Document téléchargeable sur le site
https://www.svt-tanguy-jean.com/

Lycée Valentine LABBÉ
41 rue Paul DOUMER – BP 20226
59563 LA MADELEINE CEDEX
CLASSE PRÉPARATOIRE TB
(Technologie & Biologie)

ENSEIGNEMENT DE SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE (SVT)
°° SCIENCES DE LA TERRE °°

Partie 6. Géodynamique externe
>> Cours <<

Chapitre 23

L'altération des roches en domaine continental : altération chimique, désagrégation mécanique, sols

Objectifs : extraits du programme

Connaissances clefs à construire	Commentaires, capacités exigibles
6.1 Altération des roches, érosion, formation et destruction des sols	
Les matériaux en surface sont soumis à de multiples processus d'altération qui engendrent des formations résiduelles, et d'érosion avec en particulier l'entrainement de produits par les eaux. L'altération d'une roche mère est à l'origine de la formation d'un sol.	
L'altération chimique transforme la composition initiale de la roche mère par la mise en solution ou la précipitation d'éléments. Ces réactions s'accompagnent de l'apparition de nouveaux assemblages minéralogiques.	À partir de l'étude du granite et de roches carbonatées identifier et caractériser deux modes d'altération chimique : - l'hydrolyse qui aboutit à la formation de minéraux argileux et - la dissolution **Lien** : Travaux Pratiques (TP 6.2. Les roches magmatiques et leur altération + TP 6.3. Les roches sédimentaires)
L'altération mécanique facilite le morcellement du matériau initial et l'érosion permet le départ en suspension de certains de ses éléments.	- relier l'ensemble de ces processus au départ d'éléments en suspension ou en solution et à la persistance d'éléments résiduels et les processus de formation de sols. - montrer l'importance de l'eau et des êtres vivants dans les processus d'altération, d'érosion et/ou de pédogenèse. **Liens** : 2.4 (chapitre 11. Les Angiospermes, organismes autotrophes à vie fixée), 4 (partie 4. Biologie des écosystèmes).
L'altération atmosphérique des silicates consomme du CO_2.	- souligner l'inégale répartition des sols en lien avec le climat. **Lien** : 6.3 (chapitre 25. Le cycle du carbone sur Terre)
Le sol est une interface fragile. Un sol résulte d'une longue interaction entre roches et biosphère : sa formation lente contraste avec la rapidité des phénomènes qui peuvent conduire à sa disparition (dégradation anthropique, érosion). Le sol est un réservoir de carbone organique.	- déterminer la nature, évaluer la quantité, expliquer l'origine du carbone organique présent dans les sols afin de définir le sol comme un réservoir de carbone. **Liens** : Travaux pratiques (TP 6.1. Étude pratique du sol), 6.3 (chapitre 25. Le cycle du carbone sur Terre) **Limite** : L'étude porte sur l'altération d'un granite et d'un calcaire sans aborder les phénomènes géologiques qui mettent ces roches à l'affleurement. Une étude exhaustive de la diversité des sols en relation avec la nature de la roche mère n'est pas envisageable.

Préambule : structure de la Terre solide

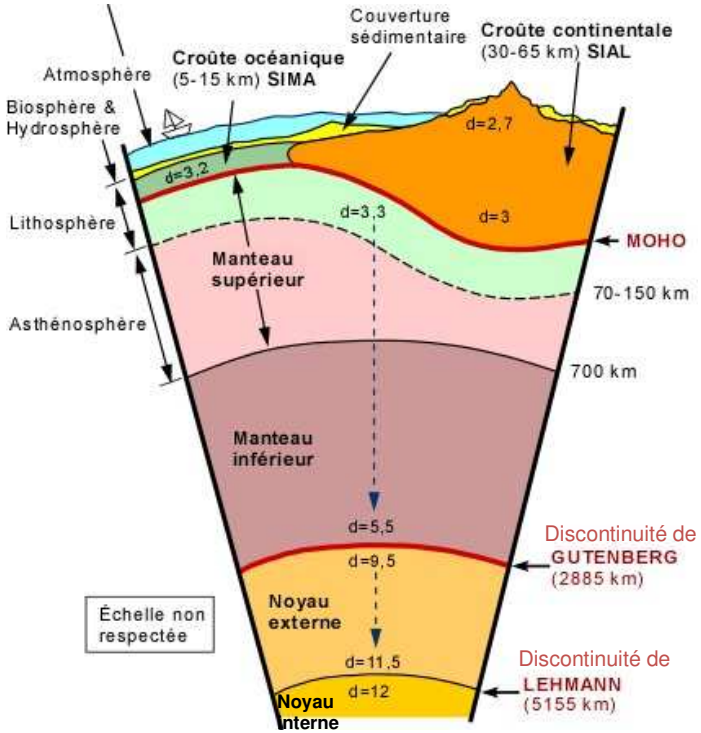


FIGURE 1. Structure de la Terre interne. D'après P-A. BOULQUE
http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/planete_terre.html (mars 2019)

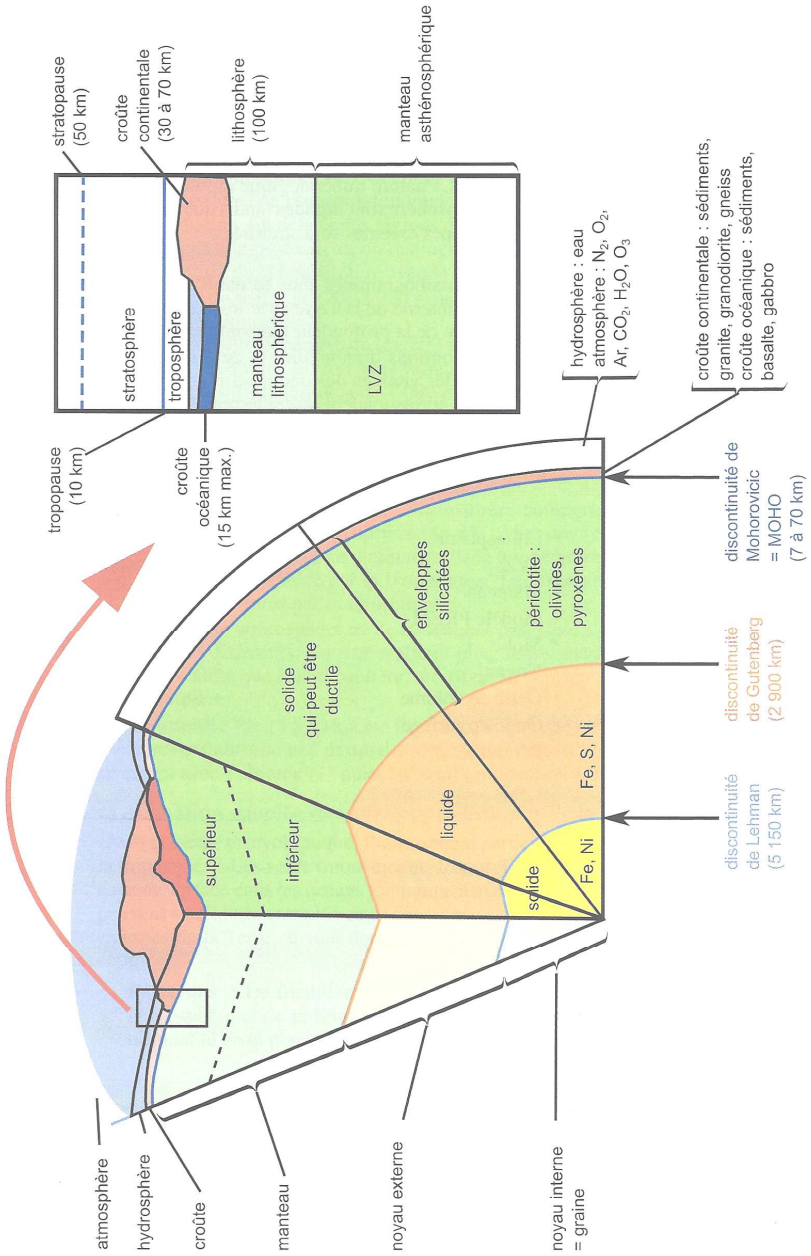


FIGURE 2. Structure de la Terre interne : autre vision. D'après PEYCRU *et al.* (2015).

Introduction

La ***couche terrestre la plus superficielle de la Terre solide (ayant généralement un comportement rigide) mesurant environ 100 km*** s'appelle la **lithosphère** : elle ***comprend la croûte terrestre (océanique ou continentale), et une partie du manteau supérieur*** (figure 1).

La **lithosphère** est composée de **roches variées** : **magmatiques**, **métamorphiques**, **sédimentaires** (revoir le TP 6.2. sur les roches magmatiques, qui aborde la diversité des roches). Elle est divisée en **plaques lithosphériques** en **déplacement** les uns par rapport aux autres, en lien avec des **processus géodynamiques internes** actifs.

Au niveau **le plus superficiel**, les **roches de la lithosphère** sont **soumises à l'action des enveloppes fluides de la Terre** :

- L'**hydrosphère**, ***ensemble de l'eau terrestre située en surface de la Terre (ou dans l'air)***. Les **étendues d'eau**, l'**eau météorique** (= issue des **précipitations**) ou encore les **écoulements d'eau** agissent sur les **roches** en les dégradant.
- L'**atmosphère** terrestre, ***ensemble des gaz entourant la planète (= air)***. Celle-ci se caractérise par :
  - Sa **composition** :
    - **Diazote** N_2 : **78 %**
    - **Dioxygène** O_2 : **21 %** (rendant l'atmosphère très oxydante)
    - Le « reste » (gaz rares, CO_2…) : 1 %. On verra notamment le rôle du **dioxyde de carbone CO_2**, seulement présent à 0,04 % mais très important…
  - Ses **écoulements (vents)**
  - Sa **température** avec ses **variations**

L'**eau** et l'**air agissent sur les roches** en les **dégradant**, en **transportant** leurs **débris**, en les **déposant** à distance… Tous ces aspects font partie du **phénomène sédimentaire** dont nous allons commencer l'étude par les **processus d'altération**.

Notons que les **processus d'altération** sont **essentiellement continentaux** (les océans étant surtout des **zones de dépôt**). Il existe aussi cependant une **sédimentation continentale** (voir chapitre suivant).

Quels sont les modalités, mécanismes et conséquences de la destruction des roches ?

I. L'altération (au sens large) des roches, un processus de destruction des roches impliquant des acteurs et des facteurs de contrôle variés : une vue d'ensemble

A. L'inclusion de l'altération dans le phénomène sédimentaire

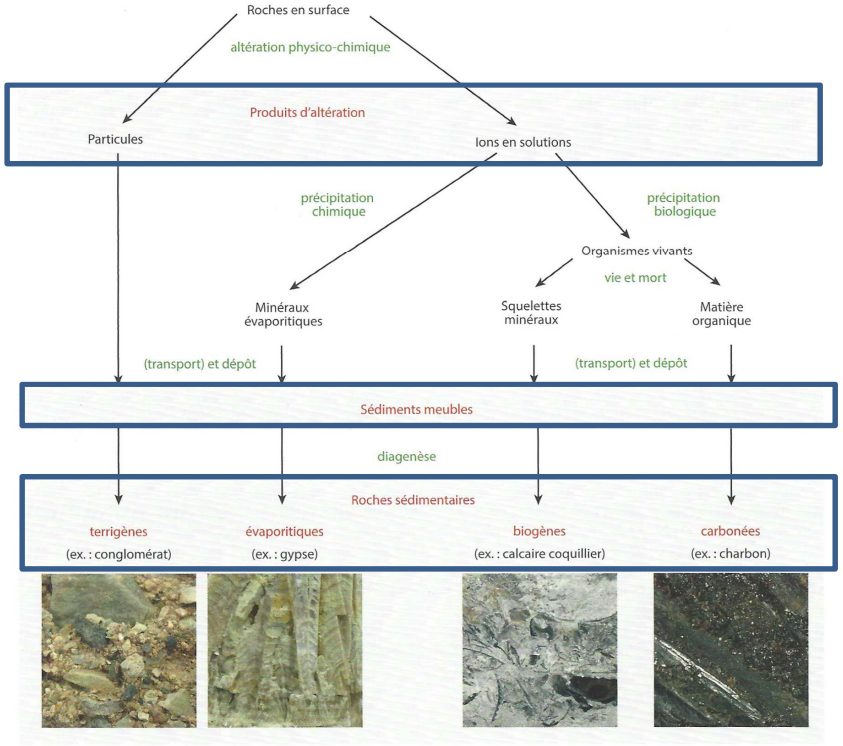


FIGURE 3. Vue d'ensemble (très simplifiée) du phénomène sédimentaire.
D'après JAUJARD (2015).

- Le **phénomène sédimentaire** fait référence aux **processus suivants** (figures 3-4) :
  - 1/ La **formation de particules (ou ions) mobiles**, le plus souvent par **désagrégation d'une roche préexistante** : c'est l'**altération** au sens large ;

La ***roche initiale subissant l'altération*** est parfois appelée « **roche-mère** », même si ce terme est plutôt réservé, en sédimentologie, aux ***roches riches en matière organique et surtout en hydrocarbures***.

  - 2/ L'**enlèvement de ces particules** (**érosion** – mot dont le sens peut varier) et son **déplacement** sur des distances plus ou moins importantes (**transport**) ;
  - 3/ Son **dépôt** dans un **bassin sédimentaire** (**dépôt** = **sédimentation**) ;

Les particules ou ions ainsi déposés, après transport, sont appelés **sédiments**.

  - 4/ Sa **consolidation** sous forme de **roche sédimentaire** (**diagenèse**).

Voir TP 6.3. Roches sédimentaires

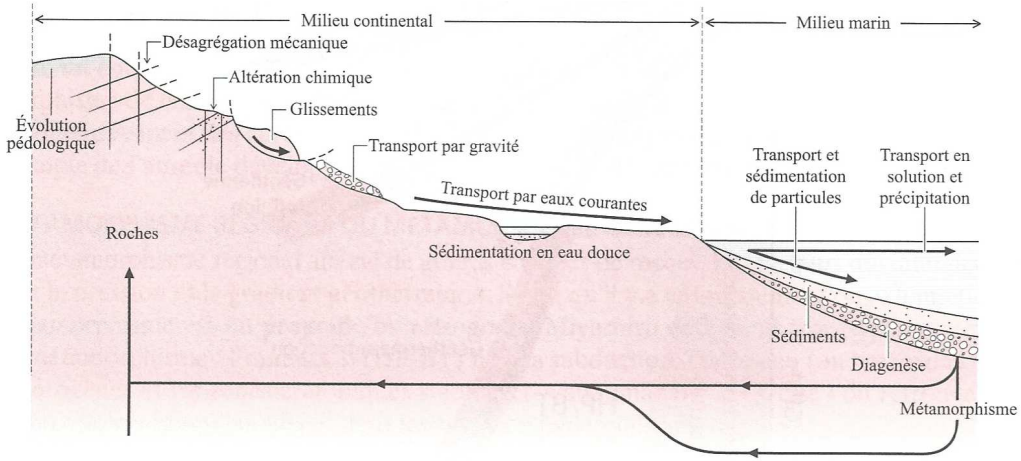


FIGURE 4. Une autre vue d'ensemble du phénomène sédimentaire.
D'après EMMANUEL *et al.* (2007).

- ***Si (et seulement si) la roche sédimentaire subit à son tour l'altération, alors on aboutit à un processus sédimentaire cyclique*** qu'on peut nommer **cycle sédimentaire** (figure 5).

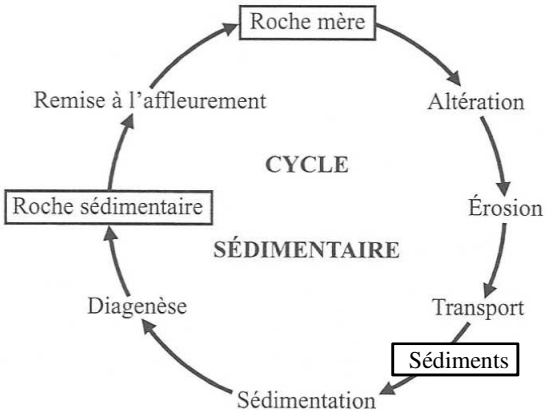


FIGURE 5. Le cycle sédimentaire. D'après EMMANUEL *et al.* (2007).

B. Les acteurs de l'altération

1. Les objets de l'altération : les roches

- Une **roche** est un ***assemblage d'un ou plusieurs minéraux répartis d'une manière plus ou moins homogène ou hétérogène dans l'espace***.
- En géologie, on appelle **minéral** une ***espèce chimique inorganique composant une roche et qui peut se présenter sous forme cristallisée***.

2. Les agents de l'altération

a. Les agents mécaniques

Figure 6

α. Des agents à la fois de désagrégation mécanique et d'érosion : les vents et surtout les courants d'eaux (+ la glace)

- Ces **agents mécaniques** ont à la fois :
  - Une **action de désagrégation mécanique** de la **roche-mère**.
  - Une **action d'enlèvement des particules** produites.

La ***combinaison altération-enlèvement des particules*** aboutit à une ***modification du modelé des roches et des paysages*** : on peut l'appeler **érosion**.

- Ces **agents** sont principalement :
  - Les **vents**, ***courants d'air plus ou moins intenses***. Ils produisent une **altération/érosion éolienne**.

Le vent peut également avoir une ***action érosive par l'action mécanique exercée par les particules en suspension qu'il transporte, agissant sur les roches comme des micro-poinçons*** : on parle de **corrasion**.

  - Les **courants d'eaux** **marines** ou **continentales**, ***écoulements laminaires ou turbulents d'eau***.

Voir chapitre 24 (Sédimentation)

En **milieu continental** comme **océanique**, c'est **l'agent principal d'érosion et de transport sédimentaires**.

  - La **glace** dans les **environnements polaires** ou **montagnards**. Ils produisent une **altération/érosion glaciaire**.

Les ***roches formées et déplacées par les glaciers (par râpage du substrat par l'écoulement de glace)*** s'appellent des **moraines**.

Un **glacier** se déplace indicativement d'**environ plusieurs centaines de mètres par an**.

  - La **gravité** qui permet **l'évacuation de matériel désagrégé**, particulièrement dans les zones de **fort relief** (**éboulements**, **glissements de terrains**).

β. Des agents de désagrégation mécanique sans action érosive : variations de température, eau interstitielle, sels…

- Les **agents mécaniques** qui n'ont qu'une **activité principalement désagrégative** sont :
  - Les **variations de température** (impliquant ou non l'**eau**), notamment les **variations journalières** (mais aussi **saisonnières**). Elles peuvent avoir pour **conséquences** :
    - Des **phénomènes de dilatation** de certains **minéraux**, ce qui aboutit à leur ***désolidarisation de la roche et donc à la désagrégation progressive de l'ensemble*** : on parle de **thermoclastie**.
    - Des **alternances gel-dégel**, ce qui aboutit à la ***cassure des roches, principalement là où se trouvent des infiltrations d'eau*** (**l'eau liquide** et la **glace** n'ayant pas le ~~même volume~~) : c'est la **cryoclastie** ou **gélifraction**.
    - Les phénomènes d'***hydratation-déshydratation*** ***de roches qui peuvent en modifier la structure*** (ex. **fentes de dessication** dans les **argiles**) ; on peut parler d'**hydroclastie**.
  - La **présence de sels** (notamment **NaCl**), notamment en **milieu marin ou littoral** qui peuvent ***pénétrer dans les roches ou s'adsorber à leur surface, conduisant à leur désagrégation*** : on parle d'**haloclastie**.

