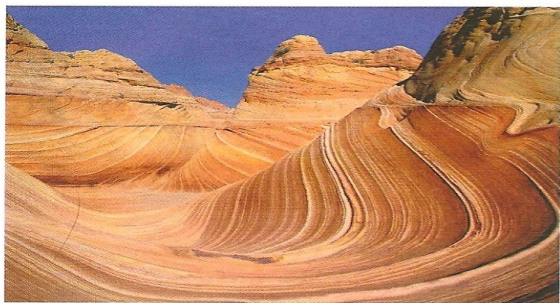
... finissent par affleurer en surface.

Des effondrements liés à une distension

Le jeu de failles normales dans la zone centrale de la chaîne contribue à la disparition des reliefs.

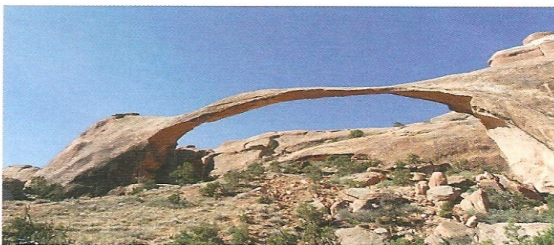


Découvrir de spectaculaires figures d'érosion



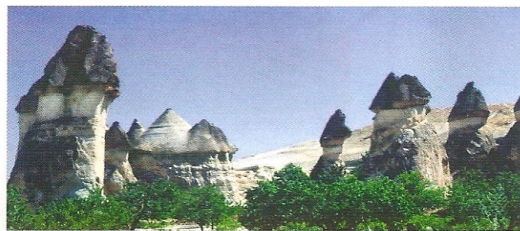
• Le parc national des Arches se trouve au sud de l'Utah (ouest des États-Unis). Il doit son nom à la présence de près de 2 000 **arches** comme celle de la *photographie ci-contre*. L'action combinée de l'eau et de fortes amplitudes thermiques a enlevé les grès les plus tendres tout en laissant les parties supérieures les plus résistantes, créant ainsi une ouverture. Avec le temps, cette « fenêtre » s'agrandit, l'arche devenant de plus en plus fine. Elle finira par s'effondrer progressivement, comme cela s'est produit, en 1991, au niveau de Landscape Arch où des blocs de grès se sont séparés de l'arche.

• Dans le sud-ouest des États-Unis, au nord de l'Arizona, se trouvent les Buttes du Coyote, formations géologiques remarquables (et site touristique très réglementé). En effet, on peut y voir des **figures d'érosion** spectaculaires et uniques au monde, comme « La Vague » (*photographie ci-contre*). Il s'agit de fines **couches de grès** (datées de – 190 Ma), plus ou moins dures, usées par l'action du vent et de la pluie.



• Ce « **rocher champignon** », dans le désert de Libye, est une figure caractéristique des zones arides soumises à l'érosion éolienne. En effet, sous l'**action abrasive des grains de sable** transportés par le vent, les roches sont usées : on parle de **corrasion**. L'efficacité maximale de l'usure se situe vers 1 à 1,50 m de hauteur, zone où la plus grande partie des grains de sable qui se déplacent vient frapper le rocher. Plus haut d'une part, au ras du sol d'autre part, l'action érosive est moins importante.

• En Turquie, dans la région de Cappadoce, se dressent des formations géologiques spectaculaires. Il s'agit de « **cheminées de fée** » ou « **demoiselles coiffées** » formées de plusieurs couches de roches. Une couche supérieure basaltique (ancienne coulée de lave), foncée et résistante, recouvre une couche d'ignimbrites (roches formées de débris de lave), plus friable. La coulée de lave a été en grande partie déblayée par l'érosion, mais certains blocs de basalte sont restés en place, protégeant ainsi les terrains sous-jacents de l'érosion par les eaux de ruissellement. Ainsi, se forment des « cheminées » dont tous les chapeaux sont à la même hauteur (la base de l'ancienne coulée).



Cheminées de Göreme en Cappadoce (Turquie)

Maîtriser ses connaissances

Pour s'entraîner

1 Définissez les mots ou expressions

Érosion, altération, vitesse d'érosion, sédimentation, flux sédimentaire, réajustement isostatique, recyclage de la lithosphère continentale.

2 Vrai ou faux ?

Repérez les affirmations exactes et corrigez celles qui sont inexactes.

- Il y a 300 Ma, se dressait en Europe une chaîne de montagnes du type Himalaya.
- L'ordre de grandeur des vitesses d'érosion actuelles est le mètre par an.
- 100 millions d'années sont nécessaires à l'aplanissement d'une chaîne de montagnes.
- Tous les produits de l'altération sont transportés.
- Tous les produits de l'altération sont transportés en suspension dans l'eau.
- Les réajustements isostatiques permettent d'expliquer la remontée de roches profondes en surface.
- Les Alpes ne sont affectées que par des contraintes tectoniques compressives.

