

Chapitre 25

Modèles des paysages et transferts de matériaux en surface

Cours

PLAN DU CHAPITRE

- 1 Facteurs à l'origine du modelé des paysages
- 2 Processus d'altération chimique : hydrolyse et dissolution
- 3 Processus d'érosion et d'entraînement de matière

ZOOM

- 1 Altération et érosion à l'origine du modelé glaciaire
- 2 Structure des argiles et hydrolyse des silicates
- 3 Équilibre des carbonates et facteurs influençant la dissolution de la calcite

INTRODUCTION

Les roches des continents sont soumises à l'action des facteurs externes qui affectent les surfaces topographiques et en dessinent les formes, ce qui définit le **modelé des paysages**. Les processus **d'altération** et **d'érosion** mis en jeu libèrent **des particules et des solutés**, qui peuvent être transportés par différents vecteurs avant de sédimenter dans d'autres milieux.

- Quels facteurs expliquent la diversité des modelés des paysages observés ?
- Comment sont dégradées chimiquement et physiquement les roches à la surface de la Terre ?

1 Facteurs à l'origine du modelé des paysages

1.1 Les paysages : résultats de différents processus

Les reliefs, irrégularités de la surface terrestre, sont dus à l'action conjuguée de **phénomènes constructeurs** (forces tectoniques, volcanisme, poussée d'Archimède et isostasie, variations du niveau marin) et de **phénomènes destructeurs** (instabilité des roches loin de leurs équilibres thermodynamiques ou chimiques dans les conditions de surface).

Deux processus essentiels sont impliqués dans l'aplanissement des reliefs :

- les **processus d'altération** : désagrégation mécanique et chimique des roches et de leurs minéraux par les agents atmosphériques et biologiques. Ces processus aboutissent à la production de **constituants en suspension** (particules rocheuses) et **en solution** (en général des ions), évacués par l'écoulement des eaux, et laissent en place des **roches résiduelles**.
- les **processus d'érosion** : ensemble des processus d'ablation, d'entraînement de matériaux, altérés ou non, par des agents climatiques (eau liquide, glace, vent).

! Attention !

Il existe une certaine ambiguïté sur les termes d'érosion et d'altération dont les définitions peuvent varier. Les auteurs utiliseront les définitions ci-dessus tout au long de cet ouvrage.

1.2 Action des facteurs intrinsèques

a) Influence du facteur lithologique

Les roches à faible cohésion entre minéraux (argilites, marnes ou micaschistes altérés...) sont plus sensibles au ruissellement que les roches à forte cohésion entre minéraux (calcaires, grès, granites compacts...). Par ailleurs, certains minéraux sont plus ou moins sensibles à l'altération chimique (voir § 2.1).

b) Influence de la structure géologique

En région sédimentaire, la disposition des couches marque de manière importante les caractères des paysages. Les régions **tabulaires** et **monoclinales** formeront des cuestas et des buttes témoins au niveau des strates plus résistantes à l'altération. Les paysages plissés donnent selon les cas des **reliefs conformes** ou **reliefs inverses**. Dans les premiers, les anticlinaux forment des monts et les synclinaux des vaux (cas du relief jurassien). Les seconds sont caractérisés par des synclinaux perchés séparés par des anticlinaux profondément entaillés (cas du relief subalpin, figure 25.1).

Voir TP15 et TP20

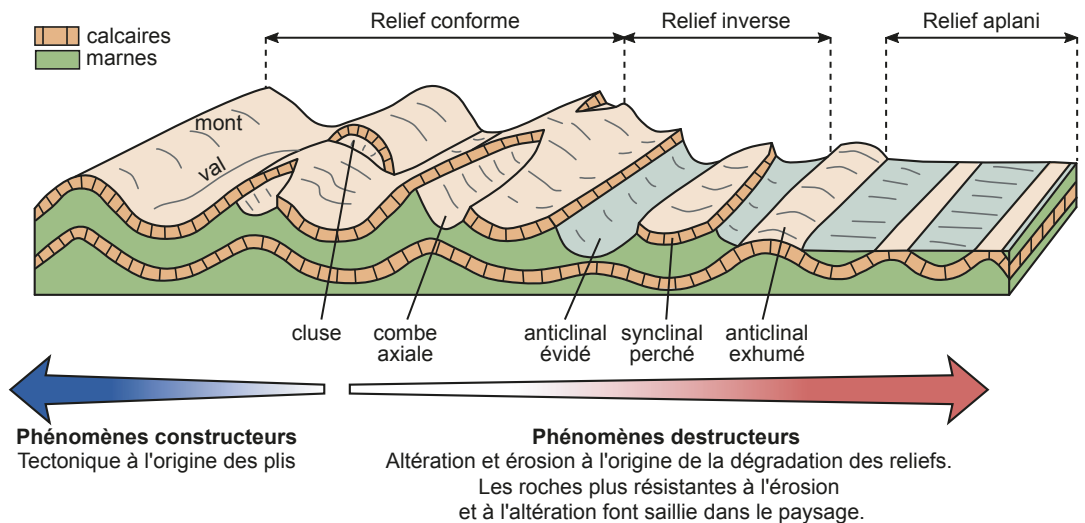


Figure 25.1 Phénomènes constructeurs et destructeurs dans la formation des paysages.

L'altération et l'érosion s'exercent ainsi de manière différente sur les matériaux, ce qui produit une **altération et une érosion différentielles** de ceux-ci, souvent bien observable dans les paysages (les roches les plus résistantes font saillie dans le paysage).

1.3 Action des facteurs extrinsèques

a) Influence du climat.

- **L'eau** est le principal agent d'altération, de transport et d'érosion. **Agent chimique d'altération**, l'eau liquide intervient dans les processus d'hydrolyse et de dissolution. **Agent mécanique d'altération**, l'eau peut fragmenter les roches lors de ses changements d'état par cryoclastie. **Agent de transport et d'érosion**, l'eau incise les vallées soit sous forme liquide, donnant les vallées fluviales en V, soit sous forme solide, donnant les vallées glaciaires en U (vallées en auge) (figure 25.2).
- **La température** est également un facteur déterminant de l'altération, accélérant les réactions chimiques. Elle peut aussi favoriser la désagrégation physique des minéraux par leur dilatation différentielle, ce qui correspond à la **thermoclastie**.
- **Le vent** peut être à l'origine d'une déflation arrachant les particules des sédiments meubles, principalement dans les régions désertiques (érosion éolienne).

ZOOM 1

Altération et érosion à l'origine du modelé glaciaire

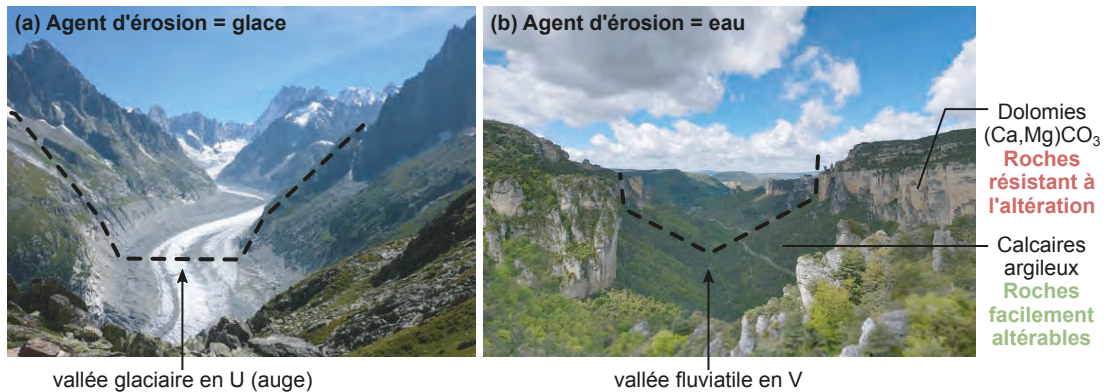


Figure 25.2 Comparaison de la morphologie de vallées glaciaires et fluviales selon le type d'agent d'érosion.