γ. Et la tectonique !

- Les **failles** ou les **plis**, dus à la **géodynamique interne**, influencent évidemment la **désagrégation mécanique** des roches, induisant ou facilitant leur **fissuration**.

Voir TP 6.4. (Cartes géologiques)

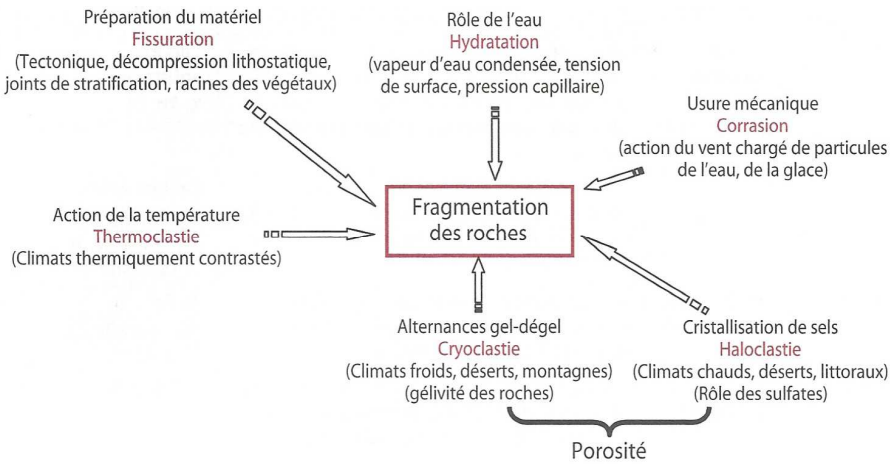


FIGURE 6. Les aspects mécaniques de l'altération et de l'érosion : bilan.
D'après EMMANUEL *et al.* (2007).
(!) Le terme corrasion est à réserver à l'action éolienne.

b. Les agents chimiques et leur action

α. L'eau et les solutés (formant la « solution d'attaque »)

i. Notion de solution d'attaque

- ***L'eau et les solutés qu'elle contient*** peuvent **altérer chimiquement** les roches : l'ensemble forme ce qu'on appelle une **solution d'attaque**.

ii. Deux actions principales possibles d'altération chimique des roches

➢ ***La modification chimique par la solution d'attaque des minéraux en présence avec production de minéraux résiduels : l'hydrolyse [+ acidolyse, salinolyse, alcalinolyse]***

- En sédimentologie, on appelle **hydrolyse** ***l'action altérative chimique de l'eau (éventuellement avec le CO_2 dissous qu'elle contient) qui aboutit à la formation de minéraux secondaires insolubles et d'ions enlevés par le fluide***.

Exemple d'altération de l'**albite** par l'eau et le CO_2 (d'après COJAN & RENARD, 2006) :

$$2NaAlSi_3O_8 + 2CO_2 + 11H_2O \rightarrow Si_2O_5Al_2(OH)_4 + 2Na^+ + 2HCO_3^- + 4H_4SiO_4$$

albite — kaolinite — acide silicique

- Au sens large, on y inclut souvent – quoique à tort – ***l'action altérative des composés acides*** (acidolyse), ***celle des composés basiques*** (alcalinolyse) et ***celle des chlorures ou sulfates*** (salinolyse).

⮟ **TABLEAU I. Typologie possible des lyses chimiques de roches en fonction de la composition de la solution d'attaque.** D'après CHAMLEY (2000).

PRINCIPAUX MÉCANISMES D'ALTÉRATION SUPERFICIELLE DES ROCHES SELON LES CARACTÈRES DES SOLUTIONS D'ATTAQUE (D'APRÈS PÉDRO, 1979, BULL. AFES : 93).

	pH < 5	5 < pH < 9,6	pH > 9,6
Solutions diluées en éléments salins (env. N/1 000)	ACIDOLYSE eaux chargées en acides organiques solubles	HYDROLYSE eaux pures ou chargées en CO^2	
Solutions concentrées en éléments salins (Na, K, Ca…)		SALINOLYSE eaux chargées en sels d'acides forts (chlorures, sulfates)	ALCALINOLYSE eaux chargées en sels d'acides faibles (carbonates et bicarbonates)

- On peut finalement proposer **l'équation suivante** résumant le **principe d'une hydrolyse** (avec éventuelle **acidolyse**, **alcalinolyse**, **salinolyse**) :

MINÉRAL PRIMAIRE (roche-mère) + SOLUTION D'ATTAQUE (eau plus ou moins ionisée) ⇆ MINÉRAL SECONDAIRE (complexe d'altération, sol) + SOLUTION DE LESSIVAGE (eau de drainage)

➢ ***La décomposition complète par la solution d'attaque d'une roche en ses ions constitutifs : la dissolution***

- En sédimentologie, on parlera de **dissolution** ***lorsque la solvatation (là encore éventuellement aidée du CO_2 ou autres substances dissoutes) d'une roche de type solide ionique aboutit à la mise en suspension complète de ses ions constitutifs et ainsi progressivement à la décomposition totale de la roche-mère***.

Exemple d'altération de la **calcite** (carbonate de calcium) (d'après COJAN & RENARD, 2006) :

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \Leftrightarrow Ca^{2+} + 2HCO_3^-$$

β. L'air

i. Un mélange gazeux

Rappel de sa **composition** :
- **Diazote** N_2 : **78 %**
- **Dioxygène** O_2 : **21 %** (rendant l'atmosphère très oxydante)
- Le « reste » (gaz rares, CO_2…) : 1 %. On verra notamment le rôle du **dioxyde de carbone CO_2**, seulement présent à 0,04 % mais très important…

ii. Une action oxydante du dioxygène

- Le **dioxygène** peut **oxyder des minéraux comportant des ions à l'état réduit** et formés ainsi de **nouveaux complexes minéraux** (oxydes).

Exemple de la formation d'**hématite** (d'après COJAN & RENARD, 2006) :

$$2Fe^{2+} \text{ (ions ferreux)} + 4HCO_3^- + (1/2)O_2 + 4H_2O \rightarrow Fe_2O_3 \text{ (hématite)} + 4CO_2 + 6H_2O$$

c. Les agents biologiques : les êtres vivants (… y compris l'Homme)

- Les **êtres vivants** exercent également une action d'**altération des roches** :
  - **Mécanique** : les **racines**, les **bioconstructions** (terriers…) modèlent les **formations sédimentaires** ou **résiduelles**, voire peuvent **désagréger la roche-mère**.
  - **Chimique** (on dira « **biochimique** ») : les **réactions métaboliques** et les **produits libérés** dans le milieu **agissent sur les roches** et **sédiments**.
- N'oublions pas **l'action anthropique** et toutes les **constructions humaines** qui modèlent les paysages !

C. Les produits de l'altération

- COJAN & RENARD (2006) proposent de sérier les **produits de l'altération** en **trois grands ensembles** (tableau II).

⮟ **TABLEAU II. Typologie possible des produits de l'altération.**
D'après EMMANUEL *et al.* (2000) reprenant COJAN & RENARD (2006).

Type de produit	Caractéristiques	Types de minéraux
Les produits résiduels	Minéraux résistants de la roche-mère formant la composante détritique (granulométrie variable) des roches sédimentaires	Quartz, zircons et silicates sous forme de feldspaths, micas et chlorites
Les produits de transformation	L'action progressive de l'hydrolyse affecte la structure et la composition chimique des minéraux	Minéraux argileux
Les produits de néoformation	Correspondent aux minéraux qui cristallisent à partir des ions en solution	Certains phyllosilicates et des oxydes et hydroxydes

1. Les produits résiduels : des minéraux peu ou pas (parfois pas encore…) altérés

- Les **produits résiduels** sont les ***minéraux qui n'ont pas subi (ou pas complètement) l'altération chimique et constituent des matériaux détritiques***.
  Exemple : arène granitique

2. Les produits de transformation : des minéraux secondaires formés par modification chimique des minéraux primaires

- Les **produits de transformation** sont ***les minéraux secondaires formés par modification chimique des minéraux primaires suite à l'altération***.
  Typiquement : les argiles

3. Les produits de néoformation : des minéraux qui cristallisent à partir d'ions préalablement mis en solution

- Les **produits de néoformation** sont les ***minéraux qui cristallisent à partir d'ions préalablement arrachés à la roche-mère***.
  Exemple : **oxydes d'aluminium**… pouvant donner des **bauxites**.

D. Les facteurs de contrôle de l'altération

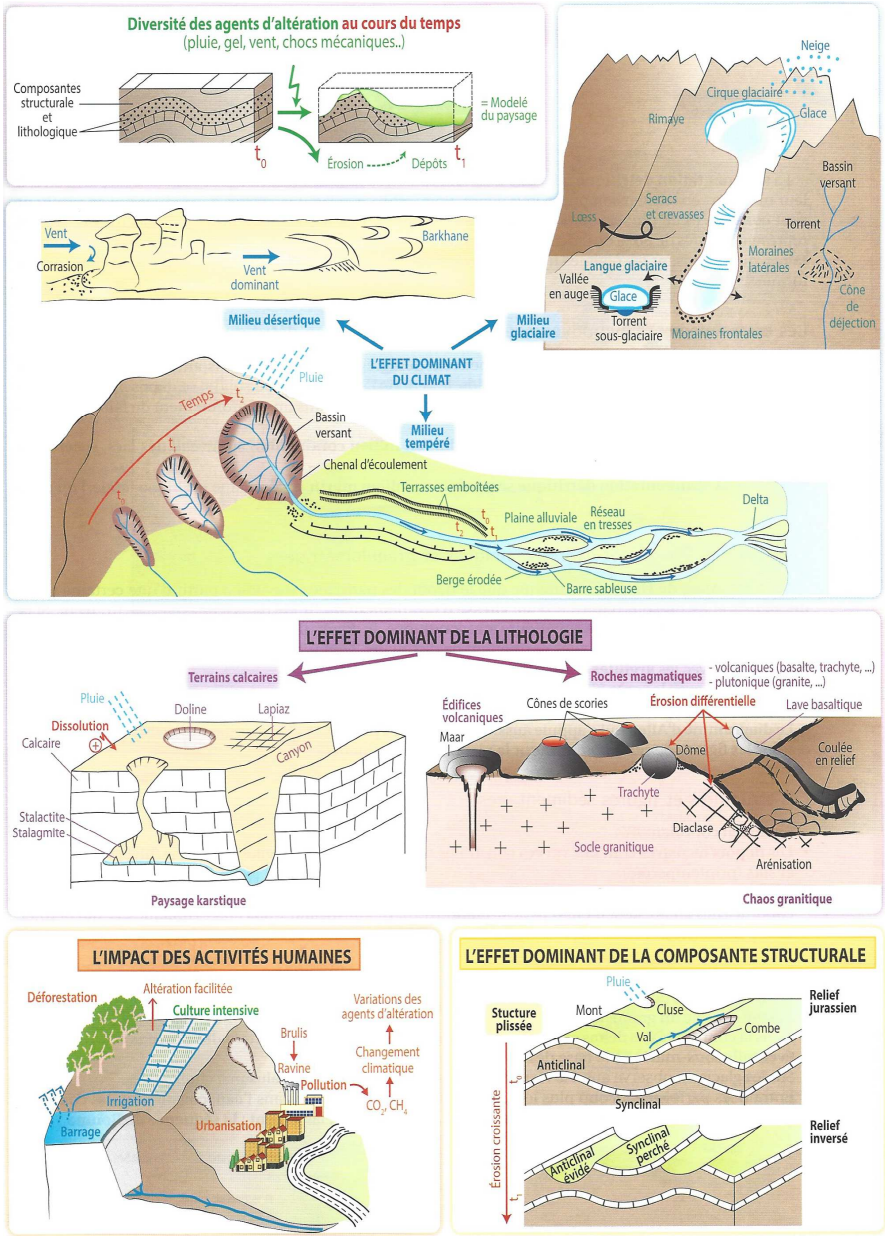


FIGURE 7. Contrôle de l'altération. D'après BORDI *et al.* (2018).

- L'**altération** due à **l'action combinée des acteurs mécaniques, chimiques et biologiques** est sous le **contrôle de plusieurs paramètres**, principalement trois (figure 7) (**lithologie** / **climat** / **structure**) auquel on ajoute parfois **l'Homme**.

1. La nature des roches (lithologie) et des minéraux en présence

- La **nature des roches présentes** et leurs **minéraux** conditionne évidemment leur **altérabilité**.

Exemples de contrôle lithologique dominant
*On n'observera pas les mêmes processus d'altération dans un **terrain granitique** (formation d'un **chaos granitique**) ou dans un **terrain calcaire** (formation possible de **paysages karstiques**) (voir II, ou figure 7).*

2. Le climat (température et précipitations), lui-même largement dépendant de la latitude/longitude et de l'altitude

- On appelle climat ***l'ensemble des paramètres atmosphériques (notamment : température, précipitations) régnant en moyenne dans une région donnée***.
- Comme nous le voyons en écologie (chapitre 20), le **climat** est lui-même dépendant de la **position d'une région sur le globe** (**latitude** / **longitude**) et de l'**altitude**.

Exemple de contrôle climatique dominant (altitudinal)
*En milieu montagnard, c'est le climat (hiver rigoureux, forte insolation l'été, faible végétation) qui détermine la **présence de glaciers** qui découpent des **paysages glaciaires** (figures 8-9-10).*

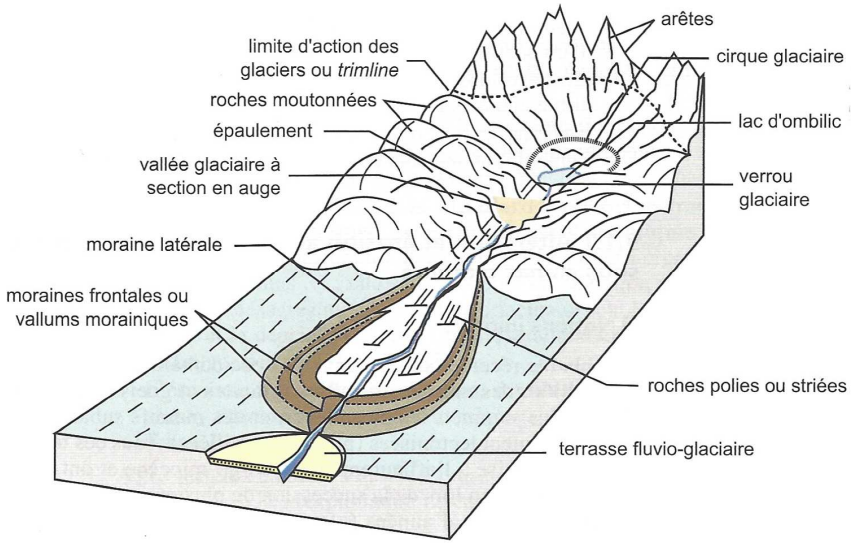


FIGURE 8. Le modelé glaciaire (pour information ?). D'après PEYCRU *et al.* (2015).

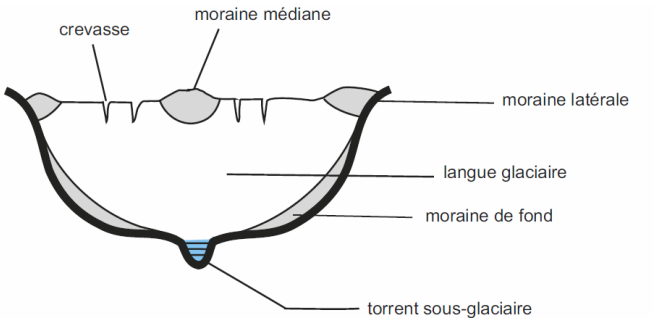


FIGURE 9. Coupe dans un glacier montrant les types de moraines emportées (pour information ?). D'après PEYCRU *et al.* (2015).

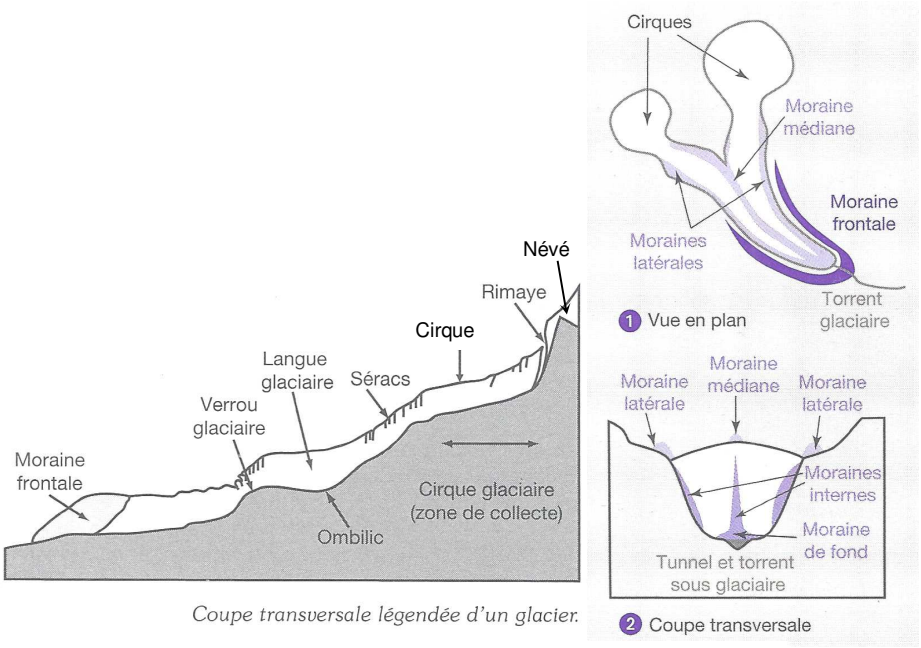


FIGURE 10. Vue d'ensemble du modelé glaciaire (type alpin). D'après DENŒUD *et al.* (2013), corrigé.