3 Questions à réponse courte

- Indiquez les principaux mécanismes qui permettent l'aplanissement d'une chaîne de montagnes.
- Quelle est l'origine des sédiments déposés par le Gange, au niveau de son delta ?
- Expliquez la relation entre l'érosion et les réajustements isostatiques au niveau d'une chaîne de montagnes.
- Quelle est la conséquence de la présence de failles normales actives au cœur des Alpes ?

4 Justifiez ces affirmations

- Le Massif armoricain est une chaîne de montagnes plus ancienne que les Alpes.
- L'eau est le principal agent d'altération des roches.
- Les flux sédimentaires permettent d'estimer les vitesses d'érosion.
- Sans les réajustements isostatiques, quelques millions d'années seraient suffisants pour aplanir une chaîne de montagnes.

Objectif BAC

5 L'altération des roches

La *photographie ci-dessous* montre la surface d'un granite altéré.



QUESTION DE SYNTHÈSE :
Expliquez l'action de l'eau dans l'altération d'un granite.

6 La formation du delta du Rhône

QUESTION DE SYNTHÈSE :
Expliquez l'ensemble des phénomènes géologiques à l'origine de la formation du delta du Rhône.

7 L'aplanissement des chaînes de montagnes

A. QUESTIONS À CHOIX MULTIPLES

QCM

Choisissez la bonne réponse pour chaque série d'affirmations.

- L'altération et l'érosion des roches :
 - sont les seuls mécanismes permettant l'aplanissement d'une chaîne de montagnes ;
 - ne débutent que lorsque l'altitude de la montagne est maximale ;
 - débutent dès l'apparition des premiers reliefs ;
 - sont les résultats de la seule action de l'eau.
- Érosion et réajustements isostatiques :
 - sont deux mécanismes indépendants l'un de l'autre ;
 - sont interdépendants ;
 - participent à l'élévation des reliefs ;
 - participent à l'enfouissement des roches de surface.

B. QUESTION DE SYNTHÈSE :

Expliquez les mécanismes mis en jeu dans l'aplanissement d'une chaîne de montagnes.

Votre exposé sera accompagné de schémas.

Utiliser ses compétences

8 Une roche latéritique : la bauxite

Exploiter un ensemble de documents en relation avec les connaissances, pratiquer une démarche scientifique

Exercice TYPE
BAC

QUESTION :

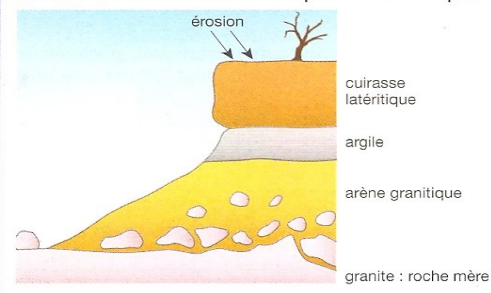
À partir de l'exploitation des documents et de vos connaissances, expliquez la formation d'une roche latéritique comme la bauxite.



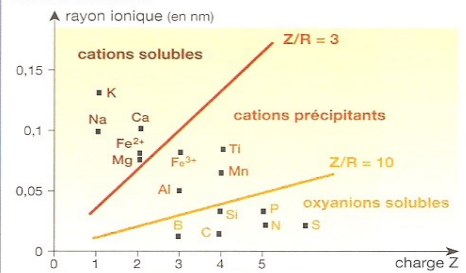
DOCUMENT 1 : les caractéristiques de la bauxite
La bauxite est une roche dite « latéritique », assez tendre, de couleur blanche, jaunâtre ou rouge (photographie). Elle contient une quantité importante d'alumine (au moins 40 % d' Al_2O_3) et d'oxyde de fer. Cette roche est exploitée comme minéral d'aluminium.
La bauxite se forme en milieu tropical à partir de l'altération du granite. La bauxite des Baux-de-Provence s'est formée à la fin de l'ère secondaire (Mésozoïque).

La bauxite doit son nom à sa découverte, en 1821, aux environs des Baux-de-Provence

DOCUMENT 2 : une cuirasse latéritique en milieu tropical



DOCUMENT 3 : solubilité des ions selon le diagramme de Goldschmidt



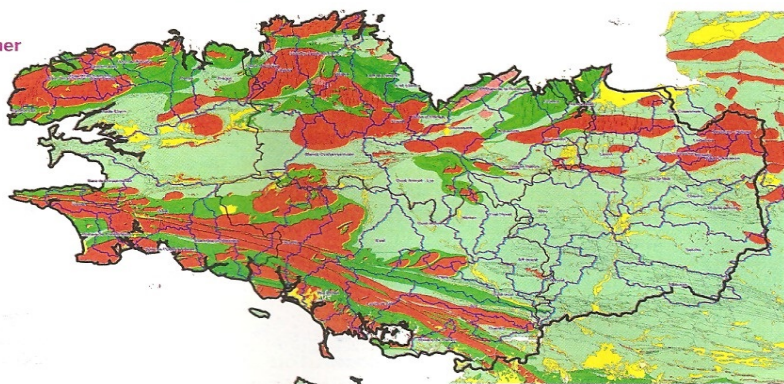
9 Le Massif armoricain

Extraire des informations, raisonner

QUESTION :

À partir de vos connaissances et de l'exploitation de la carte géologique et de sa notice, expliquez la présence de granites en surface dans le Massif armoricain.