(a) Mer de glace, Haute-Savoie ; (b) vallée de la Jonte, Lozère. L'altération différentielle entre dolomite [(Ca,Mg) CO₃] et calcite (CaCO₃) influence aussi la morphologie du paysage.

b) Influence de la végétation

À l'échelle de la roche, les racines peuvent accélérer l'altération (fragmentation, sécrétion de protons qui favorisent la dissolution des carbonates). À l'échelle du paysage, les végétaux stabilisent les terrains, freinant ainsi l'érosion.

Le modelé des paysages résulte ainsi de l'action combinée de différents facteurs mettant en jeu **conditions climatiques** et **nature des roches**, plus ou moins sensibles à l'altération et à l'érosion, et s'exerçant de manière variée selon les **structures géologiques**.

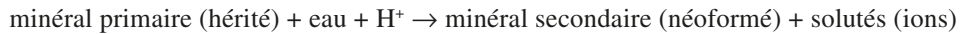
Selon l'influence prépondérante de ces paramètres, on pourra distinguer des **morphologies lithologiques** (modelé granitique ou modelé karstique), **structurales** (morphologies en structure plissée ou monoclinale) ou **climatiques** (modelé glaciaire).

2

Processus d'altération chimique : hydrolyse et dissolution

2.1 Altérabilité différentielle des minéraux

L'altération chimique correspond à l'action de l'eau qui hydrolyse ou dissout totalement ou partiellement les minéraux et participe à des réactions d'oxydoréduction. L'**hydrolyse** est souvent acide et des protons interviennent dans le bilan réactionnel :



- Les principales règles d'**altérabilité des minéraux** sont les suivantes (figure 25.3) :
 - plus les minéraux des roches magmatiques sont éloignés de leur température de cristallisation, plus ils sont altérables. Leur altération en surface conduit à des minéraux néoformés (argiles, oxydes) stables dans les conditions de surface et donc eux-mêmes peu altérables ;
 - les minéraux des roches sédimentaires formés dans des conditions de subsurface (calcite, gypse, halite) sont très altérables notamment par dissolution (figure 25.3) ;
 - plus un minéral contient de cations solubles, c'est-à-dire échangeables par H^+ , plus il est altérable.
- Les principales règles d'**altérabilité des roches** sont les suivantes :
 - les **roches acides** riches en quartz et feldspaths potassiques (granites, orthogneiss...), minéraux difficilement hydrolysables sont moins altérables que les **roches basiques ou ultrabasiqes** (basalte, péridotite) composées de minéraux plus facilement hydrolysables (olivine, pyroxène, plagioclases calciques...);
 - les roches volcaniques sont plus altérables que les roches plutoniques car le **verre est plus altérable** que les minéraux cristallisés.

Voir TP 16 Les roches

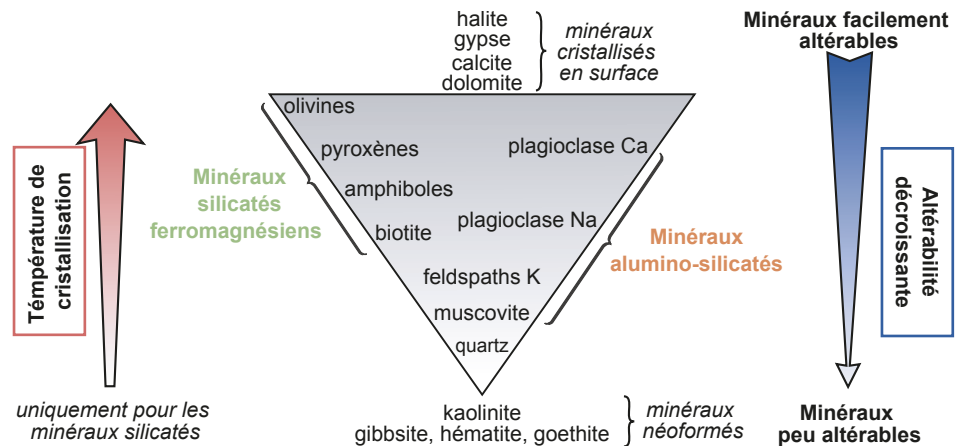


Figure 25.3 Séquence d'altérabilité des principaux minéraux des roches à l'affleurement. (Modifié d'après Goldich - 1938).

2.2 Hydrolyse des silicates sous contrainte climatique

a) Altération d'une roche mère granitique : arénisation ou latérisation

- **Arénisation en climat tempéré** : elle correspond à une perte partielle de l'identité structurale, minéralogique et chimique de la roche mère (figure 25.4a).

L'altération du granite en climat tempéré engendre une arène granitique, formation rocheuse grossière de quelques mètres d'épaisseur, contenant encore des minéraux héri-

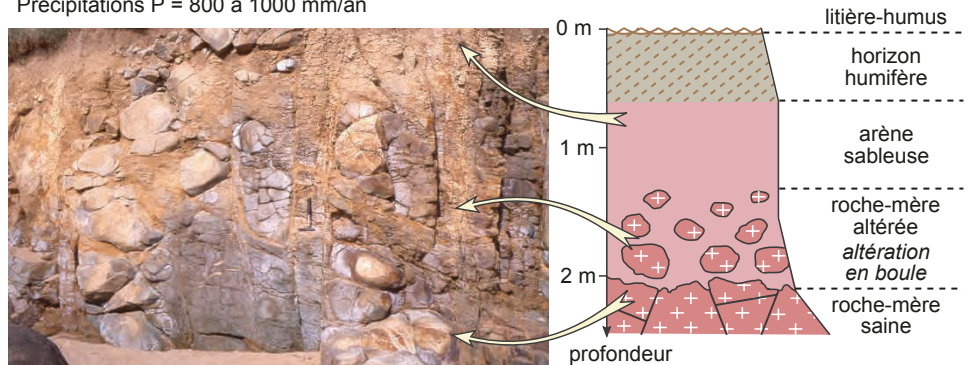
tés du granite (quartz, feldspaths, micas) et des minéraux néoformés (argiles de type 2/1 (tableau 25.1)). L'infiltration des eaux le long des diaclases (ou fractures) de la roche mère est à l'origine d'une altération localisée formant des boules prises au sein de l'arène. La formation d'un chaos granitique a lieu si l'arène est évacuée par le ruissellement, ne laissant sur place que les boules granitiques.

- **Latérisation en climat tropical humide** : elle correspond à une perte totale de l'identité structurale minéralogique et chimique de la roche mère (figure 25.4b).

Sur quelques dizaines de mètres d'épaisseur, on peut observer une cuirasse riche en oxydes d'aluminium et de fer et renfermant des concrétions bauxitiques. La dégradation du granite est tellement importante qu'il ne reste plus (ou très peu) de traces de la roche mère en surface.