Vocabulaire du modelé glaciaire

- **Cirque glaciaire** : ***dépression semi-circulaire où s'accumulent des glaces après recueillement et tassement de neiges éternelles, constituant souvent le « point de départ » du glacier.***
- **Névé** : ***amas de neige durcie qui peut progressivement se transformer en glace et alimenter un glacier, par exemple au niveau d'un cirque glaciaire.***
- **Rimaye** : ***crevasse qui sépare un névé de son glacier.***
- **Langue glaciaire** : ***longue et étroite couche de glace prenant naissance en aval du cirque glaciaire et assurant l'avancée du glacier dans la vallée glaciaire.***
- **Sérac** : ***bloc de glace crevassé formé par la fracturation locale d'une langue glaciaire, souvent sous l'effet d'une rupture de pente brutale sous le glacier.***
- **Verrou glaciaire** : ***zone d'une vallée glaciaire plus résistante à l'érosion du glacier que le reste de la vallée, en hauteur par rapport au profil global de la vallée.***
- **Ombilic glaciaire** : ***zone d'une vallée glaciaire moins résistante à l'érosion du glacier que le reste de la vallée, en dépression par rapport au profil global de la vallée.***
- **Moraine** : ***amas de débris rocheux érodés et transportés par la glace.***

Exemple de contrôle climatique dominant (latitudinal)
*En **domaine granitique**, nous verrons plus loin que le **climat** est **déterminant** dans le **type d'argile formé** et donc le **type de sol** mis en place.*

Voir plus loin (II) : le **diagramme de PEDRO (1975)** clairement au programme !

3. Le facteur structural (lié à l'activité tectonique)

- L'**orientation des terrains** (présence ou non d'un **pendage des couches géologiques**) et leur **modification ou non par une action tectonique (failles, plis…)** impacte le **modelé des paysages** et donc la manière dont les **agents physiques** / **chimiques** / **biologiques peuvent altérer les roches**.

Exemple de contrôle structural dominant
*En **terrain plissé**, les **roches les plus fragiles** mises **à l'affleurement** seront **préférentiellement altérées**, de sorte que le **paysage** peut ainsi être **modelé** par l'**érosion différentielle** (figure 7).*

On appelle **érosion différentielle** le phénomène d'**érosion** subi par des **roches situées en un même lieu** mais dont le **degré d'érodabilité varie**, de sorte sur que ***l'érosion en un lieu donné est d'intensité variable selon le type de roche.***

Bilan (adapté du programme)	✓ Les **matériaux en surface** sont **soumis à de multiples processus d'altération** qui engendrent des **formations résiduelles**, et d'**érosion** avec en particulier **l'entrainement de produits** par les **eaux**.

II. L'altération (au sens large) des roches : mécanismes et conséquences de l'altération chimique et de la désagrégation physique

- La **dégradation des roches** est à envisager au travers de **deux exemples**, par ailleurs **illustrés en TP** :
  - L'**altération** du **granite** en **sédiments détritiques**.
    Voir TP 6.2. (Roches magmatiques) et TP 6.3. (Roches sédimentaires)
  - L'**altération des roches carbonatées** (exemple : calcaire) qui aboutit à la **mise en suspension** de **carbonates**.
    Voir TP 6.3. (Roches sédimentaires)

Capacité exigible	✓ À partir de l'étude du granite et de roches carbonatées, **identifier** et **caractériser** deux modes d'altération chimique : - l'hydrolyse qui aboutit à la formation de minéraux argileux et - la dissolution.

A. Préalable : rappels des caractéristiques des deux roches-mères étudiées comme exemples

1. Cas du granite

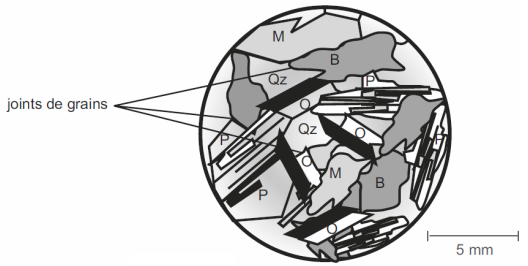
Revoir le TP 6.2. sur les **roches magmatiques**

- Le **granite** (figure 11) est une ***roche magmatique plutonique (donc à texture grenue) formée par refroidissement lent d'un magma et qui compose l'essentiel de la croûte continentale***. Il comprend typiquement **l'assemblage minéral** suivant :
  - Du **quartz** : ***silice (SiO_2) cristallisée***.
  - Des **feldspaths** : ***tectosilicates* de type aluminosilicate de sodium, de potassium ou de calcium***.
    Ex. - Feldspath potassique $\mathbf{KAlSi_3O_8}$: orthose ou microcline
    - Feldspath sodique $\mathbf{NaAlSi_3O_8}$: albite
    - Feldspath calcique $\mathbf{CaAl_2Si_2O_8}$: anorthite
    NB On distingue classiquement (figure 12) :
    - les **feldspaths alcalins** (***série sodico-potassique***)
    - les **feldspaths plagioclases** (***série calco-sodique***)

Un granite comporte typiquement plus de feldspaths alcalins que de plagioclases.

  - Des **micas** : ***phyllosilicates* formés principalement de silicate d'aluminium et de potassium***. On en trouve classiquement deux types (qui, parfois, coexistent) :
    - des **micas blancs de type muscovite** ***alumino-potassique, sans fer ni magnésium*** (ou à l'état de traces) $KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH,F)_2$
    - les **micas noirs = biotites** ***comprenant du fer et du magnésium*** $K(Mg,Fe)_3(OH,F)_2(Si_3AlO_{10})$

* Tous ces minéraux sont des **silicates**, c'est-à-dire des ***minéraux cristallisés combinant l'ion SiO_4^{4-} à d'autres oxydes métalliques*** (encadré A).



Qz = quartz ; M = muscovite ; B = biotite ; O = orthose ; P = plagioclase

FIGURE 11. Le granite.
D'après LIZEAUX, BAUDE *et al.* (2007) et PEYCRU *et al.* (2008).

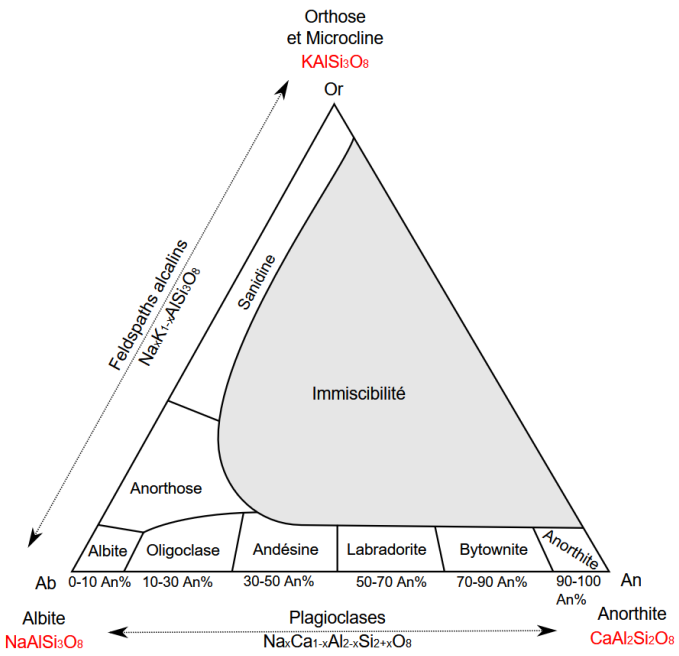


FIGURE 12. Séries feldspathiques. D'après *Wikipédia*.

Encadré A Focus sur les silicates

Les tétraèdres d'ions orthosilicate, des anions se liant à de multiples cations

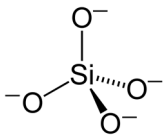


FIGURE a. L'ion orthosilicate (SiO_4^{4-}), motif de base des silicates. *Wikipédia*.

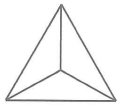
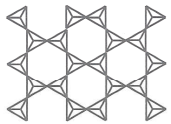
- Les **minéraux silicatés** comprennent ***l'ensemble des minéraux associant des tétraèdres d'ion orthosilicate*** (figure a) ***à des cations***.
- Selon les auteurs, la **silice** est incluse ou exclue des silicates.

La diversité des silicates : un panorama

- La **classification des silicates** est basée sur les **modèles d'organisation des tétraèdres** ; on dénombre **six architectures possibles** dont **quatre** sont présentées dans le tableau 1.

En TB, je pense qu'on peut retenir les **tectosilicates** et les **phyllosilicates**.

TABLEAU 1. Principales familles de silicates. D'après GODINOT *et al.* (2010).

Type de silicates	Architecture	Familles à connaitre
Nésosilicates	Tétraèdres isolés 	**Olivines** (solution solide entre la forstérite Mg_2SiO_4 et la fayalite Fe_2SiO_4). *Grenats*. *Silicates d'alumine* (Al_2OSiO_4), minéraux importants dans le métamorphisme. *Zircons* ($ZrSiO_4$).
Inosilicates	Tétraèdres en chaine : chaque tétraèdre est uni à deux ou trois tétraèdres. Chaine simple Chaine double	Deux cas de figure : chaine simple : **pyroxènes**. - Système orthorombique : *orthopyroxènes* (solution solide entre l'*enstatite* $Mg_2Si_2O_6$ et la *ferrosilite* $Fe_2Si_2O_6$) - Système monoclinique : *clinopyroxènes* (solution solide entre le diopside, $CaMgSi_2O_6$ et l'hedenbergite, $CaFeSi_2O_6$). Chaine double : **amphiboles**. La *hornblende* et la *glaucophane* sont deux amphiboles du métamorphisme.
Tectosilicates	Les tétraèdres sont unis par leurs quatre sommets.	**Quartz** (SiO_2) et les formes de haute température et/ou pression de la silice : *coésite, cristobalite…* **Feldspaths** (Si^{4+} est en partie remplacé par Al^{3+} et stabilisation par Na^+, Ca^{2+} ou K^+) : **- feldspaths calco-sodiques ou plagioclases** (solution solide entre *l'albite* $NaAlSi_3O_8$ et l'*anorthite* $CaAl_2Si_2O_8$) ; - **feldspaths potassiques** (*orthose* $KAlSi_3O_8$ au sens large).
Phyllosilicates	Tétraèdres en couches : chaque couche correspond à un assemblage de tétraèdres.  Les feuillets sont constitués de couches tétraédriques T ou octaédriques O. *Cf.* Fig. 3 du Chap. 14.	Les phyllosilicates sont généralement des minéraux lamellaires ou fibreux. **Micas** (TOT) : - **muscovite** (mica blanc, $KAl_2AlSi_3O_{10}(OH)_2$) ; - **biotite** (mica noir, $K(Fe,Mg)_3AlSi_3O_{10}(OH)_2$). **Argiles** (*illite, smectite, kaolinite… cf.* chap. 16). *Chlorites* et *serpentinites*, qui proviennent de l'altération de la biotite, des pyroxènes, des amphiboles et des olivines.

2. Cas des roches carbonatées

Revoir le TP 6.3. sur les **roches sédimentaires**

- Les **roches carbonatées** sont les ***roches sédimentaires dont la base constitutive est le carbonate de calcium $CaCO_3$***.

Ces roches font **effervescence à l'acide chlorhydrique HCl**, dégageant du CO_2.

- Elles **comprennent** notamment :
  - Les **calcaires**, ***roches majoritairement (à plus de 50 %) composée de carbonate de calcium $CaCO_3$, le plus souvent sous la forme minérale nommée « calcite »***.

Il existe une ***autre forme cristalline de $CaCO_3$***, plus rare, **l'aragonite**, que l'on trouve par exemple des **certaines roches métamorphiques** ou **certaines coquilles biologiques** (ex. coquille des Moules)

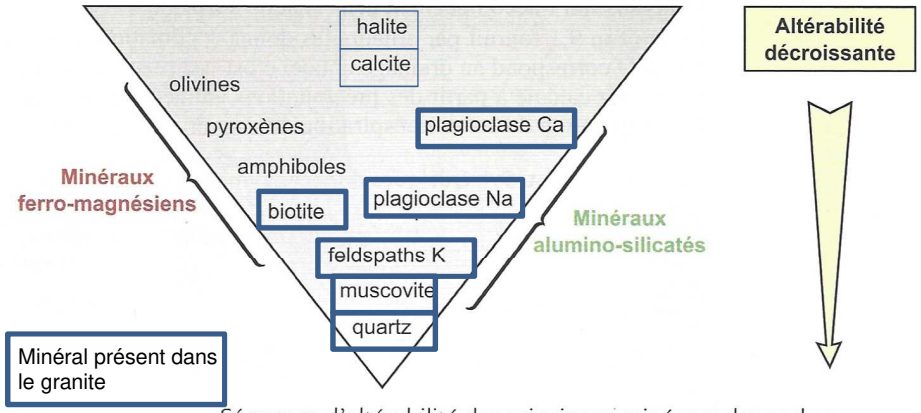
  - Les **dolomies**, ***roches comprenant plus de 50 % de dolomite $CaMg(CO_3)_2$***.
  - Les **marnes**, ***mélanges de carbonates et d'argiles***.

B. Les processus chimiques (= altération chimique)

1. Cas du granite : une altération chimique surtout par hydrolyse

a. Une altérabilité chimique variable (altérabilité différentielle) des minéraux silicatés, en lien avec leur température de cristallisation : le diagramme de GOLDISH (1938)

- Les **minéraux silicatés** présentent une **altérabilité différentielle**, c'est-à-dire une ***capacité à être hydrolysés de manière plus ou moins intense et rapide selon la nature du minéral en présence*** (figure 13).



Séquence d'altérabilité des principaux minéraux des roches à l'affleurement (*d'après Goldich – 1938*).

Sont également pris en compte sur cette figure les minéraux rencontrés dans les roches sédimentaires (halite des évaporites, calcite des calcaires).

FIGURE 13. Altérabilité des principaux minéraux de roches : diagramme de GOLDISH (1938). D'après PEYCRU *et al.* (2015).

- Dans le **cas des silicates**, on note que plus la **température de cristallisation** des **silicates** est élevée, moins ils sont **altérables**.
- On note, dans le cas du **granite**, l'ordre suivant d'altérabilité :
  - **Quartz** « **inaltérable** » **chimiquement** (ou presque pas) : *sa seule altération est d'ordre mécanique* ;
  - **Feldspaths peu altérables** ;
  - **Micas** (muscovite, biotite) **plus altérables**.

b. Une altérabilité des minéraux due à la nature des ions piégés dans le réseau cristallin : le diagramme de GOLDSCHMIDT (1934)

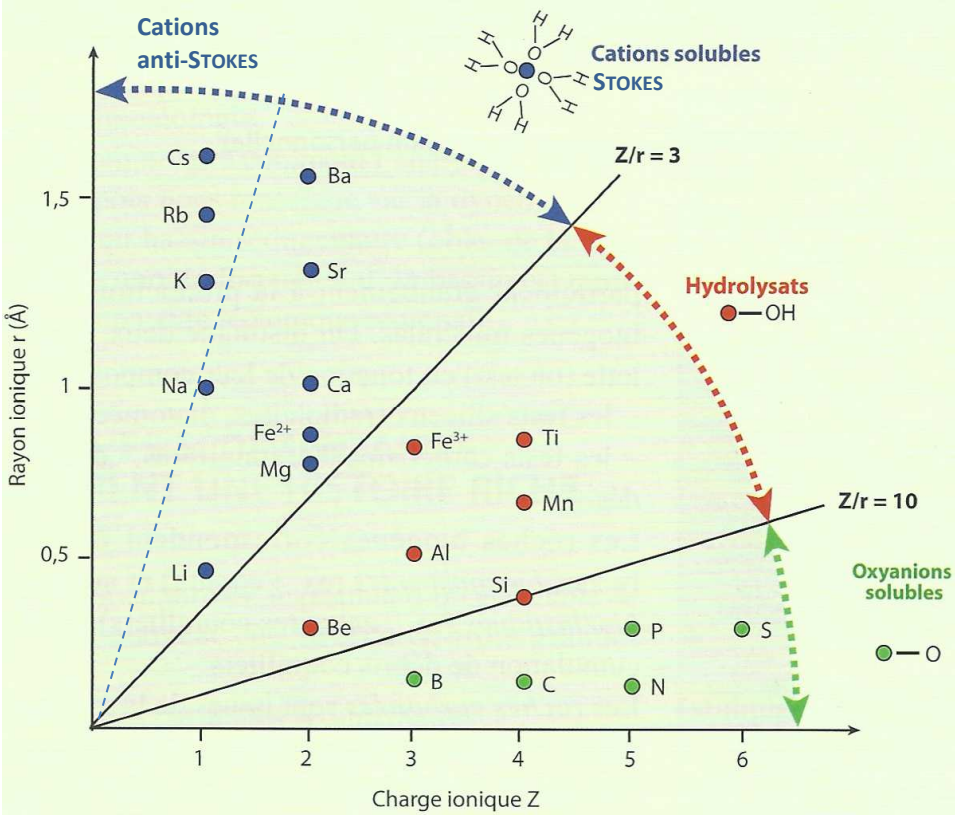


FIGURE 14. Diagramme de GOLDSCHMIDT (1934). D'après JAUJARD (2015).

- La **molécule d'eau** est un **dipôle qui attire les ions** en lien avec leur **rapport charge / rayon ionique (« potentiel ionique ») est élevé**, que l'on peut mettre en évidence dans le **diagramme de GOLDSCHMIDT (1934)** (figure 14) qui met en lumière **quatre grande familles d'ions** (tableau III) :
  - ***Z / r < 1*** = **cations anti-STOKES (assez solubles)** : ce sont des ***cations solubles présentant un gros diamètre et une faible charge, que ne s'hydratant pas (ou***

peu) mais possèdent une forte affinité pour le réseau cristallin. Ils sont donc moins mobiles que les cations STOKES.

- **1 < Z / r < 3** = **cations STOKES (solubles)** : ce sont des ***cations solubles présentant un diamètre plus faible qui s'hydratent plus facilement et quittent prioritairement le réseau cristallin***. Ils sont donc plus mobiles que les cations anti-STOKES.

Cela explique les **feldspaths plagioclases (Na)** soient **plus altérables** que les **feldspaths alcalins (K)**.

Pour information, la **loi de STOKES** est une ***loi physique exprimant le frottement d'un fluide sur une sphère***. Les cations « anti-STOKES » ne s'hydratent pas et ne connaissent donc **pas de frottement du fluide**.

- **3 < Z / r < 10** = **hydrolysats (insolubles)** : ce sont des ***cations de diamètre moyen qui subissent l'hydrolyse et précipitent ensuite rapidement sous forme d'oxydes***. Ils ne sont pas **peu mobiles** car, malgré leur attraction pour l'eau dans un premier temps, ils forment rapidement des précipités insolubles.
- **Z / r > 10** = **oxyanions (solubles)** : ce sont des ***ions polyatomique oxydés (ex. CO_3^{2-}, SO_4^{2-}, PO_4^{2-}, SiO_4^{4-} …) avec un petit diamètre et une charge élevée qui ont une très forte affinité pour la phase liquide***. Ce sont donc les plus mobiles des ions lors de l'altération chimique.