Légende
■ Roches magmatiques (granites...)
■ Roches métamorphiques (micaschistes, gneiss...)
■ Roches sédimentaires



Utiliser ses capacités expérimentales

10 Les chaînes de montagnes en France

Utiliser des cartes géologiques

SE PRÉPARER
aux épreuves pratiques
du BAC

■ Problème à résoudre

À partir de l'ensemble des potentialités du site Infoterre (BRGM), justifiez les termes de chaînes de montagnes « anciennes » et chaînes de montagnes « récentes » en France.

■ Matériel disponible

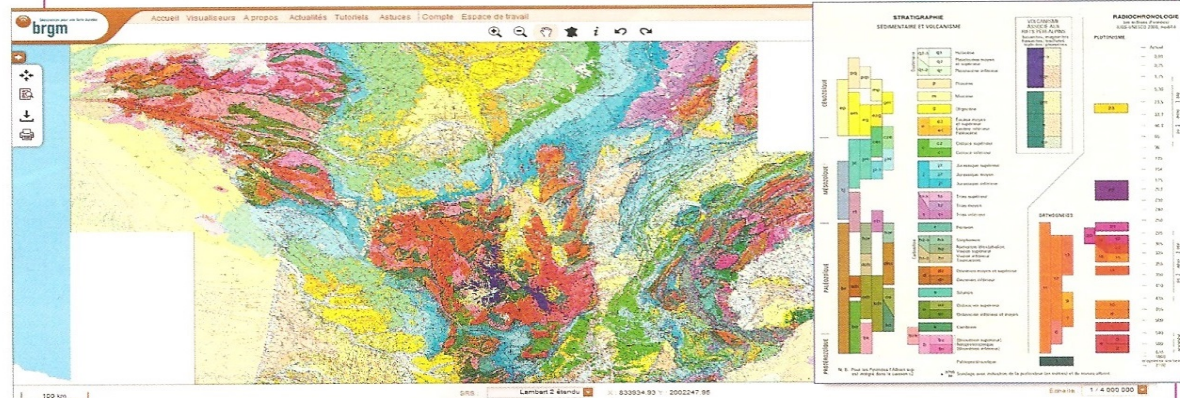
- Site Infoterre du BRGM.
- Fiche d'aide à l'utilisation du site.

■ Mise en œuvre d'une démarche

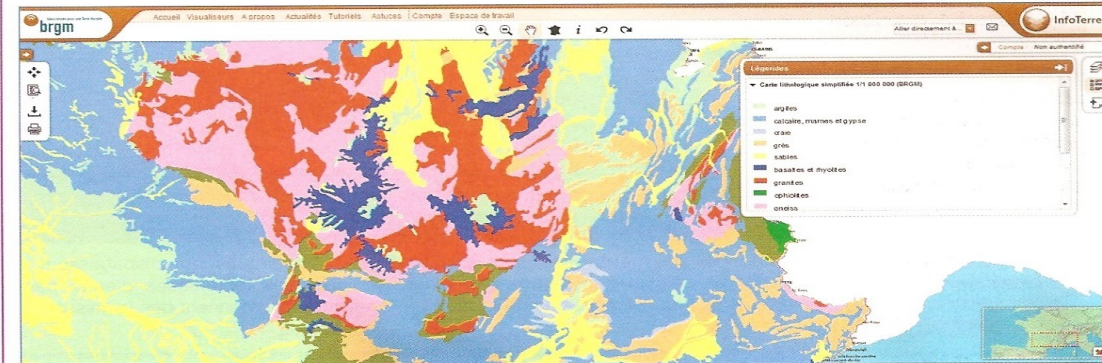
- Affichez la carte géologique de la France (version détaillée ou version simplifiée) et sa notice.
- Vous pouvez zoomer sur une région, un lieu précis, relever la topographie, la nature géologique des terrains.

■ Exploitation et communication des résultats

- Présentez les résultats de votre étude sous la forme d'un tableau comparatif. On attend la comparaison au minimum de deux massifs montagneux.
- Justifiez les qualificatifs de montagnes « anciennes » et montagnes « récentes » que l'on peut attribuer aux massifs étudiés.



La carte géologique au 1/1 000 000° de la France et sa notice



Une carte géologique simplifiée du Massif central et des Alpes et sa notice

Cycle des matériaux de la croûte continentale