(a) Altération en milieu tempéré

Température moyenne annuelle T = 12°C,
Précipitations P = 800 à 1000 mm/an



(b) Altération en milieu tropical humide

Température moyenne annuelle T = 27°C,
Précipitations P = 2500 à 4500 mm/an

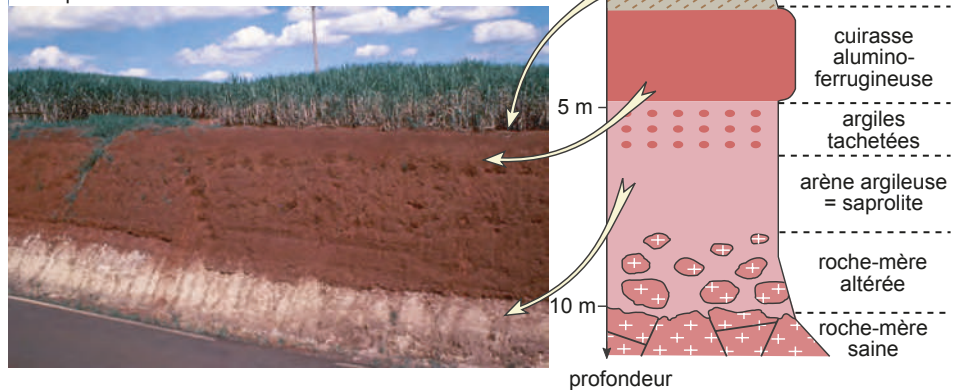


Figure 25.4 Organisation schématique de deux sols issus de l'altération d'un granite sous climat tempéré (a) et sous climat tropical humide (b).

b) Hydrolyse des silicates et néoformation d'argiles

L'hydrolyse des silicates, constitués de tétraèdres de silice SiO_4^{4-} et de cations, peut être :

- **partielle** : des minéraux résiduels contenant encore des cations persistent. Les nouveaux minéraux formés sont des argiles, silicates d'alumine formés d'empilements de feuillets



(phyllosilicates) de quelques angströms d'épaisseur et dans lesquels alternent des couches de tétraèdres silicatés et d'octaèdres alumineux ou magnésiens hydratés. Les argiles peuvent être formées de feuillets de constitutions différentes :

- **type 2/1 ou TOT** : 2 couches de tétraèdres pour 1 couche d'octaèdres (ex. de l'illite). Le processus à leur origine est appelé **bisiallittisation**, il correspond à un lessivage modéré, maintenant des cations (Ca^{2+} , K^+ , Na^+) en position interfoliaire (désalcalinisation incomplète) ;
- **type 1/1 ou TO** : 1 couche de tétraèdres pour 1 couche d'octaèdres (ex. de la kaolinite). Elles résultent d'une **monosiallittisation**, lessivage plus intense, provoquant un départ complet des alcalins (désalcalinisation totale).

- **totale** : les cations insolubles (Al^{3+} , Fe^{3+} , Ni^{2+}) sont les seuls à ne pas avoir été lessivés et ont précipité sous forme d'**oxy-hydroxydes** (ex. de la gibbsite). On parle d'**allittisation**.

ZOOM 2

Structure des argiles et hydrolyse des silicates

Tableau 25.1 Récapitulatif des différents processus d'hydrolyse des silicates.

	Hydrolyse partielle		Hydrolyse totale
Bilan	Désilicification incomplète		Désilicification totale
	Désalcalinisation incomplète	Désalcalinisation totale	
Minéraux formés	Phyllosilicates 2/1 (TOT) <i>ex. illite</i>	Phyllosilicates 1/1 (TO) <i>ex. kaolinite</i>	Hydroxydes d'Al <i>ex. gibbsite</i>
Cations interfoliaires	Na^+ , Ca^{2+} , K^+	-	-
Processus	Bisiallittisation	Monosiallittisation	Allittisation

c) Formations résiduelles d'oxydes et hydroxydes des latérites

Les cuirasses latéritiques formées en climat tropical humide concentrent certains oxydes et hydroxydes insolubles dans l'eau qui peuvent constituer des ressources minérales **potentielles**.

- **Latérites alumineuses** riches en **alumine** (Al_2O_3) ou en **gibbsite** ($\text{Al}(\text{OH})_3$).

Elles sont issues de l'altération de roches acides (granites, gneiss, sédiments argileux, riches en silice et alcalins) et plus rarement basiques (gabbros) et forment des **bauxites** (du nom du village des Baux-de-Provence) dont l'aluminium est extrait. Les bauxites blanches, très riches en aluminium sont davantage exploitées que les bauxites rouges, plus riches en oxydes de fer (donc moins riches en aluminium).

- **Latérites ferrugineuses** riches en **hématite** (Fe_2O_3) ou **goethite** ($\text{FeO}(\text{OH})$).

Issues de l'altération de roches basiques et ultrabasiques (péridotites, basaltes), elles peuvent aussi contenir du nickel sous forme de **garniérite** (une serpentine riche en nickel). L'enrichissement peut être suffisamment important pour conduire à une exploitation (cas des gisements de nickel de Nouvelle Calédonie).

d) Bilan : influence du climat dans l'intensité de l'hydrolyse

Les deux principaux paramètres climatiques (température et pluviométrie) sont indispensables à l'altération. Ainsi l'altération est d'autant plus intense sous climat tropical humide. En milieu désertique, malgré de très fortes températures, l'absence d'eau ne permet pas une hydrolyse des silicates. Aux moyennes et hautes latitudes, les températures plus modestes ne

favorisent pas l'altération chimique malgré des précipitations qui peuvent être abondantes. On observe donc :

- Une variation de l'intensité potentielle de l'altération chimique selon les ceintures climatiques (figure 25.5).
- Une variation du type d'altération, à dominante physique en climat froid (cryoclastie), chimique en climat chaud et humide.

Le type d'altération peut cependant être notablement modifié par les conditions locales.

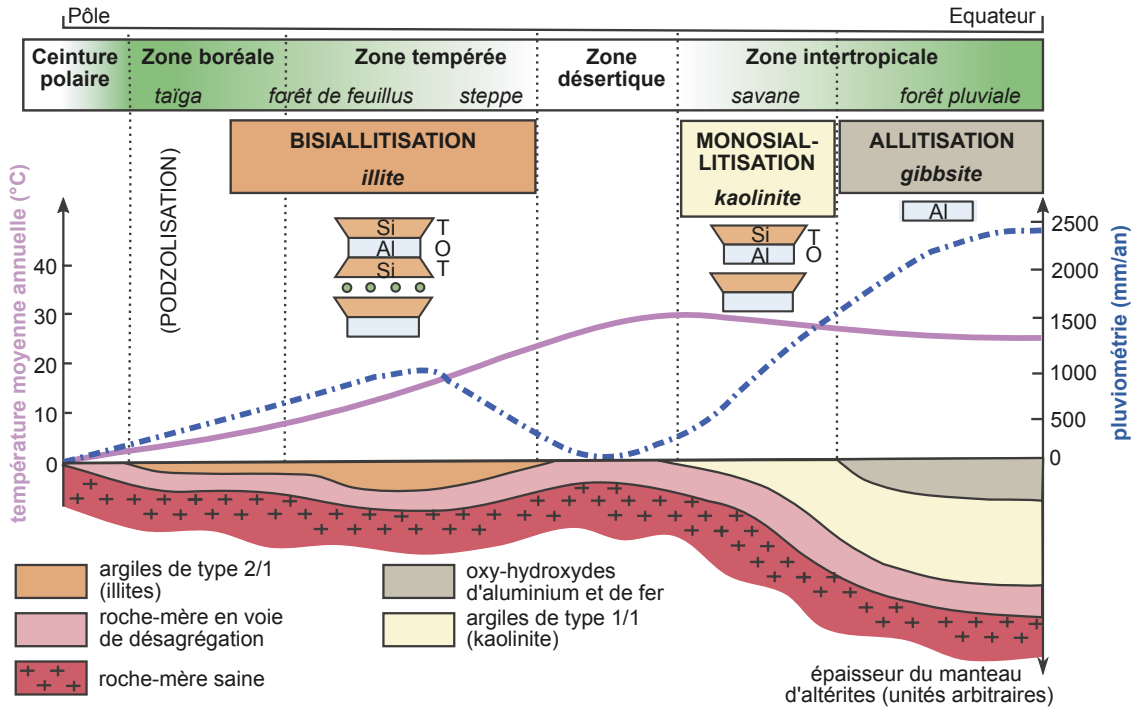


Figure 25.5 Les grands types d'altération potentielle sur substratum cristallin granito-gneissique selon la latitude.