TABLEAU III. Les quatre domaines du diagramme de GOLDSCHMIDT (1934).
D'après EMMANUEL *et al.* (2000)

Potentiel ionique	Domaine	Caractéristiques	Éléments	Phase
Z/r < 3 Cations solubles	Cations anti-Stokes	Z/r < 1, les ions de ce domaine n'ont aucune attirance pour la molécule d'eau et ne sont pas hydratés lors de leur mise en solution du fait d'une taille trop grande par rapport à leur charge.	Cations antistokes **K, Rb, Cs**	Migratrice (Résiduelle)
	Cations Stokes	1 < Z/r < 3, ions hydratés donnant des solutions alcalines qui se combineront avec les oxyanions pour donner les principales roches sédimentaires.	Cations stokes **Ca, Na, Mg** mais aussi Ba, Sr, Li, Fe^{2+}, Mn^{2+},	Migratrice
3 <Z/r < 10	Hydrolysats (insolubles)	Ions de diamètre moyen, leur hydrolyse provoque la formation d'hydroxydes dont la stabilité en solution est faible.	**Al, Fe^{3+}, Si** mais aussi Be, Zr, Ti, U, Mn^{4+},	Résiduelle
Z/r > 10	Oxyanions (solubles)	Ions de petit diamètre et de charge élevée qui développent un champ électrique intense et permettent la formation d'anions solubles	**C, P, S, B, N**	Migratrice

c. Une hydrolyse des minéraux silicatés du granite (sauf le quartz) qui aboutit notamment à la formation de minéraux argileux

α. Les argiles, composés géologiques ayant une définition granulométrique, une définition minéralogique et une définition pétrologique

- On peut définir les **argiles** de **trois façons** qui, dans la réalité concrète, **se superposent** très largement :
  - La définition granulométrique stipule qu'une argile est une ***particule sédimentaire détritique de taille inférieure à 2 µm*** (revoir le TP 6.3. sur les roches sédimentaires).
  - La définition minéralogique stipule qu'une argile est un ***minéral de style phyllosilicates constitués de feuillets séparés par des espaces interfoliaires*** (figure 15).
  - La définition pétrologique qui donne le nom d'argile (ou **roche argileuse**) à une ***roche composée de minéraux argileux***.

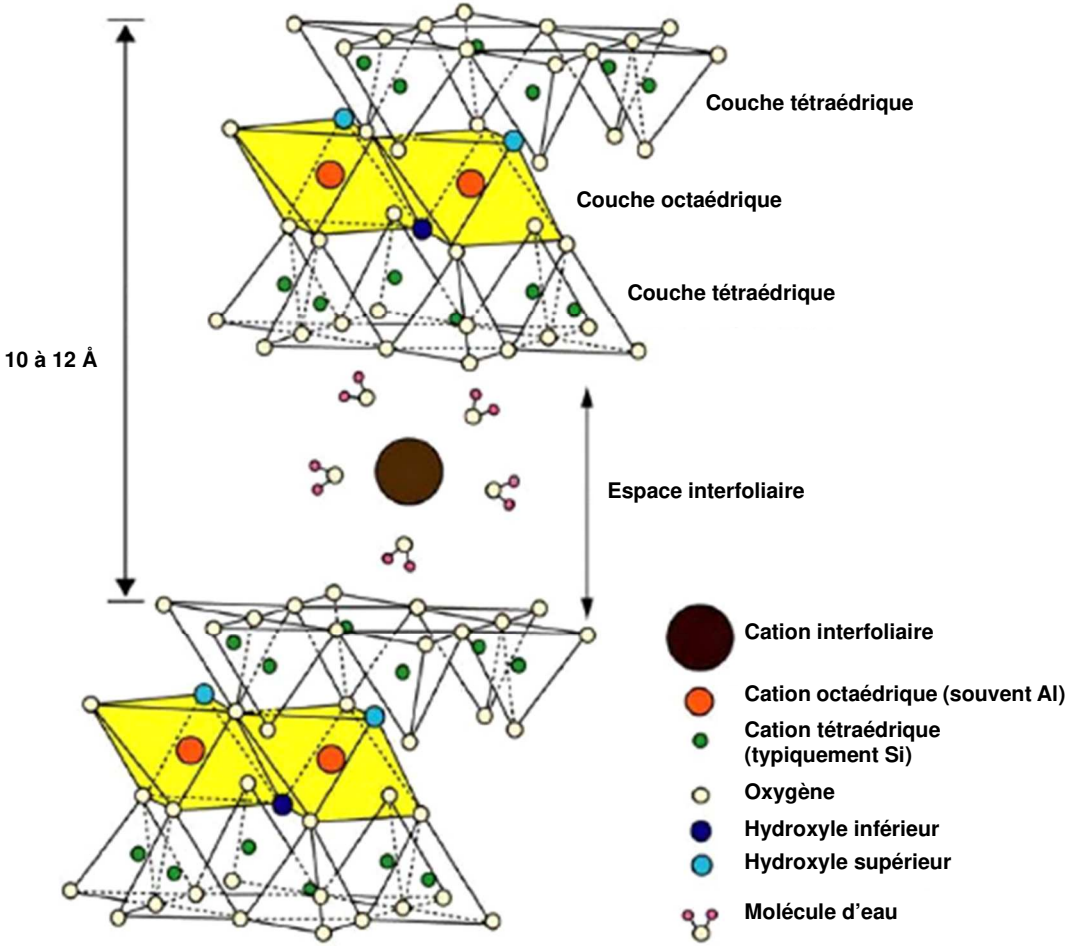
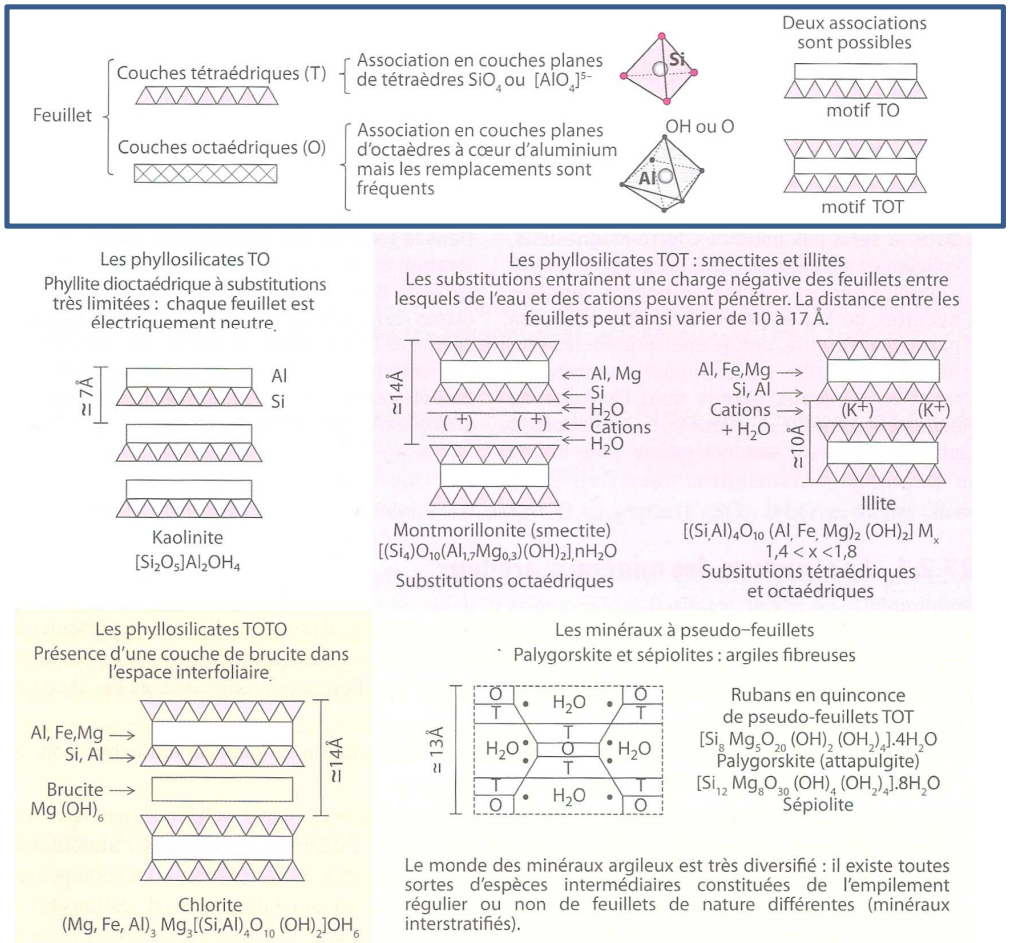


FIGURE 15. Structure d'une argile TOT. https://www.memoireonline.com/06/15/9140/m_Argile-et-mineraux-argileux-proprietes-physico-chimiques-et-proprietes-et-proprietes-collo4.html (consultation mars 2019) A. EL HACHMI (Univ. Abdelmalek Essaadi, Tanger, 2013)

β. Les argiles, des minéraux en feuillets présentant une certaine diversité



Structure des principaux minéraux argileux (explications dans le texte).

FIGURE 16. Les principaux minéraux argileux. D'après RENARD *et al.* (2018).

- Les **feuillets** sont composés par l'empilement ordonné de **deux types de couches** (figures 15-16) :
  - Les **couches tétraédriques (couches T)** ***dont le motif de base est SiO_4 (ou rarement AlO_4) ; le centre des tétraèdres est occupé par Si et les sommets par O.***
  - Les **couches octaédriques (couches O)** ***où le motif de base est un octaèdre dont le centre est occupé par Al^{3+} (ou Mg^{2+}, ou Fe^{2+}) et les sommets par O^{2-} ou HO^-.***
- En fonction de la **nature** et du **nombre de couches** composant un **feuillet**, on peut classer les **argiles** en **trois grandes catégories** (figure 16) :
  - Les **phyllites 1/1 = TO** : ***un feuillet comprend une couche T une couche O.***
    Ex. kaolinite $Si_2O_5Al_2(OH)_4$
  - Les **phyllites 2/1 = TOT** : ***un feuillet comprend une couche O entre deux couches T.***
    Ex. illites, smectites, vermiculites…
  - Les **phyllites 2/1/1 = TOTO (ou TOT-O)** : ***un feuillet comprend une couche O entre deux couches T et les feuillets sont associés deux à deux par une couche O située dans l'espace interfoliaire.***
    Ex. chlorites…
- Il existe enfin des **minéraux argileux** constitués de **pseudofeuillets**.

γ. Les argiles, minéraux secondaires formés lors de l'altération du granite

- Le **quartz** est généralement considéré comme **inaltérable** (revoir la figure 13) et son **hydrolyse** est **extrêmement lente** de sorte qu'elle est **négligeable**.
- Les **feldspaths** et, encore plus, les **micas** (revoir la figure 13) subissent une **hydrolyse** qui aboutit à la formation d'**argiles**.

Exemple de **l'altération par hydrolyse de l'orthose** (RENARD *et al.* 2018) :

orthose + eau → illite + silicium + potassium (en solution).

$$3\,Si_3AlO_8K + 12\,H_2O + 2H^+ \rightarrow (Si_3Al)O_{10}(Al_2)(OH)_2K + 6\,Si(OH)_4 + 2K^+$$

d. Une hydrolyse dont l'efficacité et la nature des produits formés dépend des conditions climatiques (notamment la température)

α. Une formation d'argiles variées voire d'oxydes complets en fonction de l'efficacité croissance de l'hydrolyse : bisiallitisation, monosiallitisation et allitisation (= latéritisation)

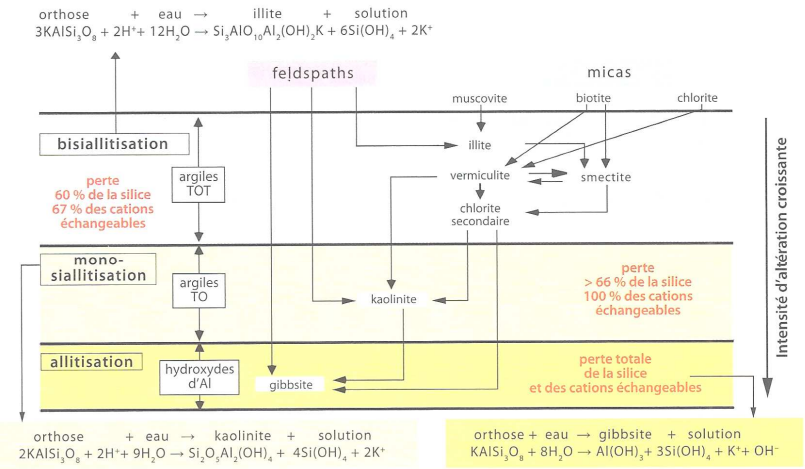


Schéma d'évolution des feldspaths, des micas et des argiles au cours des différents stades de l'hydrolyse.

FIGURE 17. L'altération des matériaux granitiques : vue d'ensemble. D'après RENARD *et al.* (2018).

- En fonction de **l'intensité de l'hydrolyse**, on distingue **trois types de processus** aboutissant, à partir des **minéraux granitiques** (feldspaths, micas) à la formation d'argiles. On choisit de traiter l'exemple de **l'orthose (feldspath alcalin)**.

i. La bisiallitisation : formation d'argiles TOT

- On appelle **bisiallitisation** ***l'hydrolyse de silicates aboutissant à la formation d'argiles de type TOT*** (illite, smectite, montmorillonite…).

Cas de **l'orthose** (RENARD *et al.* 2018) :

orthose	+	eau	→	illite	+	silicium	+	potassium (en solution).
$3\,Si_3AlO_8K$	+	$12\,H_2O + 2H^+$	→	$(Si_3Al)O_{10}(Al_2)(OH)_2K$	+	$6\,Si(OH)_4$	+	$2K^+$
Minéral primaire		Solution d'attaque		Minéral secondaire		Composés lessivés		

ii. La monosiallitisation (kaolinisation) : formation d'argiles TO

- On appelle **monosiallitisation (= kaolinisation)** ***l'hydrolyse de silicates aboutissant à la formation d'argiles de type TO*** (kaolinite).

Cas de **l'orthose** (RENARD *et al.* 2018) :

orthose	+	eau	→	kaolinite	+	silicium	+	potassium (en solution).
$2\,Si_3AlO_8K$	+	$9\,H_2O + 2H^+$	→	$Si_2O_5Al_2(OH)_4$	+	$4\,Si(OH)_4$	+	$2K^+$
Minéral primaire		Solution d'attaque		Minéral secondaire		Composés lessivés		

iii. L'allitisation (latérisation) : formation d'oxydes d'aluminium et de fer

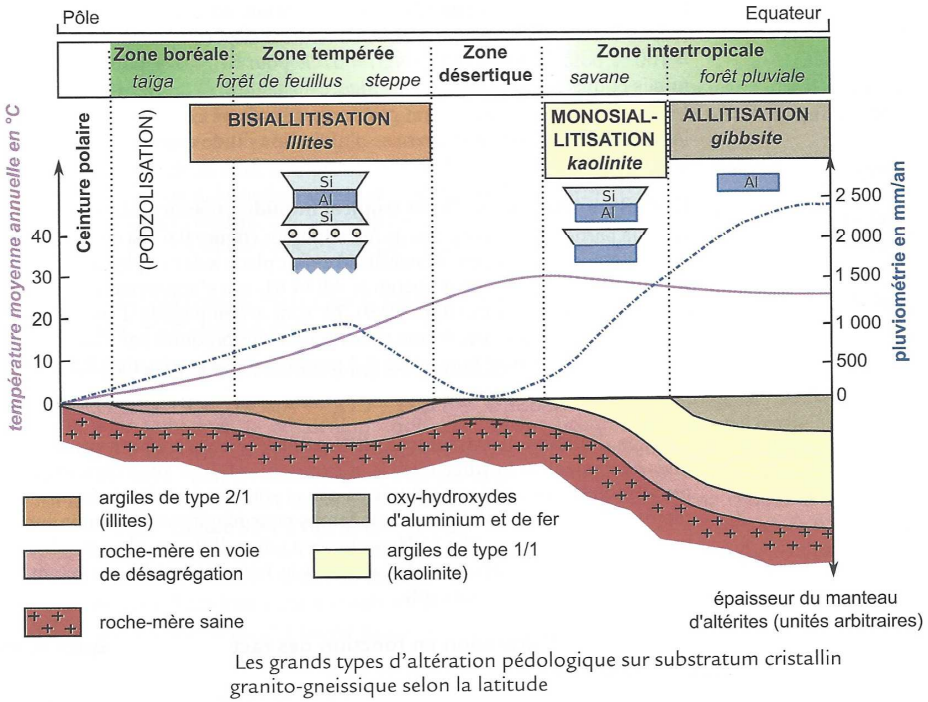
- On appelle **allitisation (= latérisation)** ***l'hydrolyse complète de silicates n'aboutissant à aucune argile (tout le silicium est lessivé) mais à la formation d'hydroxydes d'aluminium comme la gibbsite $Al(OH)_3$ et d'hydroxydes de fer.***
- La **gibbsite** est un **constituant essentiel** des **bauxites**, ***roche résiduelle latéritique formé en zone tropicale humide qui permet notamment l'extraction d'aluminium***.

Cas de **l'orthose** (RENARD *et al.* 2018) :

orthose	+	eau	→ gibbsite + silicium + potassium (en solution).
$2\,Si_3AlO_8K$	+	$8\,H_2O + 8H^+$	$\rightarrow Al(OH)_3 + 3\,Si(OH)_4 + 2K^+ + 9\,OH^-$
Minéral primaire		Solution d'attaque	Minéral secondaire / Composés lessivés

β. Des processus d'hydrolyse largement contrôlés par les conditions climatiques (notamment la température) : le diagramme de PEDRO (1968)

- La **température** est largement responsable de **l'intensité de l'hydrolyse** (figure 18) et on notera :
  - Plutôt une **bisiallitisation** dans les **climats tempérés** ;
  - Plutôt une **monosiallitisation** dans les **climats tropicaux à saison sèche** ;
  - Plutôt une **allitisation** dans les climats équatoriaux.
- Notons que **l'hydrolyse** dépend (évidemment !) de la **présence d'eau** et donc des **précipitations** : leur **quasi-absence** en **climat désertique** explique la **quasi-absence d'altération chimique** à cet endroit.



Les grands types d'altération pédologique sur substratum cristallin granito-gneissique selon la latitude

FIGURE 18. Latitude et formation d'argiles : diagramme de PEDRO (1968).
D'après PEYCRU *et al.* (2015).

e. Une hydrolyse à laquelle participe le CO_2 dissous dans la solution d'attaque (par son rôle acidifiant)

- Lors de **l'hydrolyse**, des **ions H^+** sont **consommés** et leur **disponibilité** influence donc **l'hydrolyse**.
- Le **volume de CO_2 dissous** est en **équilibre** avec les **ions H^+** selon la réaction suivante :

$$CO_{2\,(gaz)} + H_2O \Leftrightarrow H_2CO_3 \Leftrightarrow HCO_3^- + H^+ \Leftrightarrow CO_3^{2-} + 2H^+$$

Une **augmentation du volume de CO_2 dissous** aboutit donc à une **acidification de la solution d'attaque** et donc à une **meilleure efficacité d'hydrolyse**.

- Notez que les **équations bilan d'hydrolyse** peuvent aussi s'écrire avec le **CO_2** :

$$\underset{\text{orthose}}{2{,}3\,KAlSi_3O_8} + \underset{\text{solution d'attaque}}{8{,}4\,H_2O + 2\,CO_2} \rightleftharpoons \underset{\text{illite}}{K_{0,3}Al_2[Si_{3,7}Al_{0,3}]O_{10}(OH)_2} + \underset{\text{solution de lessivage}}{2\,K^+ + 2HCO_3^- + 3{,}2\,Si(OH)_4}$$

[Cas de le **bisiallitisation de l'orthose** – d'après PEYCRU *et al.* 2008]

2. Cas des roches carbonatées : une altération chimique par dissolution (où intervient encore le CO_2 atmosphérique)

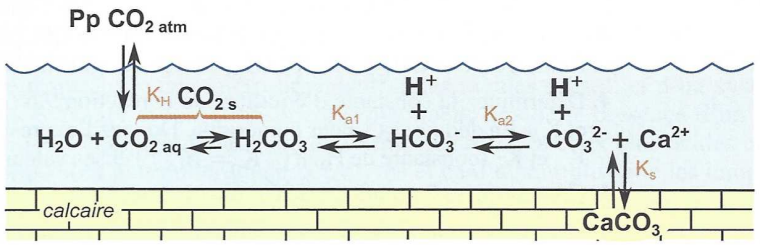
a. L'équation de dissolution des carbonates

- On considère qu'environ **15 % de la surface des continents** est recouverte de **roches carbonatées**.
- Les carbonates sont soumis au **processus de dissolution** qui suit la **réaction bilan** suivante :

$$\boxed{CaCO_3 + H_2O + CO_{2\,atm} \rightarrow 2\,HCO_3^- + Ca^{2+}}$$

- Dans le détail, cette **réaction** implique **plusieurs réactions** dont la **formation d'ions bicarbonates (HCO_3^-)** et **d'acide carbonique H_2CO_3** (figure 19).

Ces aspects sont repris dans le chapitre 25 sur le cycle du carbone.



Les divers équilibres du système des carbonates.

FIGURE 19. Les réactions chimiques en jeu dans le système des carbonates.
D'après PEYCRU *et al.* (2015).

b. Quelques facteurs influençant la dissolution des carbonates : teneur en CO_2 atmosphérique, température, pH, salinité

- La **dissolution des carbonates augmente** lorsque :
  - Le **volume de CO_2 dissous** (lui-même dépendant du **volume atmosphérique de CO_2**) augmente
  - Le **pH** (là aussi largement **dépendant du CO_2** présent) **diminue**
  - La **température** augmente (laquelle défavorise néanmoins la **dissolution du CO_2**) pour l'altération purement chimique, même si cela **favorise aussi les micro-organismes précipiteurs de $CaCO_3$** donc la **bioprécipitation** !
  - La **salinité** augmente.

3. Remarque sur le rôle du CO_2 dans l'altération chimique : l'altération, un puits de consommation du CO_2 atmosphérique

- Que ce soit dans le cadre de **l'hydrolyse** ou de la **dissolution**, on notera que du **dioxyde de carbone** (d'origine **atmosphérique avant dissolution** dans la **solution d'attaque**) est à l'œuvre dans les **processus d'altération chimique**.
- L'altération chimique est donc un **processus consommateur de CO_2** qui, dans les faits, s'équilibre avec les **processus géologiques libérateurs de CO_2** (volcanisme, précipitation de carbonates…).

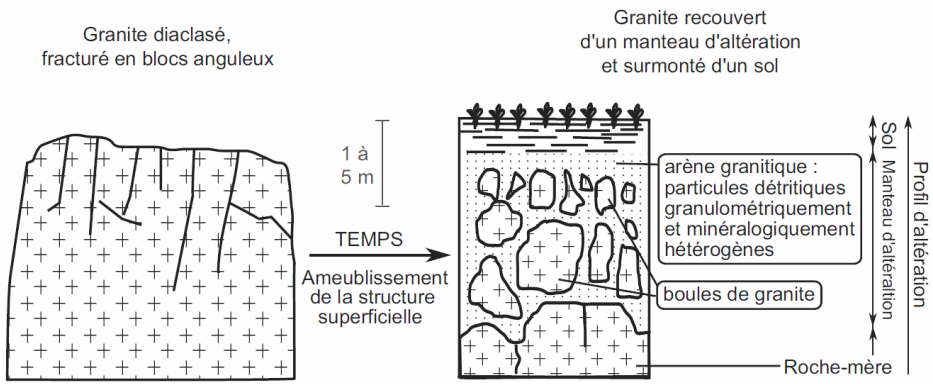
Ces aspects sont repris dans le chapitre 25 sur le cycle du carbone.

C. Les processus mécaniques (= désagrégation mécanique)

- Les **processus mécaniques d'altération pré-cités** dans la partie I participent bien à **l'altération des granites** ou encore, dans une moindre mesure, des **roches carbonatées**.

1. Une désagrégation du granite qui forme des diaclases et aboutit à former un chaos en boules et de l'arène granitique

- Les **diaclases** sont des ***fentes plutôt planes formées généralement dans des plans de fragilité préférentielle d'une roche et qui sont issues des processus de désagrégation mécanique***. : **thermoclastie, cryoclastie, fissuration par ruissellement, haloclastie, vent…** (revoir la partie I).
- Dans le **cas d'un granite** (figure 20), la formation de ces **diaclases** aboutit progressivement, alors que la **désagrégation** et l'**altération chimique** se **poursuivent**, au détachement de ***blocs qui s'arrondissent sous l'effet de l'altération*** (**altération en boules**) et forme des ***paysages de rochers arrondis regroupés localement*** (**chaos granitique**).
- Ce processus s'accompagne de la formation de **plus petits sédiments détritiques** et aussi de ***sables, notamment constitué des grains de quartz non altérés chimiquement, qui peuvent s'accumuler ou se déplacer par érosion*** : c'est l'**arène granitique** (figure 20).



Aspects mécaniques de l'arénisation du granite.
Les blocs initiaux de roche-mère sont soumis à une désagrégation granulaire superficielle qui conduit à la desquamation de fragments rocheux autour de boules résiduelles de roche-mère non encore altérée. En périphérie, les fragments rocheux se désagrègent plus finement encore.

FIGURE 20. Aspects mécaniques de l'altération granitique.
D'après PEYCRU *et al.* (2008).

2. Une désagrégation mécanique possible des carbonates

- Là encore, les **phénomènes mécaniques** (ruissellement des eaux, chocs de blocs déplacés, vents, cryoclasties, thermoclastie) peuvent **fracturer les calcaires** et autres **roches carbonatées**.

3. Une coopération des processus mécaniques et chimiques lors de l'altération

- Il est évident que les **processus mécaniques ou chimiques** ne sont **pas à envisager seuls** – même si, en fonction des conditions, **l'un ou l'autre des processus** peut être **prépondérant** – mais en **agissent en synergie**.
- *Ainsi, dans le **cas du granite**, la **fracturation mécanique** forme des **blocs plus ou moins importants** dont la surface peut alors être **mise au contact de l'eau** qui pourra effectuer **l'hydrolyse** mais aussi, en s'infiltrant, **favoriser les processus de cryoclastie**, etc. Quant à l'arène, les grains de sable sont **aisément transportables** et peuvent alors **s'entrechoquer** (s'impactant les uns les autres), ce qui augmente encore la **désagrégation mécanique** et tend à **arrondir les grains**.*

D. L'enlèvement des produits d'altération qui aboutit à l'érosion des continents

1. Des produits d'altération qui peuvent rester sur place (formation résiduelle) ou se déplacer (sédiments)

- Les **produits d'altération** peuvent (figure 21) :
  - Pour partie ***demeurer sur place***, ce qui assure la mise en place des **formations résiduelles**.
  - Pour partie ***être emportées par ruissellement*** (ou plus rarement les **vents**), ce qui en fait des **sédiments**.

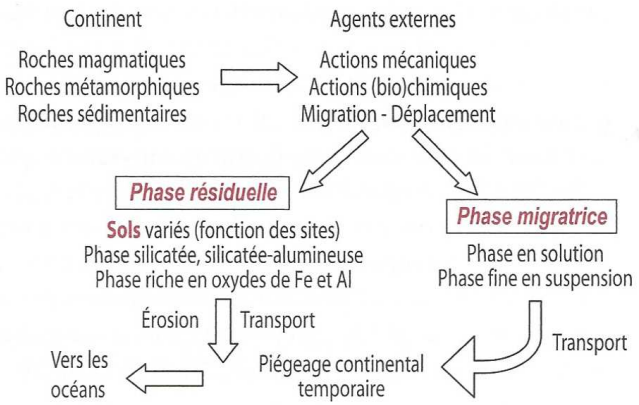


FIGURE 21. Le devenir des produits de l'altération.
D'après EMMANUEL *et al.* (2007).

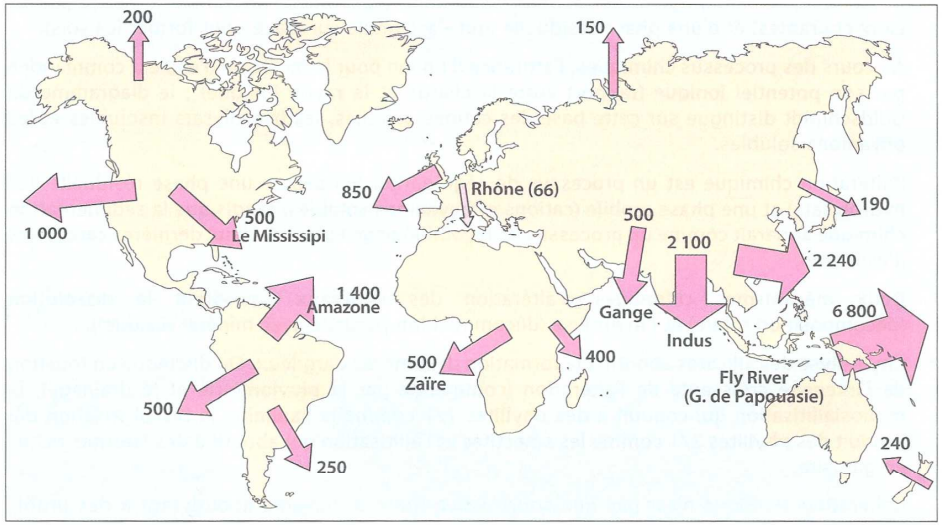
2. Un enlèvement qui s'effectue essentiellement par ruissellement

Le **transport sédimentaire** sera évoqué dans le **chapitre 24 sur la sédimentation**.

- Même si les **petits sédiments détritiques silicatés** peuvent être **déplacés par le vent** dans les régions où il souffle fort, c'est **surtout le ruissellement** qui, par lessivage, enlève de **nombreux produits d'altération** qui deviennent alors des **sédiments**.
- C'est le cas des ions formés lors de **l'altération chimique granitique** ou **carbonatée** mais aussi des **sédiments détritiques** ; notons que :
  - Les **ions** se déplacent **en solution** ;
  - Les **sédiments détritiques** se déplacent **en suspension**.

3. Un flux sédimentaire qui termine dans la mer ou l'océan (s'il n'a pas sédimenté localement sur le continent)

- Les ***dépressions où se déposent et s'accumulent des sédiments*** s'appellent des **bassins sédimentaires**.
- Une **sédimentation continentale** est **possible** mais **l'essentiel du flux sédimentaire issu de l'altération des continents** tend à terminer dans les **mers** et **océans** qui sont **d'importants bassins sédimentaires**. C'est notamment le cas du **flux détritique** qui s'accumule notamment au niveau et au large de **l'embouchure des fleuves** (figure 22).



Bilan annuel de la décharge solide des grands fleuves.

On notera l'influence du climat (maximum d'apports en zone équatoriale) et de l'altitude (Himalaya et zone Est-Asiatique). La décharge totale particulaire est estimée entre 18,3 à 13,5·109 tonnes/an et celle sous forme soluble entre 4,3 à 3,9·109 tonnes/an. Ce qui conduit à un rapport apports particulaires/apports solubles compris entre 4,3 et 3,5. En fait, dans le détail, ce rapport est très variable suivant le climat et la topographie. Ainsi la Lena (Sibérie) présente un rapport de 0,14 contre 11 pour le Gange (Inde).

FIGURE 22. Flux détritique fluvial dans le monde.
D'après RENARD *et al.* (2018).

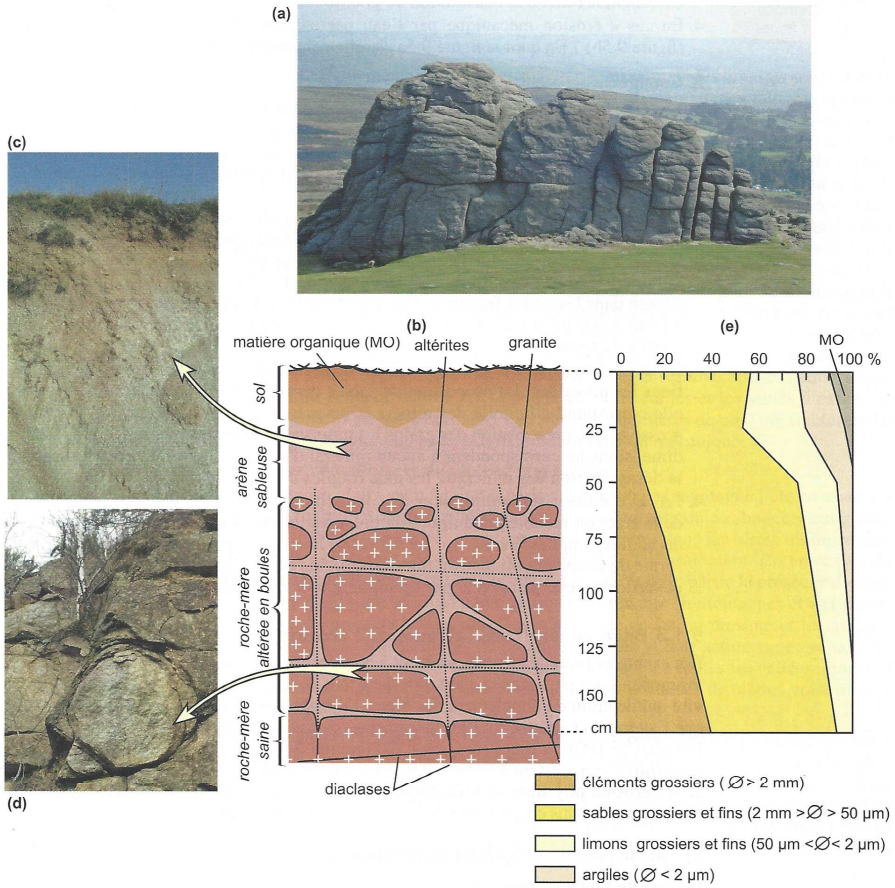
- On pourra noter que le **flux** est particulièrement **important** :
  - Au niveau des **zones équatoriales** (où l'altération est plus forte qu'ailleurs) ;
  - Au niveau des **zones de fort relief** (exemple : Himalaya).

E. Des processus qui influencent le modelé des paysages

- Les **paysages** sont évidemment **impactés** par les **processus d'altération**. On se propose de **caractériser deux paysages de climat tempéré** où s'altèrent les roches-modèles du programme.

1. Le chaos granitique, paysage typique d'altération des terrains granitiques

La figure a est une photo d'un paysage granitique d'un massif ancien. À la faveur d'une carrière, il est possible d'observer le sous-sol granitique à l'affleurement et le sol qui le recouvre (figures b, c et d). L'évolution verticale de la granulométrie de la fraction meuble dénommée dans ce cas arène sableuse est indiquée en parallèle (figure e).



Aspect d'un paysage de massif granitique ancien en zone tempérée et détails du profil d'altération du granite.

(a) Photo ; **(b)** organisation schématique du profil ; **(c)** et **(d)** aperçus des horizons supérieur et inférieur ; **(e)** évolution verticale de la granulométrie de la fraction meuble ou altérites.

FIGURE 22. Chaos granitique et arénisation.
D'après PEYCRU *et al.* (2015).

- La figure 22 montre un **chaos granitique** et un **sol** formé par-dessus. Il s'agit typiquement des **formations observables en terrain granitique altéré** sous nos latitudes. Le profil d'altération montre un niveau d'arène, intermédiaire entre **l'horizon d'altération** et les **horizons superficiels**.
- Le paysage de type **chaos granitique à proprement parler** peut être visible :
  - Soit dans les **zones pas encore recouvertes de sol** ;
  - Soit des les **zones où le sol a été plus ou moins complètement lessivé**, laissant apparaître la **roche sous-jacente** (figure 23).

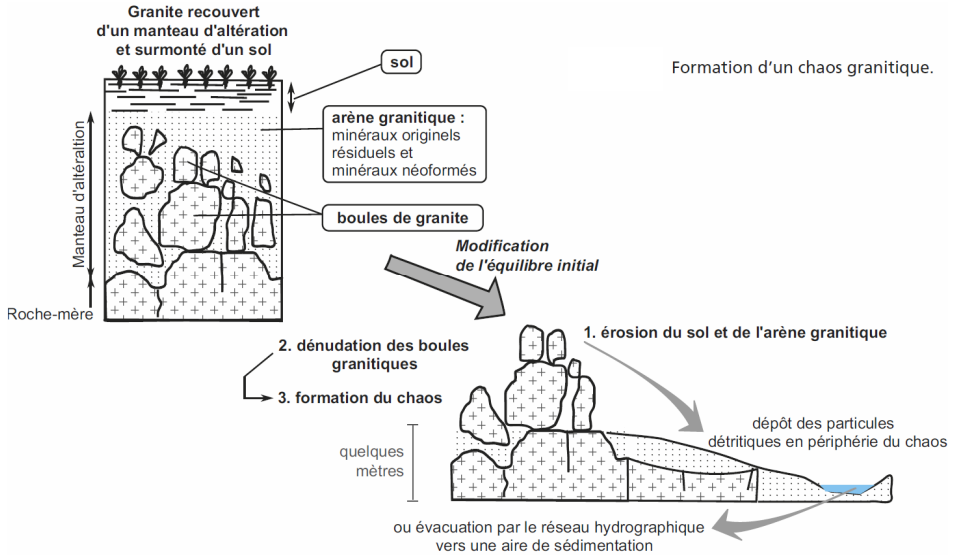
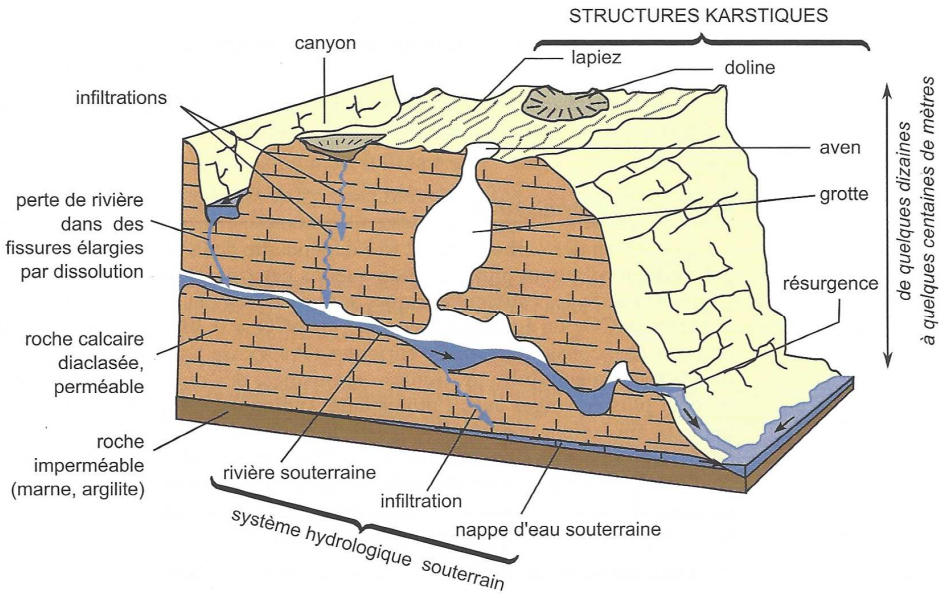


FIGURE 23. La mise au jour d'un chaos granitique par lessivage des formation superficielles.
D'après PEYCRU *et al.* (2008).