(D'après Pedro, 1975).

2.3 Dissolution des carbonates et formation de modelés karstiques

Le **modelé karstique** est principalement gouverné par le processus de dissolution de la calcite (figure 25.6).

Les roches carbonatées (calcaires, dolomies, marnes) constituent 15 % des surfaces continentales. La formation de carbonate de calcium est en équilibre avec sa dissolution selon la réaction globale :



Une plus grande proportion de CO_2 atmosphérique ou un **pH** plus acide de l'eau favorisent un déplacement de la réaction vers la droite et donc la dissolution de la calcite. Les êtres vivants du sol produisent du CO_2 et des protons, ce qui favorise la dissolution des calcaires.

La dissolution génère un **réseau de cavités souterraines** en profondeur et des **reliefs creusés** (comme les canyons) et **ruiniformes** en surface. Elle est par ailleurs à l'origine d'eaux ruis-

ZOOM 3

Équilibre des carbonates et facteurs influençant la dissolution de la calcite

selantes ou percolantes riches en carbonate et calcium qui peuvent donner lieu à de nouvelles précipitations dans des milieux moins riches en CO_2 : concrétions calcaires dans les cavités (stalactites, stalagmites) et au niveau des résurgences (travertins).

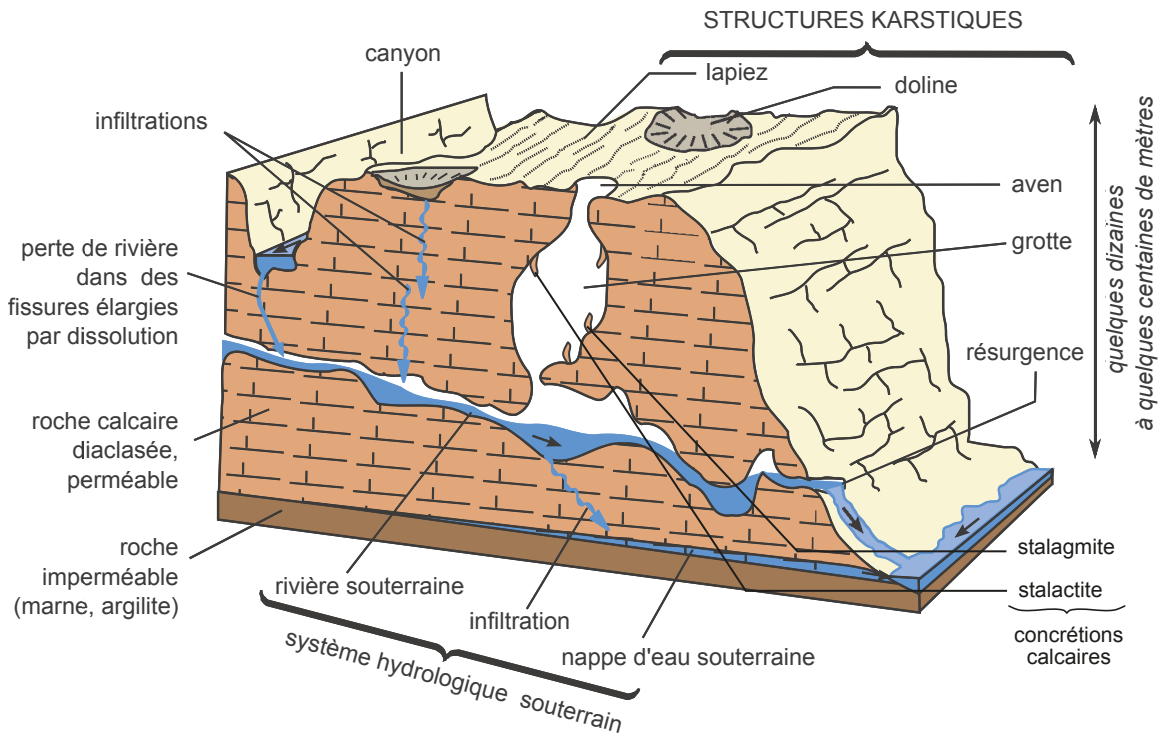


Figure 25.6 Altération des carbonates et formations de reliefs karstiques.

Lapiez : figures de dissolution en forme de cannelures ; **dolines** : cuvettes de dissolution. La dissolution forme en profondeur des **gouffres** ou avens débouchant sur des **grottes**.

3 Processus d'érosion et d'entraînement de matière

Le résultat de l'altération est la production de particules (minéraux résiduels ou néoformés) et de solutés dissous que l'érosion entraîne sous forme de flux de matière en solution ou en suspension. Ce flux associe ainsi deux lignées : la **lignée détritique** et la **lignée ionique**. Il conduit à un tri minéralogique et chimique des matériaux transportés.

3.1 Tri granulométrique au cours du transport des matériaux

a) Comportement des particules détritiques : diagramme de Hjulström

L'eau liquide est le principal agent de transport des particules en suspension (**lignée détritique**). La capacité de l'eau à éroder, à transporter ou encore à laisser sédimenter sa charge détritique est régie par plusieurs variables (vitesse du courant, densité et viscosité de l'eau, taille et densité des particules...) dont les effets ont été étudiés expérimentalement par Hjulström (figure 25.7). Pour une taille donnée de particules, seule une vitesse élevée du courant permet d'éroder et de transporter ; cette vitesse croît avec le diamètre des particules. Il apparaît toutefois sur ce graphique un comportement particulier des petites particules argileuses : une fois agrégées,

celles-ci développent des forces de cohésion considérables (liaisons électrostatiques) et résistent ainsi davantage aux forces de cisaillement qui pourraient les mettre en suspension ; seules des vitesses très élevées sont aptes à les éroder.

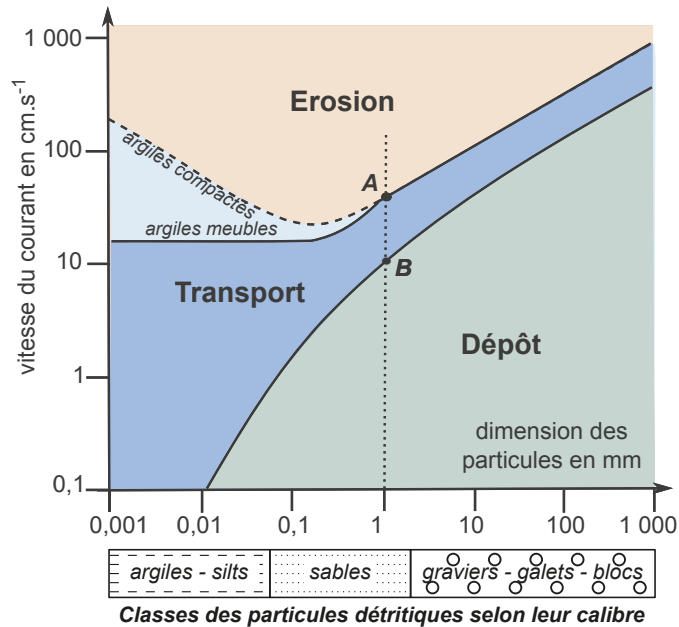


Figure 25.7 Comportement des particules détritiques dans un courant d'eau en fonction de leur dimension et de la vitesse du courant.