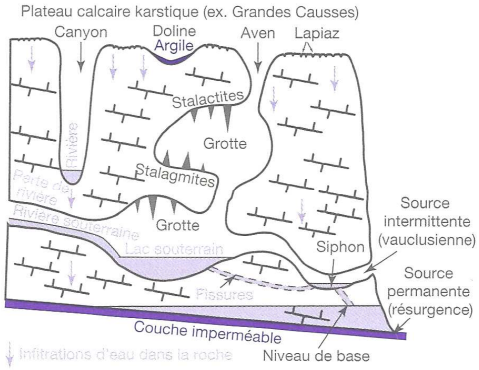
2. Le karst, paysage typique d'altération des terrains carbonatés

- On appelle **karst** ou **paysage karstique** (figure 24) un ***paysage résultant de la dissolution de roches solubles continentales, typiquement des roches carbonatées***. En France, les « causses » situés au Sud et à l'Ouest du Massif central en sont un exemple.
- On y trouve typiquement :
  - Des ***petites dépressions circulaires où s'accumulent un peu d'argile et où pousse la végétation*** nommées **dolines** ;
  - Des ***zones calcaires accidentées (parfois tranchantes) et fracturées par le ruissellement et la dissolution associée*** qu'on nomme **lapiaz** ou **lapiez**.
  - Des ***dépressions profondes et encaissées où coulent des ruisseaux*** (**canyons**), ou des ***trouées profondes*** (**avens**) qui débouchent sur les **grottes** où circulent des **eaux souterraines** ;
  - Dans les **grottes** où règne une **humidité importante** en lien avec les **infiltrations d'eau** et la **nappe souterraine**, se forment des ***concrétions calcaires coniques au sol*** (**stalagmites**) ou ***au plafond*** (**stalactites**) des grottes.



Paysage et lithologie : les reliefs karstiques.

Les *dolines* sont des dépressions circulaires de plusieurs mètres de diamètre tapissées d'argiles dans lesquelles la végétation peut pousser. Elles peuvent s'effondrer s'il y a une grotte dessous. Un *aven* est un gouffre formé par l'effondrement du toit d'une grotte. Les grottes souterraines sont généralement ennoyées par un cours d'eau qui peut disparaitre de la surface et sort au niveau d'une *résurgence*. Les concrétions calcaires portent le nom de *stalagMites* (qui Montent) et de *stalacTites* (qui Tombent).



Morphologie karstique.

FIGURE 24. Paysage karstique.
D'après PEYCRU *et al.* (2015) et DENOEUD *et al.* (2013).

F. Bilan : vue d'ensemble des processus d'altération

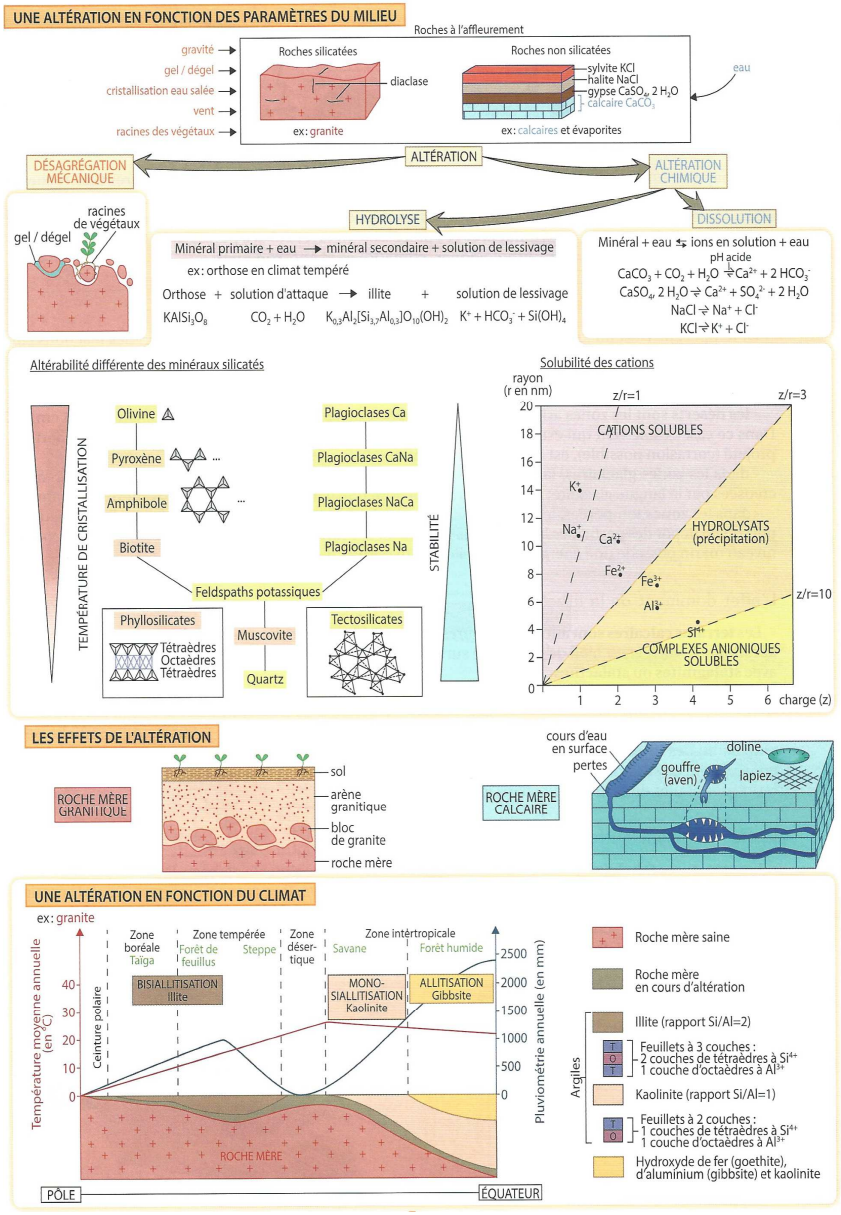


FIGURE 25. L'altération : une vue d'ensemble.
D'après BORDI *et al.* (2018).

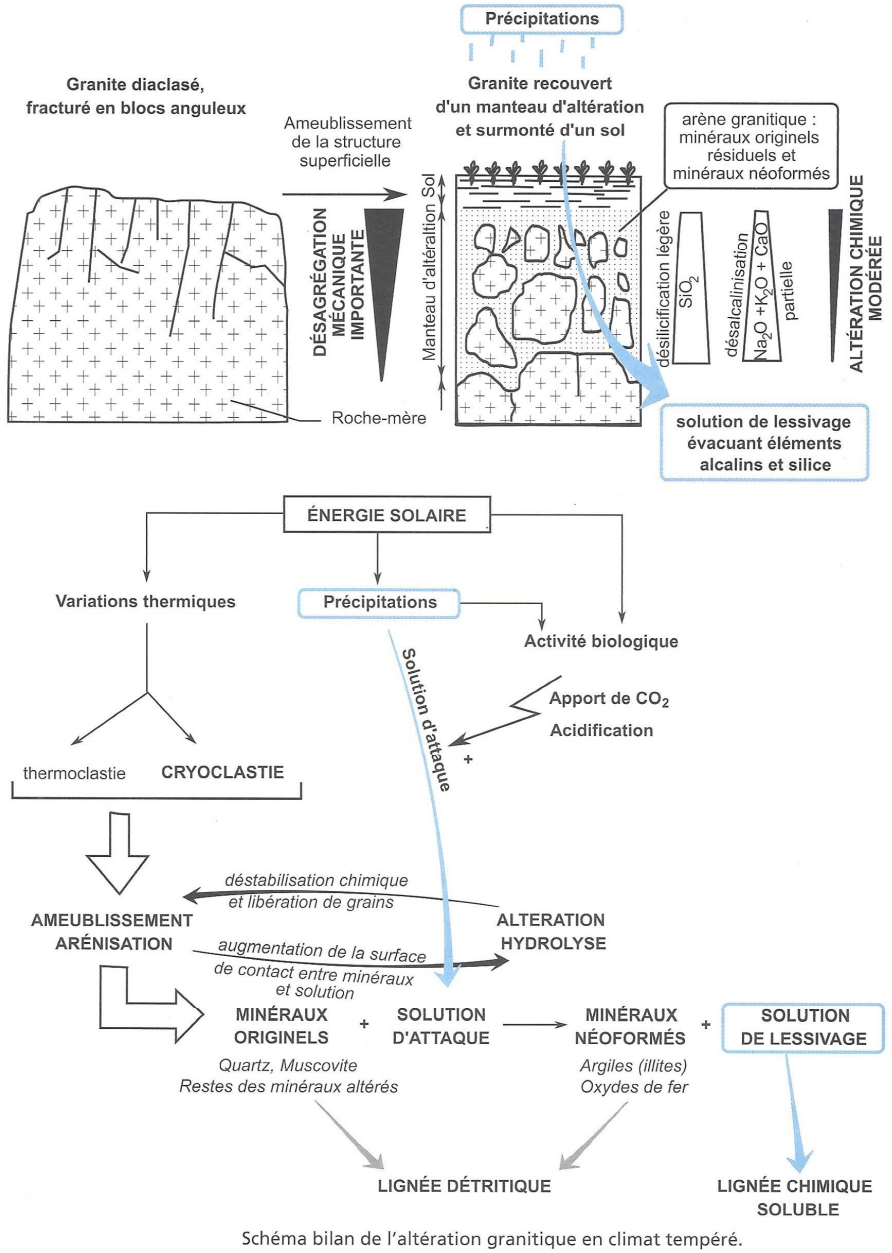


Schéma bilan de l'altération granitique en climat tempéré.

FIGURE 26. L'altération du granite en climat tempéré.
D'après PEYCRU *et al.* (2008).

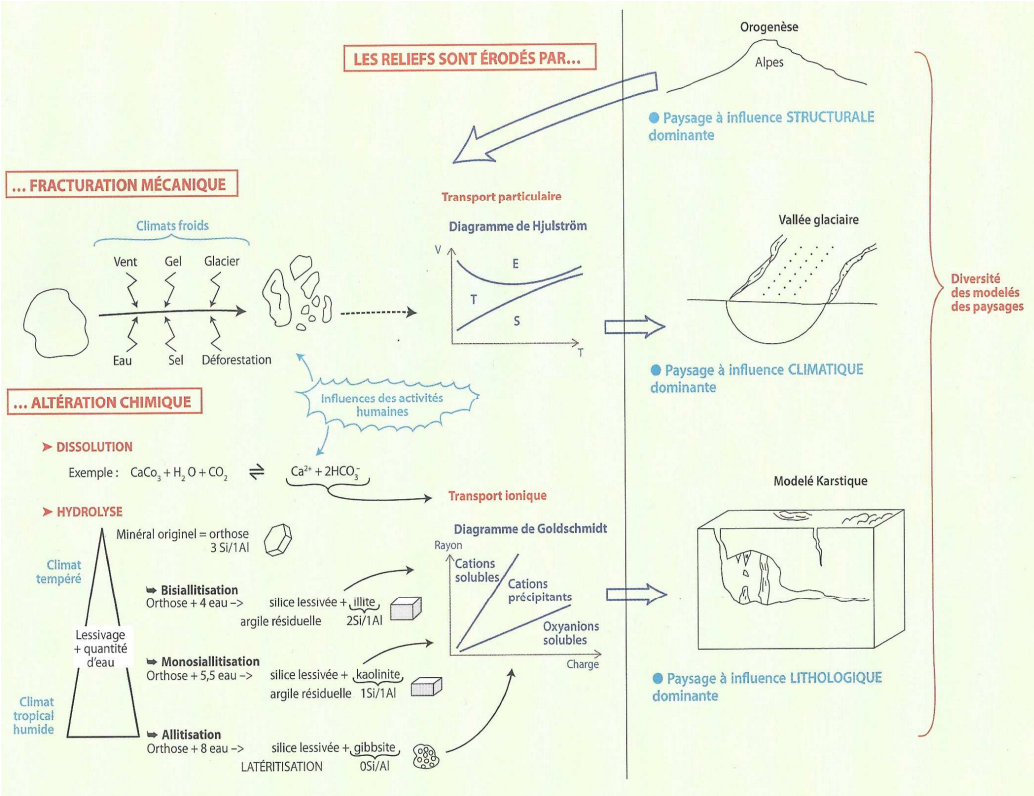


FIGURE 27. L'altération : une vue d'ensemble.
D'après DAUTEL *et al.* (2017).

Bilan (adapté du programme)	✓ L'**altération chimique** transforme la **composition initiale** de la **roche mère** par la **mise en solution** ou la **précipitation** d'éléments. Ces **réactions** s'accompagnent de l'apparition de **nouveaux assemblages minéralogiques**. ✓ L'**altération atmosphérique** des **silicates** consomme du **CO_2**. ✓ L'**altération mécanique** facilite le **morcellement** du **matériau initial** et l'**érosion** permet le **départ en suspension** de certains de ses **éléments**.

III. L'altération (au sens large) des roches, un processus qui aboutit à la genèse de formations résiduelles telles que des sols

- On s'intéresse ici à un exemple de **formations superficielles** en lien avec **l'altération continentale** : les **sols**.

Capacités exigibles	✓ **Relier** l'ensemble de ces processus au départ d'éléments en suspension ou en solution et à la persistance d'éléments résiduels et les processus de formation de sols. ✓ **Montrer l'importance** de l'eau et des êtres vivants dans les processus d'altération, d'érosion et/ou de pédogenèse. ✓ **Souligner** l'inégale répartition des sols en lien avec le climat. ✓ **Déterminer** la nature, évaluer la quantité, **expliquer** l'origine du carbone organique présent dans les sols afin de définir le sol comme un réservoir de carbone.

A. La nature et l'organisation des sols

Notez bien que de **nombreux apports complémentaires** se trouvent dans le **chapitre 20 sur les écosystèmes**.

1. Le sol, interface entre géosphère, biosphère, atmosphère et hydrosphère provenant de l'altération physique, chimique et biologique d'une roche

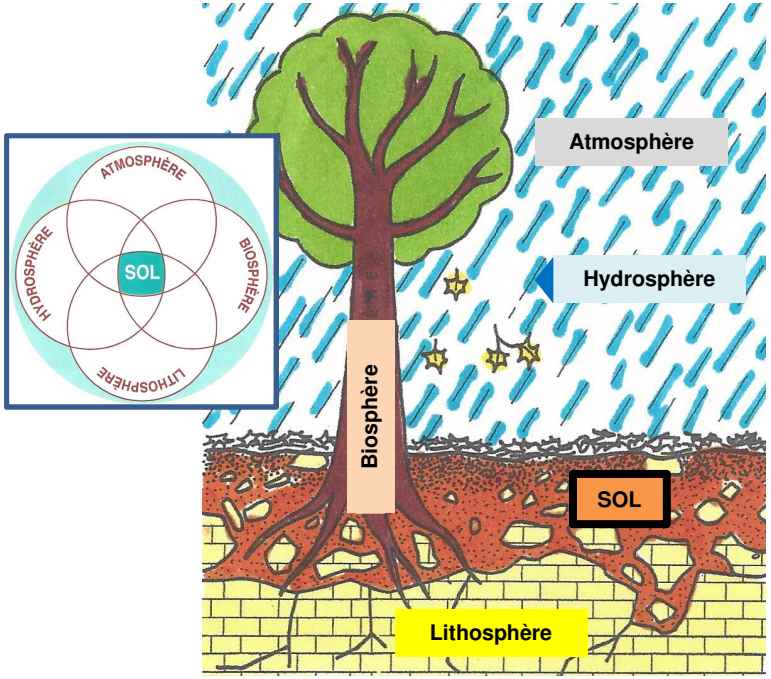


FIGURE 28. Le sol, interface entre vivant et non-vivant.
D'après LIZEAUX, BAUDE *et al.* (2010) et LACOSTE & SALANON (1969), modifié.

- Le **sol** (figure 28) est une ***mince formation superficielle des continents terrestres où se mélangent en proportion variable de la matière minérale et de la matière organique, résultant d'une transformation de la roche sous-jacente (= roche-mère) par des processus physiques, chimiques et biologiques***.
- ***L'étude des sols*** s'appelle la **pédologie**.
- Souvent, les **roches** sont composées de **silicates**, ***minéraux riches en silicium*** ; le ***produit d'altération*** est alors des **argiles** (voir plus haut).

> ***À noter***
> La **composition minérale du sol** peut aussi provenir :
> - De l'altération de roches non silicatées, par exemple des **roches carbonatées** qui génèrent des **paysages karstiques** ou **calcifient** les **sols** ;
> - De matériaux emportés par les **fleuves**, **glaciers**…

- La **composition** et l'**organisation** du sol dépendent donc (figure 28) :
  - de la **nature** de la **roche-mère**,
  - des **conditions climatiques**
  - et de la **diversité biologique** présente en un lieu qui induit des **réactions biochimiques**.
- Il s'agit d'une véritable **interface** entre roches (**géosphère**), eaux pluviales / ruisselantes / souterraines (**hydrosphère**), l'**atmosphère** et les êtres vivants (**biosphère**).