(D'après Hjulström 1939). Pour un diamètre de 1 mm, en deçà d'une vitesse limite (A), seul le transport est possible (les particules ne peuvent être érodées) et, en deçà de 10 cm.s⁻¹ (B), il y a dépôt.

b) Morphologies fluviales et tri granulométrique

Le domaine continental, siège de l'érosion, est également une des premières aires de sédimentation. La décélération progressive du courant des fleuves conduit peu à peu au dépôt d'une fraction de leur charge sédimentaire. La formation des plaines, se produit ainsi plutôt dans les parties aval des cours d'eau, alors que les parties amont sont plutôt le siège d'une érosion. Selon les variations hydrodynamiques, le cours d'eau peut être érosif, simple vecteur ou propice à la sédimentation de particules d'une taille donnée. Un matériau est donc mobilisé de multiples fois avant d'être définitivement sédimenté.

La variation de la vitesse du courant d'une rivière a des conséquences directes sur les **morphologies fluviales**. Par exemple au niveau d'une rivière méandrique (figure 25.8) :

- les **rives concaves** de la rivière (extérieur du méandre) sont plutôt abruptes témoignant localement d'une érosion en lien avec une vitesse de courant plus forte ;
- les **rives convexes** de la rivière (intérieur d'un méandre) montrent des pentes douces liées à un dépôt de particules au niveau de la barre de méandre en lien avec une vitesse plus faible du courant autorisant la sédimentation.

Lors de leur transport, les matériaux peuvent également être altérés selon leur nature minéralogique (figure 25.3). Au fur et à mesure de leur transport, les particules sont ainsi de plus en plus petites et de plus en plus riches en minéraux résiduels comme le quartz. On parle de **tris granulométrique et minéralogique**. Ceci peut expliquer par exemple que beaucoup de plages littorales sont sableuses et riches en quartz.

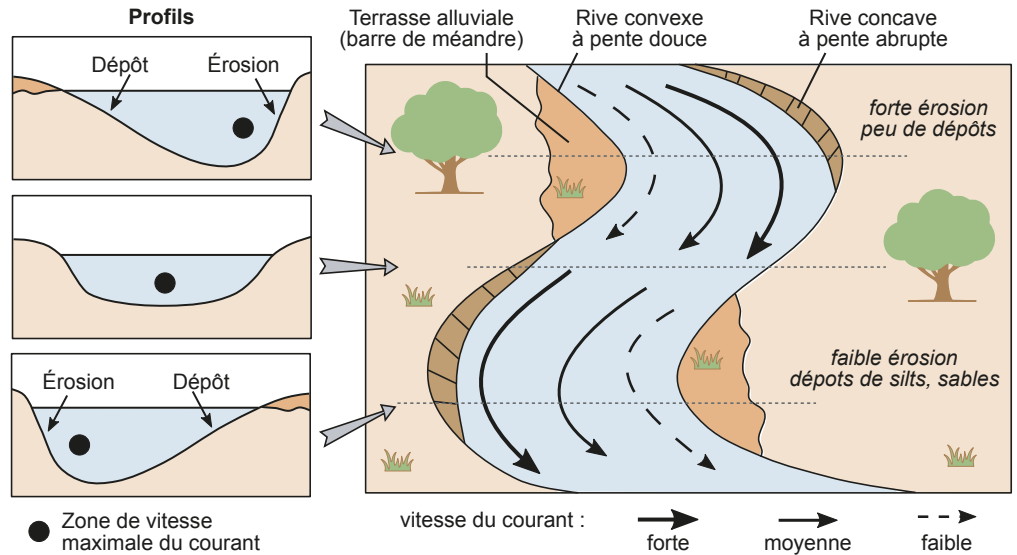


Figure 25.8 Influence de la vitesse du courant sur la morphologie fluviale.

3.2 Tri géochimique au cours du transport des solutés

L'altération produit des solutés (**lignée ionique**) dont le devenir dépend de leur comportement dans l'eau.

Les ions mis en solution peuvent être dissous ou précipiter selon l'attraction qu'ils exercent sur les molécules dipolaires d'eau qui dépend du **potentiel ionique de l'élément** selon sa charge (z) et son rayon ionique (r).

Le **diagramme de Goldschmidt** (figure 25.9) distingue différents comportements des cations, alors regroupés en plusieurs catégories :

- **cations hydratés solubles ($1 < z/r < 3$)** : attirant les dipôles d'eau, ils sont facilement entraînés par les eaux. Arrivés dans les océans, ils sont à l'origine du caractère salé de l'eau de mer (Na^+) ou, après précipitation, des calcaires et dolomies (Ca^{2+} et Mg^{2+}).

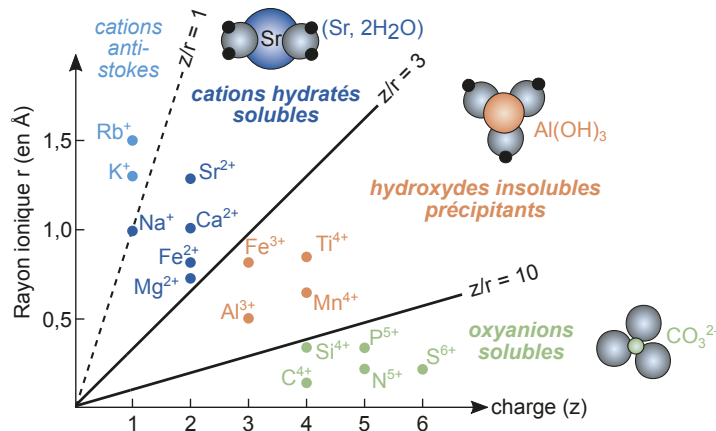


Figure 25.9 Diagramme de Goldschmidt (1937).

Solubilité dans l'eau des cations en fonction de leur charge (en abscisse) et de leur rayon (en ordonnée) définissant le potentiel ionique (z/r) précisant ainsi le devenir des éléments chimiques suite à l'hydrolyse des minéraux.

- **cations anti-stokes ($z/r < 1$)** : ils ont moins d'attraction pour la molécule d'eau et entrent plus facilement dans les structures minérales. C'est ainsi qu'on explique que les feldspaths potassiques soient moins solubles que les feldspaths calco-sodiques (plagioclases).
- **cations formant des hydroxydes insolubles ($3 < z/r < 10$)** : plus attractifs vis-à-vis de la molécule d'eau, un OH de la molécule d' H_2O se déplace vers l'ion qui précipite. Ceci explique la forte concentration *in situ* des éléments insolubles (Al^{3+} et Fe^{3+}) observée précédemment dans les cuirasses latéritiques (voir § 2.2).
- **cations formant des oxyanions solubles ($z/r > 10$)** : en exerçant une attraction tellement forte sur le pôle négatif de la molécule d'eau, ils provoquent la rupture du dipôle et la libération de protons H^+ . Les oxyanions formés sont facilement évacués par les eaux et pourront ensuite précipiter sous forme de calcaires ou de dolomies (carbonates CO_3^{2-}), de gypses (sulfates SO_4^{2-}) ou d'apatite (phosphates PO_4^{3-}).

Remarque

Érosion et durée d'aplanissement des reliefs

Des modélisations peuvent simuler le temps nécessaire pour aplanir un relief s'il n'est soumis qu'à des phénomènes d'érosion ou à une combinaison d'érosion mécanique et d'altération chimique. On constate que sous un climat tempéré, aplanir un relief d'une altitude de 1 000 m prend environ 45 Ma (on rappelle que du fait de l'isostasie, il ne suffit pas d'éroder une hauteur de 1 000 m de roche pour aplanir un relief, mais il faut également éroder l'ensemble des roches constituant la racine crustale). C'est un ordre de grandeur à retenir. Sans altération chimique, juste du fait de l'érosion mécanique il faudrait 80 à 100 Ma pour aplanir un relief de 1 000 m d'altitude. Ceci s'explique car l'altération des minéraux augmente les surfaces d'échanges et facilite ainsi l'érosion mécanique. On comprend donc que les orogènes cénozoïques relativement jeunes (Alpes, Himalaya) montrent une topographie élevée, tandis que l'érosion a eu le temps d'aplanir les reliefs liés aux orogènes anciens protérozoïques et paléozoïques (Massifs armoricain et central).