2. La structure spatiale du sol

a. La structuration spatiale du sol : une entité découpée en niveaux superposés, les horizons

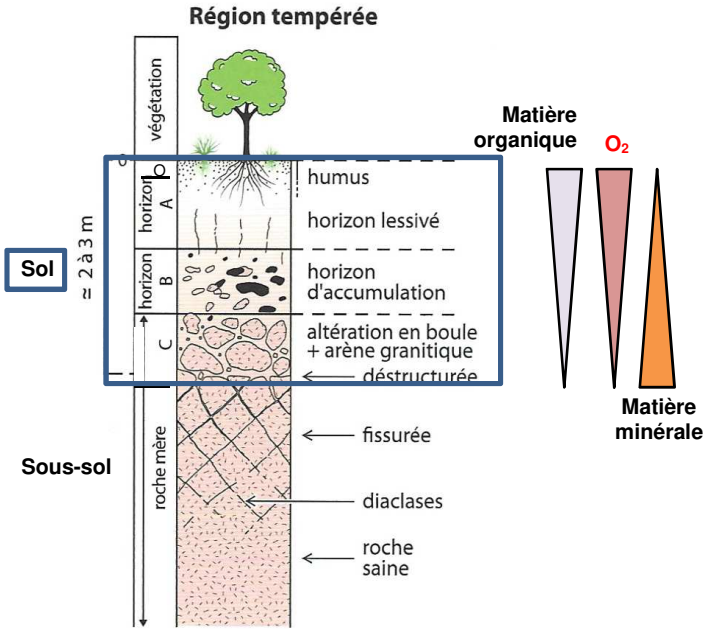


FIGURE 29. Un sol typique de région tempérée (brunisol) et son découpage en horizons.
D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013), précisé/modifié. *Le sol peut être moins épais.*

- Le **sol** peut être découpé en ***différents niveaux superposés*** qu'on appelle **horizons** (figure 73) : les horizons les plus **superficiels** sont les plus riches en **matière organique** et en **organismes vivants** alors qu'en profondeur, on atteint la **roche-mère** (**sous-sol**).
- On distingue classiquement, dans un ***sol brun prairial ou forestier*** (= **brunisol**), les **horizons** suivants (dont l'épaisseur peut varier) (figure 73) :
  - L'**horizon organique (O)** [*parfois incorporé à l'horizon A : A_0*] ***horizon composé de débris végétaux (+ animaux : crottes, cadavres…) plus ou moins fragmentés***.
    - La ***partie superficielle où les débris sont encore reconnaissables à l'œil nu*** est appelée **litière** ;
    - La ***partie plus profonde et très sombre où les débris sont non reconnaissables*** peut être appelée **humus**. *Le mot humus désigne aussi les* ***acides humiques*** *très présents dans ce niveau.*

      (!) **Certains auteurs incluent la litière** dans l'**humus** : le mot est ***alors synonyme d'horizon organique***.
  - L'**horizon de lessivage = mixte = éluvial (A)** : ***horizon composé en proportions semblables d'humus et de manière minérale***.

L'eau y percole de manière importante, permettant notamment le ***lessivage de la matière organique superficielle*** *ainsi emportée plus en profondeur.*

  - L'**horizon d'accumulation = illuvial (B)** : ***horizon accumulant des matériaux, transformés (bio)chimiquement et remaniés, riche en éléments fins (argiles, hydroxydes de fer et d'aluminium, composés humiques)***. On y trouve quelque **débris grossiers (« cailloux »)** provenant de la roche mère.
  - L'**horizon d'altération (C)** : ***horizon où se déroule la fragmentation et l'altération de la roche-mère***.
  - La ***roche-mère peu ou pas altérée*** (parfois notée **horizon R**), ou **sous-sol**.
- On notera bien **<u>l'existence de gradients verticaux (organique, minéral, oxygénique)</u>** (figure 29).

b. Des variations latérales de structure ou composition possibles, éventuellement selon des gradients

- On peut noter des **variations latérales de structure** et de **composition du sol**. Celles-ci peuvent être dues à :
  - La **répartition des organismes aériens**, qui produisent localement plus ou moins de matière organique (feuilles mortes, déjections…) en fonction du site où l'on se trouve,
  - La **présence** et les **mouvements d'eau** à proximité (présence d'un ruisseau, d'une mare… dont l'eau peut percoler dans le sol des berges),
  - La **variation de la roche-mère** sous-jacente,
  - L'existence de **micro-climats**,
  - *Etc.* …
- Là encore, on peut éventuellement observer que **certains paramètres** se répartissent selon des **gradients** (ex. gradient d'humidité à proximité d'un cours d'eau).

3. La composition organique et minérale du sol

Les **aspects biologiques et biocénotiques** sont **abordés** dans le chapitre 20.

- Si l'on ôte les êtres vivants, on trouve dans le sol une **fraction organique** et une **fraction minérale**. Bien entendu, celles-ci sont **mélangées dans le sol**, quoique **deux gradients inverses** (figure 29) puissent s'observer pour chacune des fractions.

a. La fraction organique : molécules biologiques, molécules humiques

- La **fraction organique** du **sol** correspond aux ***molécules organiques présentes dans le sol (en dehors de celles présentes dans les organismes vivants)***.

Notons que de la ***matière organique qui ne se trouve pas*** *[ex. acide humique]* ***(ou plus) dans un être vivant*** *peut être considérée comme appartenant au* ***biotope***.

- Au sein de cette fraction, on trouve :
  - Des **molécules biologiques** situées hors des êtres vivants, souvent **provenant d'organismes morts (cadavres, feuilles mortes, fruits morts, bois mort, mucus, mues…)** (lipides, protides, glucides… y compris les molécules issues des **déjections**, des **cadavres**, des **feuilles mortes**…) ou issues du **fonctionnement des organismes vivants** (déchets tels que l'urée…).
  - Des **particules organiques** qui sont ***issues de la décomposition des êtres vivants par les conditions climatiques ainsi que par la pédofaune (animaux du sol), les 'champignons' décomposeurs et les bactéries du sol***. Ces particules forment l'**humus** et les ***molécules qui le composent***, de **nature extrêmement diversifiée**, sont appelées **molécules humiques** – au sein desquelles les **acides humiques** sont dominants.

b. La fraction minérale : éléments de roches/minéraux (dont les argiles), eau, ions, air

- La **fraction minérale** du sol correspond aux ***substances inorganiques du sol***.
- On y trouve des :
  - des **particules résiduelles d'altération (« sédiments ») [roches, minéraux]** issus de la **désagrégation mécanique** et de **l'altération chimique** de la roche-mère : cailloux, **sables**, **limons**… et bien sûr des **argiles** ;

Comme **les particules du sol subissent souvent un <u>déplacement très modérée</u> et essentiellement vertical** – les **sols** sont souvent des **formations <u>résiduelles</u>** -, on peut **discuter de la pertinence du terme « sédiment »**.

  - de **l'eau**,
  - des **ions** dissous dans l'eau (et parfois des complexes ou précipités),
  - de **l'air**.

c. Des fractions qui s'associent et forment notamment un complexe argilo-humique (CAH) retenant les cations

- Les **argiles** et les **acides humiques** ***s'agglomèrent et forment alors des structures colloïdales chargées négativement qui retiennent les cations*** : ce sont des **complexes argilo-humiques (CAH)**.
- Ceux-ci attirent et **retiennent les cations** (figure 30).
- Les **anions** sont quant à eux dissous dans l'**eau du sol** sans être directement associés aux CAH, quoiqu'ils soient **attirés par les cations portés par le CAH** (exemple du phosphate sur la figure) (figure 30) ; ils sont donc beaucoup **plus facilement lessivés que les cations**.

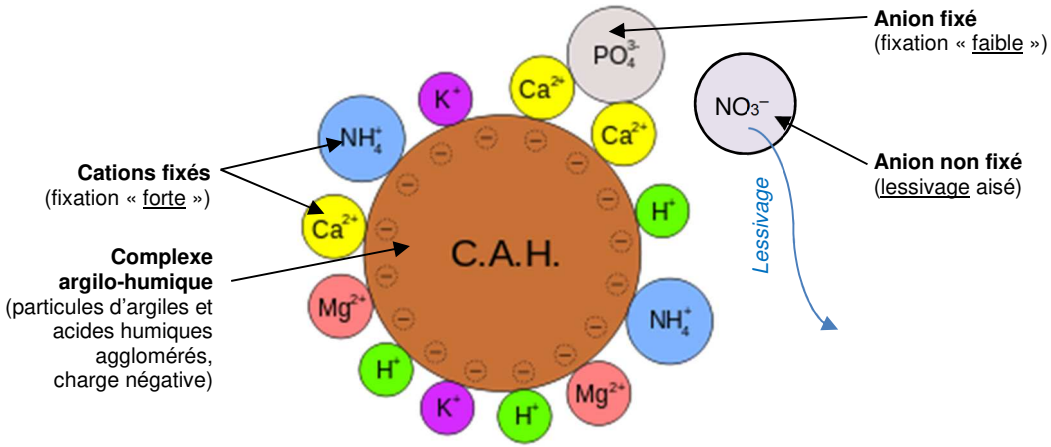


FIGURE 30. Une représentation du CAH associé aux cations qui le stabilisent.
D'après *Wikipédia* (consultation janvier 2016), complété.

B. Les modalités de formation d'un sol (pédogenèse) et les facteurs qui la contrôlent

- On appelle **pédogenèse** ***l'ensemble des processus qui aboutissent à la formation d'un sol***.

1. Une formation qui suppose l'altération d'une roche-mère

a. Une altération largement due aux agents physiques et chimiques, au moins dans un premier temps

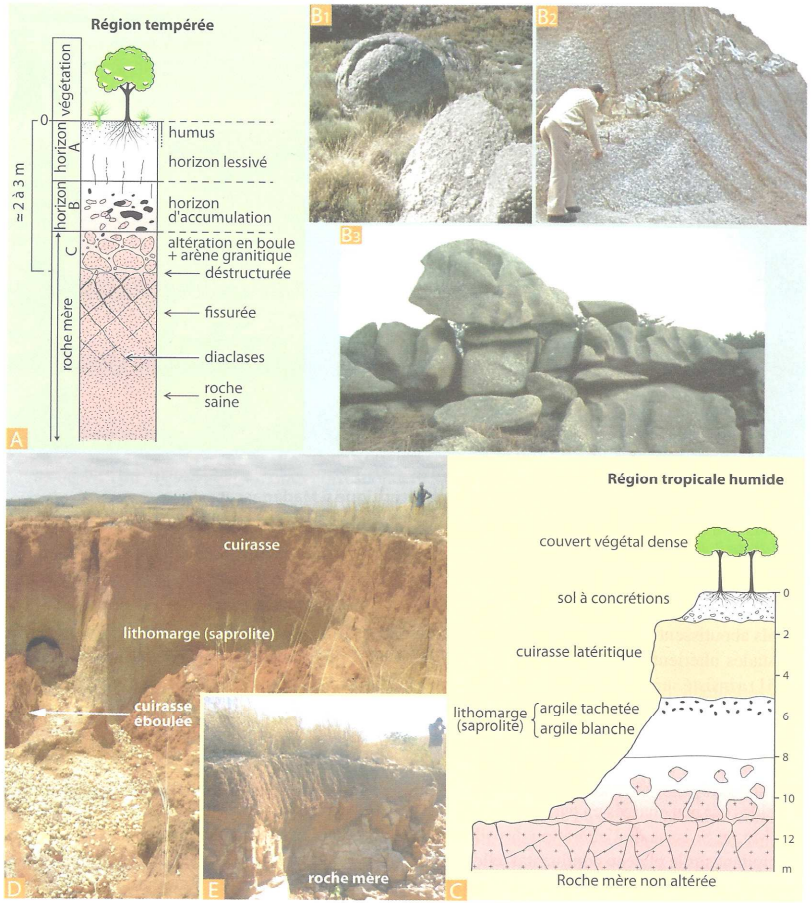
- Lorsqu'une **roche** est **mise à l'affleurement**, elle se retrouve **mise au contact** :
  - **De l'air** avec ses fluctuations de **température**, ses **vents**…
  - **De l'eau météoritique** ou de **ruissellement**.
- Elle subit donc les **processus d'altération physique et chimique** que nous avons décrits dans les parties I et II.
- Les **fragments détritiques de roches** et les **minéraux secondaires** – tels que les **argiles** – formés par altération demeurent **en partie sur place** : ce sont des **particules résiduelles** qui **initient** la **formation du sol**.

b. Une altération dépendante des conditions climatiques et de la roche-mère qui conditionnent le type de sol formé

α. L'altération et notamment le type d'argile formé dépend des conditions climatiques

- Comme nous l'avons vu avec le **diagramme de PEDRO** (figure 18 page 13), le **type d'argile formée** (**bisiallitisation**, **monosiallitisation**) ou la **formation de seuls oxydes** (**allitisation**) dépend des **conditions climatiques** et notamment de la **température**.

β. Comparaison de deux sols issus de l'altération granitique : un sol tempéré (arénitique) et un sol équatorial (latéritique)



Altérations d'un massif granitique : arénisation et latérisation.

A et B. En climat tempéré : l'arénisation du granite se développe dans le sol sur quelques mètres (B2) et s'insinue le long des diaclases. Plus intense à l'intersection des plans de diaclases, elle aboutit à la formation de boules qui demeurent hypogées (B1) ou forment des chaos si les produits meubles de l'arène sont évacués par le ruissellement (B3).

B1 : altération en boule du granite (Mont Lozère, France) ; B2 : arénisation complète d'un granite, on remarquera que le filon d'aplite (roche à grain fin) a résisté à l'altération (Saulzet-le-Chaud, Puy-de-Dôme) ; B3 : chaos granitique (Ploumanach, Côtes d'Armor). (*Photos M. Renard.*)

C. En climat tropical humide : la latérisation (cuirasse et saprolite) peut se développer sur des dizaines de mètres.

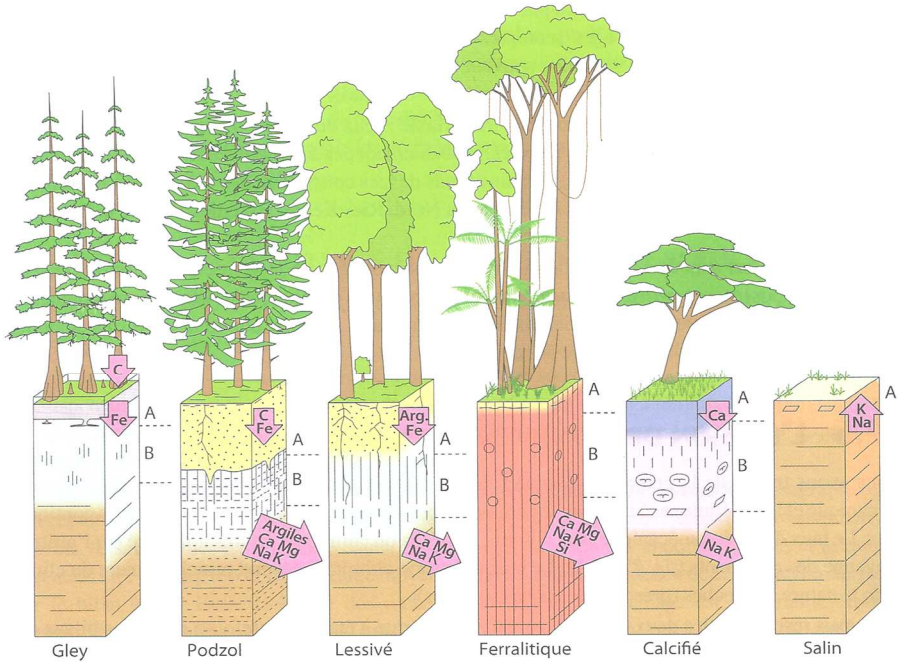
D. Profil latéritique à Madagascar et **E** : transition entre la roche mère (quartzite aurifère) en voie de décomposition et la base du profil latéritique (les personnages donnent l'échelle (*photos R. Razafimbelo*).

FIGURE 31. Arénisation vs. latérisation.
D'après RENARD *et al.* (2018).

- La comparaison d'un **sol forestier tempéré**, de type **arénitique** (conditions de **bisiallitisation**) et d'un **sol forestier équatorial**, de type **latéritique** (conditions d'**allitisation**) montre (figure 31) :
  - Pour le **sol arénitique**, une épaisseur de l'ordre de **2 m** ;
  - Un **sol à concrétion (avec horizons A et B)** sous lequel se trouve une **cuirasse latéritique** (**ferralitique** et/ou **alumineuse**) de **plusieurs mètres**, avant **plusieurs mètres d'argiles** de type kaolinite [épaisseur totale : **dizaine de mètres**].

Notons que, malgré la **végétation luxuriante** qui se développe sur les **ferrisols**, celle-ci s'ancre uniquement sur les **horizons superficiels peu épais** eux-mêmes **entretenus par la végétation** et sa **dégradation**. La **déforestation** engendre une **mise à nu des sols** qui aboutit souvent à leur **altération rapide**.

γ. Des sols résiduels dont la diversité s'explique largement par la combinaison des facteurs climatiques et la nature de la roche-mère [hors programme]



Les six grands types de sols et les végétations associées.

Épaisseurs relatives des différents horizons. Les flèches indiquent les déplacements de cations dans le profil ou leurs évacuations.

FIGURE 32. Une représentation du CAH associé aux cations qui le stabilisent.
D'après RENARD *et al.* (2018).

- La **diversité des sols résiduels** peut être limité à **six grands types** (figure 32) :
  - Les **gleys**, ***sols boueux gorgés d'eau (par engorgement dû à une nappe phréatique) et pauvres en dioxygène***.
  - Les **podzols**, ***sols typiques des régions froides et humides (où les argiles sont lessivées ex. taïga russe)***.
  - Les **sols ferralitiques (ferrisols)**, ***sols où se concentrent des oxydes de fer et d'aluminium typiques des régions équatoriales***.
  - Les **sols lessivés (luvisols)**, ***sols typiques de certaines plaines tempérées où les argiles sont lessivées et s'accumulent dans l'horizon B***.
  - Les **sols calcifiés (calcisols)**, ***sols typiquement formés au-dessus de terrains carbonatés***.
  - Les **sols salins (salisols)**, ***sols parfois formés en milieu aride à très faible végétation et à forte salinité***.

2. Une formation qui suppose l'intervention des êtres vivants et la mise en place d'une longue succession écologique progressive

- Assez rapidement, sur des **sols naissants** (voie sur la **roche nue** où peuvent pousser mousses et lichens), des **êtres vivants** s'installent et participent alors à la **formation des sols**.

a. Une synergie entre activité géologique et activité biologique qui assure une mise en place progressive du sol caractérisée par la différenciation des horizons

- On note que **le sol se forme progressivement par** :
  - **L'action des agents physico-chimiques** de **l'altération** ;
  - L'action des **agents biologiques** :
    - Action chimique : production de **déchets métaboliques variés**, production d'**acides humiques**…
    - Action mécanique : **désagrégation de la roche** ou du **sol** par des **terriers**, les **racines**… ;
  - Le mélange des **produits d'altération** et **matériaux organiques**.
- On note un **épaississement progressif du sol** et une **structuration en horizons différenciés (apparition de C, puis A, puis B)** (figure 33).