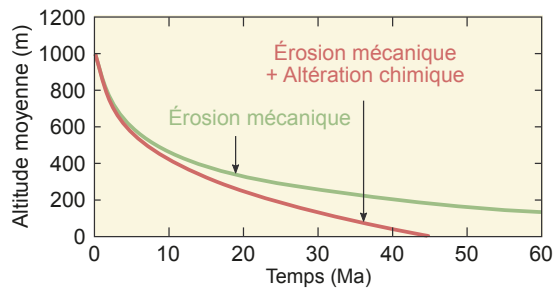


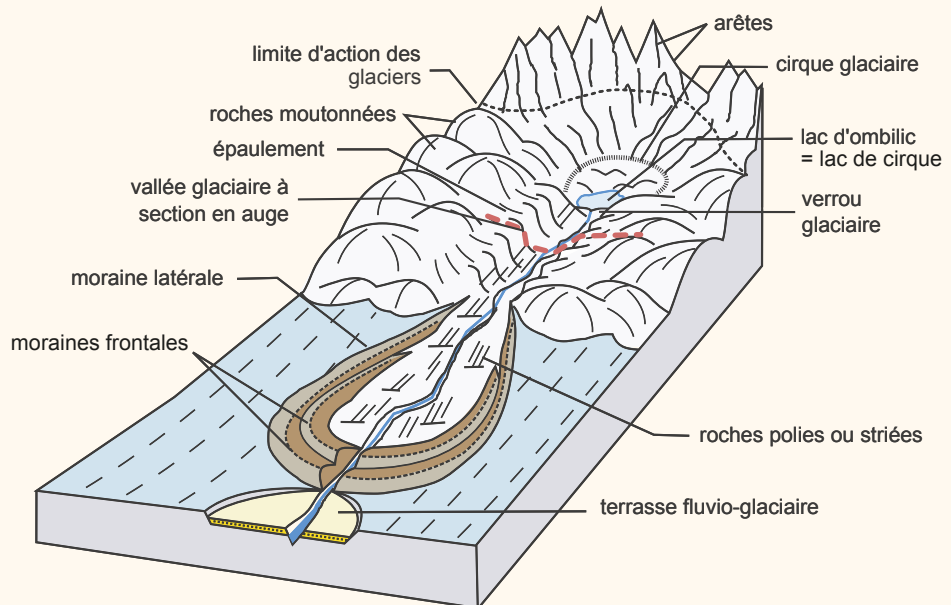
Figure 25.10 Modèle d'érosion à long terme.

Durée d'érosion d'un continent sous l'action de l'érosion mécanique seule ou combinée à une altération chimique.

ZOOM 1

Altération et érosion à l'origine du modelé glaciaire

- En région montagneuse règne un climat qui se caractérise par de forts écarts thermiques conduisant l'eau à geler (plus volumique) puis à dégeler (moins volumique). Si cette eau est piégée dans des fissures, elle entraîne leur ouverture progressive et provoque à terme une désolidarisation suivie d'un écroulement possible. Ce processus de fragmentation dénommé **cryoclastie** ou **gélifraction** est d'autant plus important que les roches présentent des discontinuités mécaniques : failles, diaclases (fractures sans déplacement), joints de stratification, plans de schistosité...
- À cette action des températures s'ajoute celle des glaciers, puissants agents d'érosion. Outre le fait qu'ils collectent tous les débris des éboulements et des avalanches des versants qui les entourent, leur écoulement le long des pentes s'accompagne d'un creusement de leur lit par raclage de la glace chargée de matériaux. Cette érosion est d'autant plus importante que les roches sont peu cohésives.
- Ce sont ainsi des fragments rocheux de tous calibres qui se retrouvent au niveau des **moraines latérales et frontales**. Suite au retrait des glaciers lors de périodes de réchauffement climatique, les vallées dégagées présentent des sections caractéristiques en **forme de U (vallées en auge)** initiées par des amphithéâtres rocheux ou **cirques glaciaires**. Les surfaces déglacées montrent des **roches polies, moutonnées**, couvertes de **stries**, cannelures produites par le raclage des glaces. Les roches moutonnées indiquent l'extension verticale maximale des glaciers. La résistance variable des roches est à l'origine de zones de rétrécissement de la vallée ou **verrous glaciaires**, où la résistance à l'érosion était la plus grande, et de **surcreusements en amont** ou **ombilics**, où la résistance à l'abrasion était moindre. Après retrait du glacier, l'ombilic est souvent occupé par un lac.



Quelques caractéristiques du modelé glaciaire (observé après le retrait du glacier).

ZOOM 2

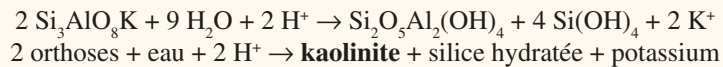
Structure des argiles et hydrolyse des silicates (exemple de l'hydrolyse d'un feldspath alcalin)

Différents processus d'intensité croissante sont à l'origine de l'hydrolyse des silicates :

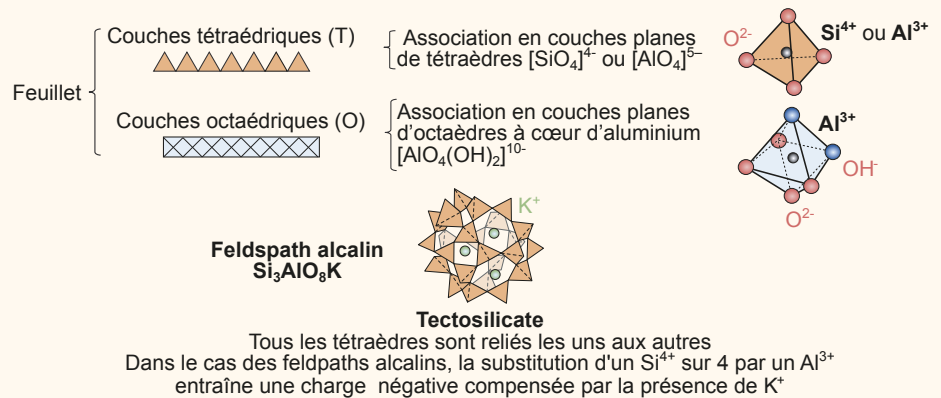
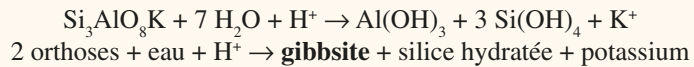
- La **bisiallisation** : lessivage partiel de la silice et des cations à l'origine d'**argiles de type 2/1 ou TOT** (feuillet formé de deux couches de tétraèdres pour une couche d'octaèdres et présence de cations en position interfoliaire) comme l'illite.



- La **monosiallisation** : lessivage total des cations associé à une perte importante de silice entraînant la formation d'**argiles de type 1/1 ou TO** (feuillet formé d'une couche de tétraèdres et d'une couche d'octaèdres, sans cations interfoliaires) comme la kaolinite.

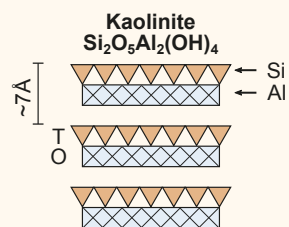
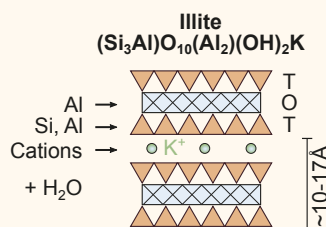


- L'**allitisation** : hydrolyse totale entraînant la disparition totale de silicates (et donc absence de formation d'argiles) et la formation d'hydroxydes d'aluminium comme la **gibbsite**.



BISIALLISATION

MONOSIALLISATION



Phyllosilicates TOT (2/1)
Les substitutions entraînent une charge négative des feuillets entre lesquels de l'eau et des cations K⁺ peuvent pénétrer.

Phyllosilicates TO (1/1)
Phyllite dioctaédrique à substitutions très limitées : chaque feuillet est électriquement neutre.

Organisation des argiles (phyllosilicates) TO et TOT issues de l'hydrolyse d'un feldspath alcalin (tectosilicate) par bisiallisation et monosiallisation.

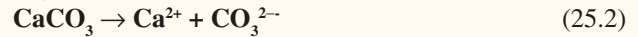
ZOOM 3

Équilibre des carbonates et facteurs influençant la dissolution de la calcite

La calcite est un minéral pouvant précipiter et être dissous aux conditions de température et de pression de surface selon la réaction d'équilibre :



Pour comprendre les conditions de solubilisation des carbonates il faut prendre en compte le **produit de solubilité** K_s de la calcite, les **réactions acide-base** de la fraction carbonatée et l'**équilibre des différentes phases du CO_2** dissous ou aqueux ($\text{CO}_{2\text{aq}}$) et atmosphérique ($\text{CO}_{2\text{atm}}$). Le produit de solubilité K_s de la calcite est déduit de la réaction :



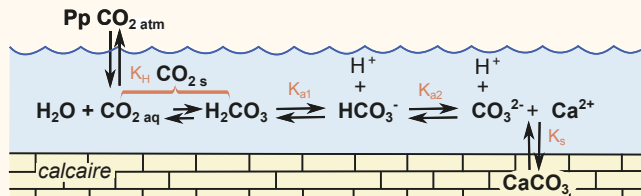
avec $K_s = [\text{Ca}^{2+}][\text{CO}_3^{2-}] = 10^{-8,42}$ à 25 °C.

Le CO_2 atmosphérique se dissout dans l'eau en $\text{CO}_{2\text{aq}}$ qui réagit avec une molécule d'eau pour donner l'acide carbonique H_2CO_3 ($\text{CO}_{2\text{aq}} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$). Comme il est difficile de différencier analytiquement ces deux formes, on est amené à mesurer globalement une concentration de CO_2 soluble tel que $\text{CO}_{2\text{s}} = \text{CO}_{2\text{aq}} + \text{H}_2\text{CO}_3$. Celle-ci est en équilibre avec la pression partielle P_p de CO_2 atmosphérique selon la loi de Henry :

$$[\text{CO}_{2\text{s}}] = K_H \cdot P_p \cdot \text{CO}_{2\text{atm}} \quad (25.3)$$

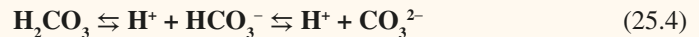
avec la constante de Henry : $K_H = 10^{-1,48} = 3,31 \cdot 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}$ à 25 °C (cette constante diminue lorsque la température augmente).

Tout processus augmentant la pression partielle en CO_2 favorise la dissolution de la calcite, alors que tout processus retirant du CO_2 favorise la précipitation.



Les divers équilibres du système des carbonates.

L'acide carbonique H_2CO_3 se comporte en diacide réagissant selon 2 réactions acides-bases successives (la concentration en H_2CO_3 est rapportée à celle de $\text{CO}_{2\text{s}}$) :



avec la constante d'équilibre ou d'acidité $K_{a1} = \frac{[\text{H}^+][\text{HCO}_3^-]}{[\text{CO}_{2\text{s}}]} = 10^{-6,35}$ soit $\text{p}K_{a1} = -\log K_{a1} = 6,35$ et $K_{a2} = \frac{[\text{H}^+][\text{CO}_3^{2-}]}{[\text{HCO}_3^-]} = 10^{-10,33}$ soit $\text{p}K_{a2} = -\log K_{a2} = 10,33$.

Le pH de l'eau contrôle ainsi ces deux réactions et par voie de conséquence les proportions des formes $\text{CO}_{2\text{s}}$ ($\text{CO}_{2\text{aq}} + \text{H}_2\text{CO}_3$), HCO_3^- et CO_3^{2-} . Il en résulte un effet sur la dissolution de la calcite :

- **si le pH augmente**, il induit un déplacement des réactions 25.4 vers la droite ce qui tend à rééquilibrer la concentration en H^+ ; l'augmentation consécutive de la concentration en HCO_3^- déplace la réaction 25.1 vers la gauche freinant ainsi la dissolution et **favorisant la précipitation de la calcite** ;
- **si le pH diminue**, il y a consommation des ions hydrogencarbonate et carbonate qui se lient aux protons de manière à rééquilibrer le pH ; la réaction 25.1 est alors déplacée vers la droite soit dans le sens d'une **plus grande dissolution de la calcite**.

Les eaux acides sont ainsi plus agressives que les eaux neutres ou basiques.

Réviser

Résumé

- Portées à l'affleurement, les roches y rencontrent des conditions physiques (P,T) et chimiques (teneur en eau) différentes de celles qui ont prévalu à leur formation, les rendant thermodynamiquement instables. Soumises à l'action des enveloppes externes, elles se fragmentent sur place par **altération physique et chimique**. Les produits obtenus, sous formes particulières et dissoutes, sont alors exportés lors de l'**érosion** par l'eau liquide, la glace et le vent.
- Les paysages qui en résultent présentent des **modelés** qui sont fonction de la nature des roches érodées et des agents d'altération et d'érosion en lien avec le type de climat. Ces modelés montrent par ailleurs des morphologies guidées par les structures géologiques.
- Les **modelés cristallin et karstique** sont deux exemples dont les caractères résultent principalement de l'action chimique de l'eau météorique. L'eau agit sur le granite en hydrolysant les silicates initiaux et conduit à la formation de nouveaux silicates, les argiles, stables dans les conditions thermodynamiques de la surface. La dissolution, autre processus majeur d'altération, qui affecte les carbonates est à l'origine de la formation de réseaux karstiques.
- Le **modelé glaciaire** est issu de l'altération majoritairement mécanique (cryoclastie) et de l'érosion par la glace à l'origine de vallées encaissées en forme d'auge et des surfaces polies par la glace, entourées de reliefs déchetés en aiguilles.
- Les produits de l'altération, particules en suspension (**lignée détritique**) et solutés dissous (**lignée ionique**), sont déblayés par l'érosion. Le transport des particules en suspension est en relation avec leur granulométrie et la vitesse du courant, ce qui est étudié dans le **diagramme de Hjulström**.
- Le comportement des ions en solution est illustré par le **diagramme de Goldschmidt** : selon leur potentiel ionique (z/r), les cations issus de l'hydrolyse ou de la dissolution des minéraux peuvent précipiter sur place dans le cas d'**hydrolysats insolubles** ou être transportés s'ils sont **solubles** sous forme **cationique** ou d'**oxyanion**, puis précipiter ultérieurement lors d'un changement environnemental (par exemple dans l'océan ou au niveau de résurgences).
- Les **quantités de produits solubles et particuliers délivrés** à l'océan dépendent au premier chef des caractéristiques des bassins versants drainés par les fleuves ; les reliefs accusés, les fortes pentes, les roches sensibles à l'altération, facilement dispersées par l'eau (marnes, argilites), les précipitations élevées et un faible couvert végétal sont autant de facteurs qui contribuent à une érosion active, surtout lorsqu'ils se conjuguent. Il y a ainsi de grandes disparités selon les régions du globe avec une contribution majoritaire de la zone équatoriale pour ce qui est des matières en suspension (particules).

Attention

- Bien distinguer altération et érosion ; l'altération est la transformation sur place des roches du sous-sol alors que l'érosion désigne les processus d'ablation et d'entraînement des matériaux altérés ou non.
- Dans un certain nombre de cas, altération et érosion se superposent : l'exportation des solutés coïncide avec la dissolution ; l'action des glaciers conjugue fragmentation et transport.
- La gibbsite n'est pas une argile car elle ne relève pas des phyllosilicates (pas de silice) mais des hydroxydes.

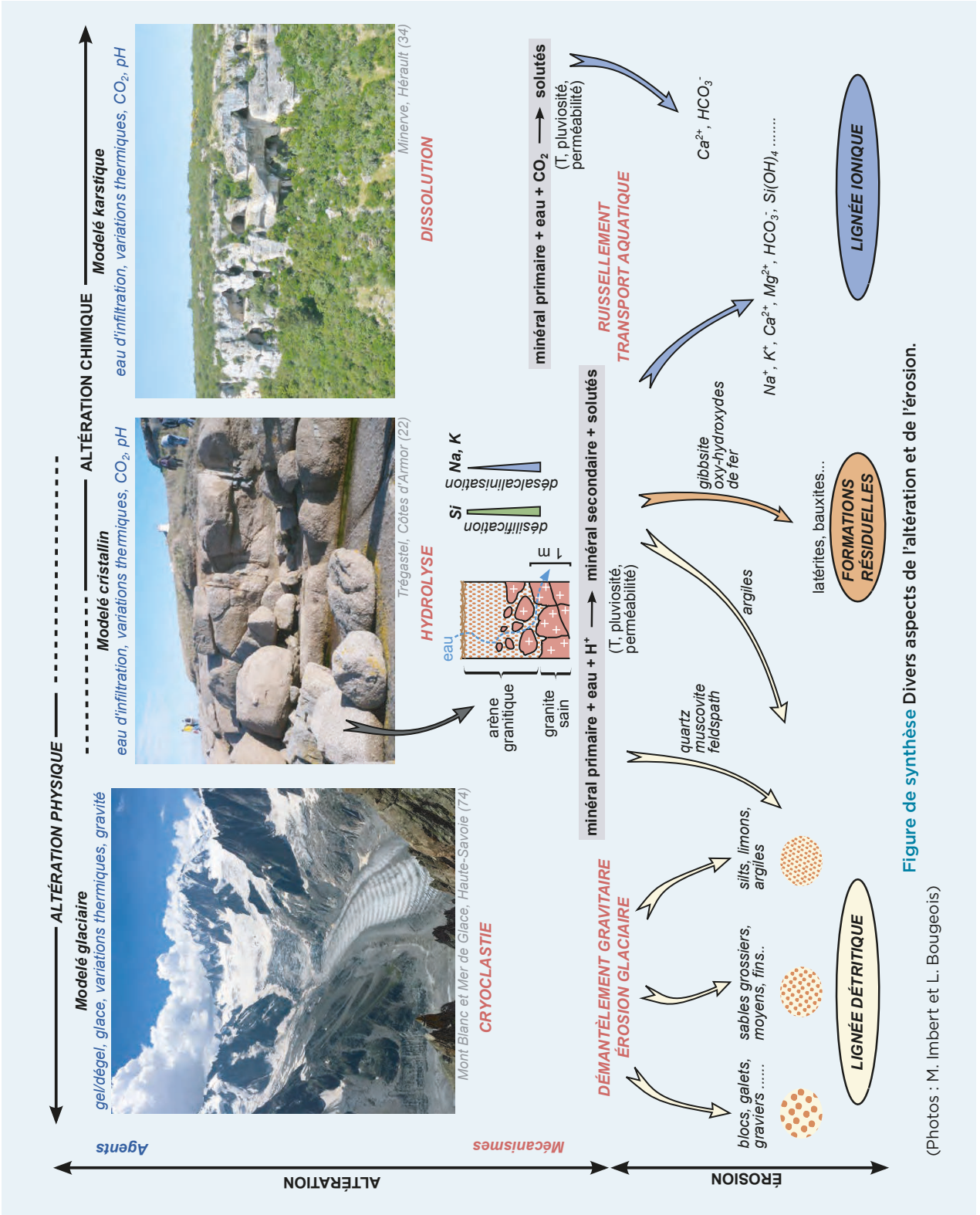


Figure de synthèse Divers aspects de l'altération et de l'érosion.

(Photos : M. Imbert et L. Bougeois)

S'entraîner

QCM de connaissances

- 1 Concernant les processus d'altération :
 - a. L'équilibre des carbonates (dissolution-précipitation) est indépendant de la température.
 - b. La désalcalinisation des silicates débute après une désilicification complète.
 - c. Ils conduisent toujours à la formation d'argiles.
 - d. L'altération peut générer des ressources minérales.
- 2 D'après le diagramme de Goldschmidt (figure 25.9) :
 - a. Les cations solubles ont en général une charge faible et un fort rayon ionique.
 - b. Les ions solubles sont toujours caractérisés par un potentiel ionique faible.
 - c. L'ion ferrique a un potentiel ionique plus élevé que l'ion ferreux.
 - d. Les ions aluminium et ferrique conduisent à la formation d'hydroxydes.
- 3 Le transport des particules détritiques :
 - a. Dépend de leur taille.
 - b. Leur mise en suspension est d'autant plus aisée que les particules sont grosses.
 - c. Ne trie pas les particules.
 - d. Influence la morphologie fluviale.

QCM à partir de documents

- 1 Le paysage de la figure 25.11 :
 - a. Est issu d'un granite altéré.
 - b. Est issu d'un calcaire altéré.
 - c. Montre un lapiaz.
 - d. Résulte de phénomènes de dissolution.



Figure 25.11 Désert de Platé, Haute-Savoie.
(Photo : D. Montex).

- 2 Le paysage de la figure 25.12 :
- a. Est issu d'un granite altéré.
 - b. Est issu d'un calcaire altéré.
 - c. Correspond à une cuirasse latéritique.
 - d. Correspond à un chaos granitique.

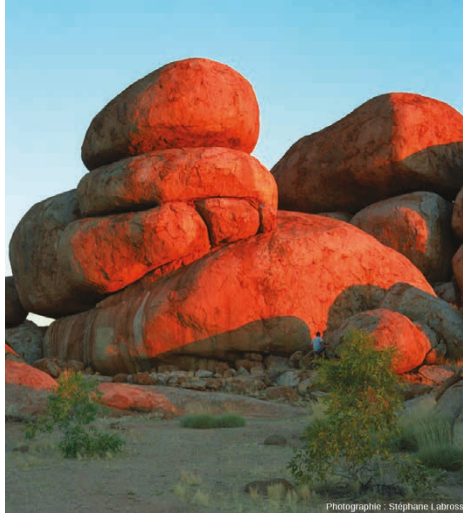


Figure 25.12 Réserve de Karlu, Australie.

(Photo : S. Labrosse).

- 3 Le paysage de la figure 25.13 :
- a. Montre des buttes témoins.
 - b. Montre des synclinaux perchés.
 - c. Est issu de la dégradation d'une structure géologique sédimentaire plissée.
 - d. Est issu de la dégradation d'une structure géologique sédimentaire tabulaire.



Figure 25.13 Grand Canyon du Colorado, Arizona, États-Unis.

(Photo : JF. Beaux).