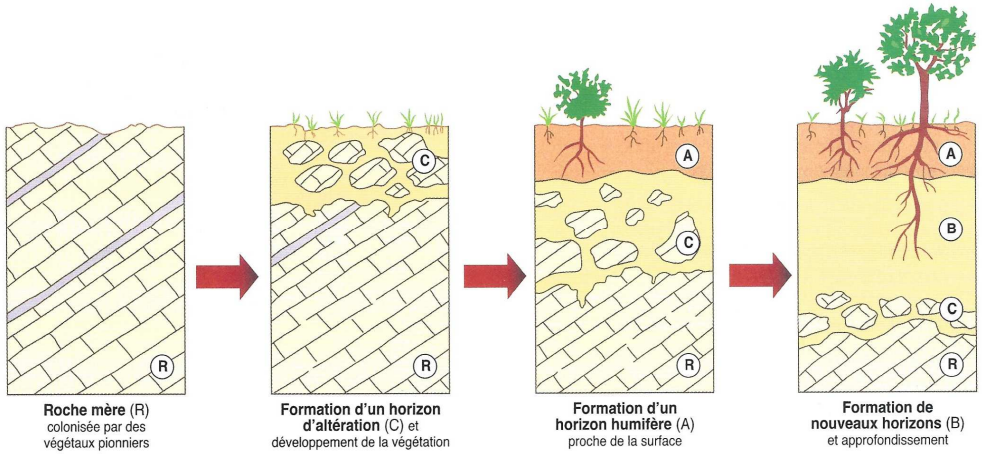


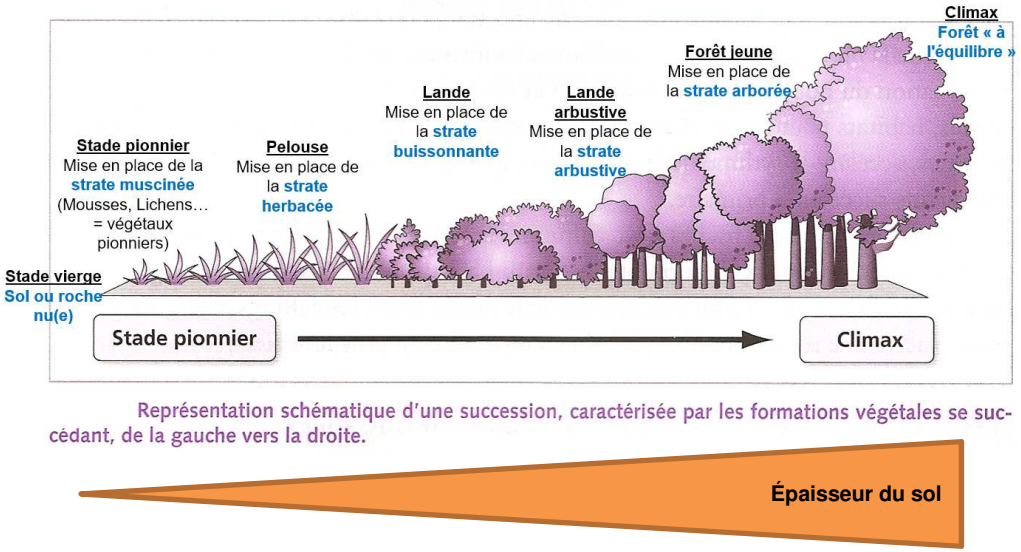
FIGURE 33. La pédogenèse : une approche simplifiée.
D'après LIZEAUX, BAUDE *et al.* (2010).

b. Une mise en place du sol qui s'accompagne d'une succession écologique

- Le **sol** **se structure** et **s'épaissit** en même temps que **se succèdent progressivement** des **cortèges biocénotiques** au cours du **temps**.
- On appelle **succession écologique** (figure 34) ***l'ensemble des modifications successives affectant naturellement une biocénose et aboutissant généralement à l'établissement d'un état d'équilibre biocénotique relatif nommé climax***.

Voir **chapitre d'écologie** (chapitre 20)

- On note que la **succession écologique** présente classiquement les **stades suivants** :
  - Le **stade vierge** où ***la roche est nue*** ;
  - Le **stade pionnier** où ***se met en place la strate muscinale (Mousses, Lichens)*** ;
  - Le **stade pelouse** ***caractérisé par la mise en place de la strate herbacée*** ;
  - Le **stade lande** ***caractérisé par la mise en place de la strate buissonnante*** ;
  - Le **stade lande arbustive** ***caractérisé par la mise en place de la strate arbustive*** ;
  - Le **stade forêt jeune** ***caractérisé par la mise en place de la strate arborée*** ;
  - Le **stade climacique (climax)** ***caractérisé par une forêt stable (« à l'équilibre »)*** ;



Représentation schématique d'une succession, caractérisée par les formations végétales se succédant, de la gauche vers la droite.

FIGURE 34. Une succession écologique typique.
D'après COUVET & TEYSSÈDRE-COUVET (2010).

3. Un processus lent

a. Un épaississement du sol de 0,02 à 0,1 mm par an

- En fonction du type de **climat** et de **roche-mère**, la **pédogenèse** se caractérise par un **épaississement du sol** compris **entre 0,02 et 0,1 mm • an^{-1}**.

b. La formation d'un sol « complet », un processus qui dure entre plusieurs centaines d'années et plusieurs centaines de milliers d'années

- Un **sol différencié** (avec **épaisseur importante** et **horizons définitifs**) peut mettre, en fonction du climat et de la roche-mère, entre **plusieurs siècles** et **plusieurs centaines de milliers d'années**.

C. Le sol, une interface fragile et non renouvelable

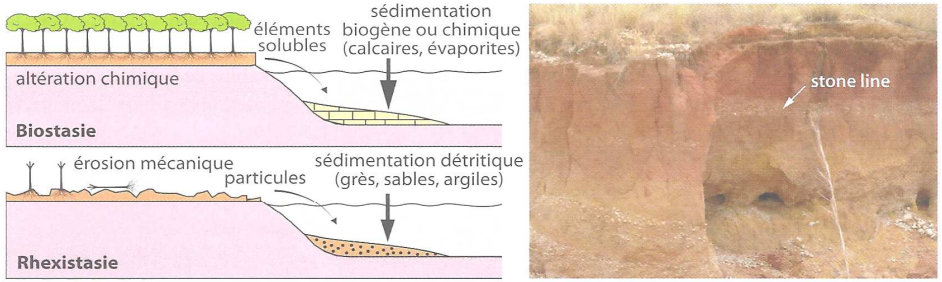
- En lien avec leur **faible vitesse de formation**, les sols sont des **niveaux non renouvelables** à échelle de temps humaine.
- Et pourtant, ces **interfaces** sont **fragiles**.

1. Une interface naturellement maintenue par le couvert végétal : la bio-rhexistasie

- On peut ***expliquer naturellement le maintien ou l'érosion des sols notamment par l'importance du couvert végétal*** : c'est la **théorie de la bio-rhexistasie** (figure 35).
- ***Lorsque le couvert végétal est important, le sol est retenu et l'altération chimique est favorisée*** : c'est la **biostasie**.

  Seuls les **ions lessivés** sont **emportés** (pour l'essentiel), ce qui favorise une **sédimentation chimique** ou **biogène** en aval.
- ***Lorsque le couvert végétal est détruit, le sol est alors fortement soumis à la désagrégation mécanique (notamment par ruissellement) et est alors érodé*** : c'est la **rhexistasie** (du gr. *rhêxis*, rupture).

  Des **particules détritiques** sont **emportées** en masse, ce qui favorise une **sédimentation détritique** en aval.



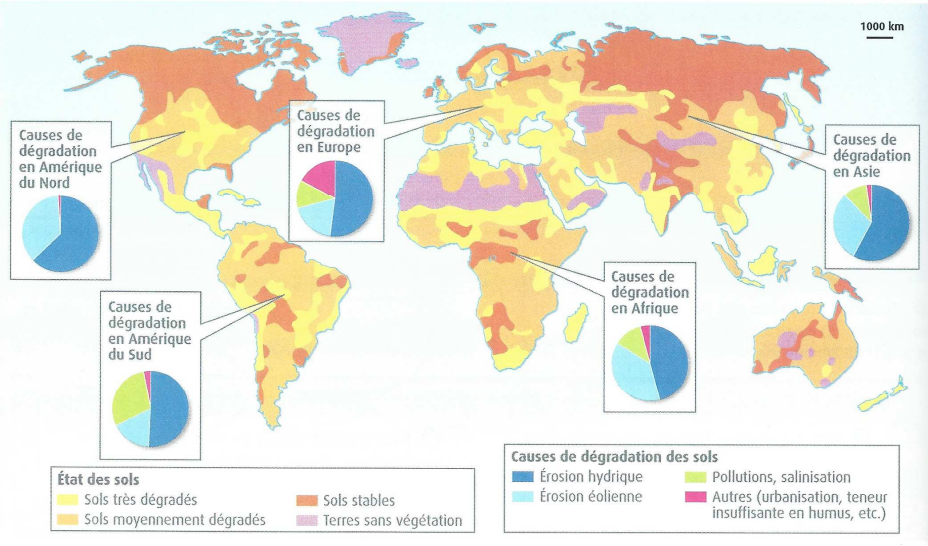
À gauche : représentation schématique de la théorie de la bio-rhexistasie (explications dans le texte).
À droite : profil latéritique présentant des stone lines (vestiges de la roche mère). L'épaisseur du profil est de la vingtaine de mètres (Madagascar, *photo R. Razafimbelo*).

FIGURE 35. Rôle du couvert végétal dans le maintien ou l'érosion naturels des sols : la bio-rhexistasie. D'après RENARD *et al.* (2018).

2. Une interface fortement menacée et altérée par les activités humaines

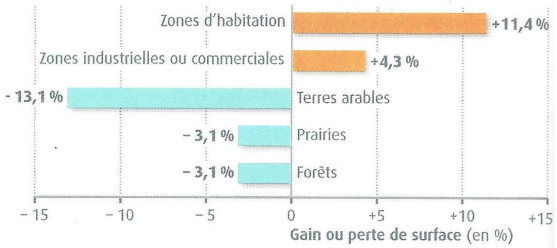
- Fortement **utilisés par l'homme** notamment dans le cadre d'**activités agricoles**, les sols constituent une **ressource fortement utilisée** et, dès lors, **modifiée** et **altérée** par **l'homme** (figures 36-37).

En France, on estime qu'**on perd 1 mm de sol par an** dans les **territoires agricoles**… pour une **ressource se formant avec un taux de 0,02 à 0,1 mm par an** !



Carte de la dégradation des sols sur Terre et des différentes causes de dégradation.

FIGURE 36. La dégradation des sols et leurs causes principales : une vue mondiale.
D'après DUCO *et al.* (2010).



Évolution de l'occupation des sols à proximité des grandes villes françaises entre 1990 et 2000.
L'urbanisation provoque la disparition d'une surface de sol équivalente à un département français tous les dix ans.

FIGURE 37. Évolution de l'occupation des sols en France.
D'après DUCO *et al.* (2010).

a. L'agriculture intensive : épuisement des sols, labours excessifs

- **L'agriculture intensive** favorise directement **l'érosion des sols** par :
  - Un **travail du sol (labour) excessif**
  - Un **épuisement des ressources du sol** qui nécessitent donc **l'ajout d'intrants (engrais)** pour **amender les sols** et y **continuer les cultures**.
- Les **sols rendus meubles** par l'activité agricole, sont **facilement érodés** par les **précipitations**.

b. L'artificialisation : urbanisation et industrialisation

- Beaucoup de sols subissent une **artificialisation** (par de nombreuses **constructions**) qui ne cesse de **croître** à mesure que **la population humaine augmente** : **habitations**, **industries**, **infrastructures routières**, **zones commerciales ou de loisirs**… La « bétonisation » des sols semble inarrêtable.
- Ces terrains où **l'eau ne peut plus s'infiltrer** peuvent alors former des **zones de ruissellement intense**, favorisant les **épisodes d'inondations ou de crues** qui ensuite **affectent les sols en amont ou en aval**.

c. La pollution (agricole, industrielle et ménagère)

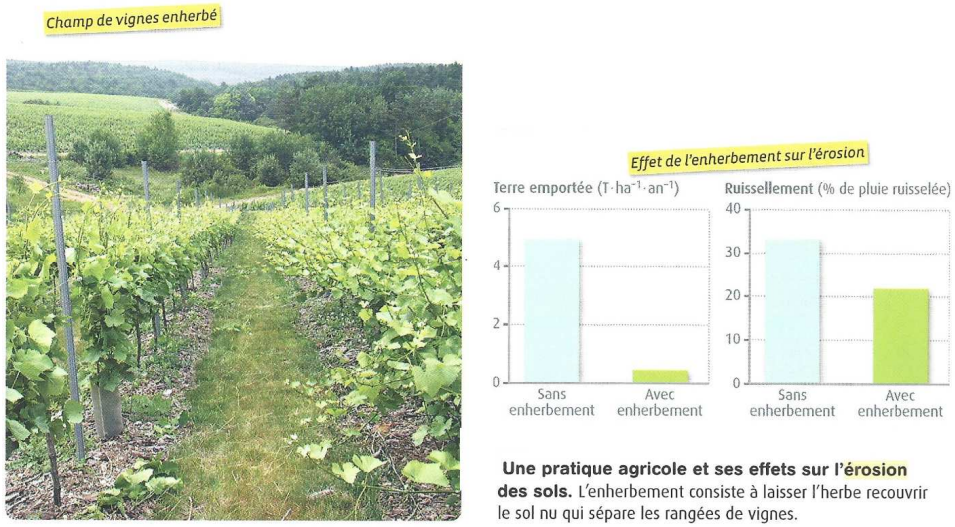
- Les **nombreux rejets agricoles**, **industriels**, **ménagers**… que produit **l'activité humaine** modifient la **composition de l'air** et des **eaux circulantes** qui alors voient leur **pouvoir d'altération chimique augmenter**.

d. La disparition du couvert végétal (déforestation, remembrement)

- Comme nous l'avons vu plus haut avec la **biostasie**, le **couvert végétal** est le meilleur **outil de préservation d'un sol**. Les **activités humaines**, et notamment **l'augmentation de la surface des terres agricoles** par **déforestation**, ou encore le **remembrement** intervenu en Europe au XXe siècle, sont des processus qui tendant à faire **disparaître le couvert végétal** et donc à **déstabiliser les sols**, les rendant plus **vulnérables à l'érosion**.

On estime que la **planète perd environ 7 millions d'ha de forêt par an**.

3. L'émergence de pratiques responsables ?



Une pratique agricole et ses effets sur l'érosion des sols. L'enherbement consiste à laisser l'herbe recouvrir le sol nu qui sépare les rangées de vignes.

FIGURE 38. L'enherbement, un exemple de pratique de préservation des sols.
D'après DUCO *et al.* (2010).

- Une **prise de conscience récente** de la **fragilité** et de la **finitude** de la **ressource pédologique** peut aujourd'hui commencer à **s'observer**.

- On note ainsi localement **l'inflexion de certaines pratiques agricoles** : labours moins profonds et moins fréquents, enherbement (figure 38), replantage de haies bocagères…

D. Le sol, un réservoir de carbone surtout organique

1. Les formes du carbone présent dans le sol : des formes minérales minoritaires et des formes organiques dominantes

- Dans le sol, le **carbone** existe sous **diverses formes** :
  - Des **formes inorganiques** peu abondantes : **CO_2 dissous** dans l'eau, **ions hydrogénocarbonates HCO_3^-**
  - Des **formes organiques** issues de la **minéralisation** de la **nécromasse carbonée** présente dans les **sols** (typiquement des **acides humiques**).

2. Un important réservoir de carbone organique

Voir le **chapitre 25** sur le **cycle du carbone**

- La **quantité de carbone organique** présente dans les **sols** est actuellement estimée à **3 400 Gt** (gigatonnes) (donnée du Réseau Action Climat). La **masse de carbone** y est **trois fois plus élevée** que dans **l'atmosphère** !

Bilan (adapté du programme)	✓ L'**altération d'une roche mère** est à l'origine de la **formation d'un sol**. ✓ Le **sol** est une **interface fragile**. Un **sol** résulte d'une **longue interaction** entre **roches** et **biosphère** : sa **formation lente** contraste avec la **rapidité des phénomènes** qui peuvent conduire à sa **disparition** (**dégradation anthropique**, **érosion**). Le sol est un **réservoir de carbone organique**.

Références

AUBOIN, J., J. DERCOURT & B. LABESSE (1970). *Manuel de travaux pratiques de cartographie. 1er cycle et maîtrise.* Dunod, Paris.

BARD, J.-P. (1990). *Microtextures des roches magmatiques et métamorphiques.* Masson, Paris, 2e édition (1e édition 1980).

BARDINTZEFF, J.-M. (2006). *Volcanologie.* Dunod, Paris, 3e édition (1e édition 1991).

BAROIS, P. (2004). *Guide encyclopédique des volcans.* Delachaux et Niestlé, Paris.

BEAUX, J.-F. & A. MAMECIER (2012). *Les sciences de la Terre.* Nathan, Paris, 2e édition (1e édition 2010).

BEAUX, J.-F., J.-F. FOGELGESANG, P. AGARD & V. BOUTIN (2011). *Atlas de Géologie Pétrologie. BCPST 1re et 2e années.* Dunod, Paris.

BIJU-DUVAL, B. (1999). *Géologie sédimentaire. Bassins. Environnements de dépôts. Formation du pétrole.* Technip, Paris, Institut français du pétrole (École du Pétrole et des Moteurs), Rueil-Malmaison (92).

BISHOP, A. C., W. R. HAMILTON, A. R. WOOLEY (2001). *Guide des minéraux, roches et fossiles.* « Les Guides du naturalistes », Delachaux et Niestlé, Paris, 336 pages.

BORDI, C., F. SAINTPIERRE (dir.), M. ALGRAIN, R. BOUDJEMAÏ, H. CLAUCE, O. GUIPPONI & Y. KRAUSS (2018). *Mémento Géologie BCPST 1re et 2e années.* Vuibert, Paris.

BOTTINELLI, L., A. BRAHIC, L. GOUGUENHEIN, J. RIPERT & J. SERT (1993). *La Terre et l'Univers. Sciences de l'Univers.* Hachette, Paris.

CAMPY, M. & J.-J. MACAIRE (2003). *Géologie de la surface.* Dunod, Paris, 2e édition (1e édition 1989).

CARON, J.-M., A. GAUTHIER, J.-M. LARDEAUX, A. SCHAAF, J. ULYSSE & J. WOZNIAK (2003) (2e édition, 1989). *Comprendre et enseigner la planète Terre.* Ophrys, Gap – Paris, 303 pages.

CHAMLEY, H. (2000). *Bases de sédimentologie.* Dunod, Paris, 2 édition (1e édition 1987).

CHANTRAINE, J., A. AUTRAN, C. CAVELIER (dir.) et collaborateurs (2003). *Carte géologique de la France à l'échelle du millionième.* Service géologique national, Bureau de Recherches géologiques et minières, Orléans, 6e édition.

COJAN, I. & M. RENARD (2006). *Sédimentologie.* Dunod, Paris, 2e édition (1e édition 1999).

CORDIER, P. & H. LEROUX (2008). *Ce que disent les minéraux.* Belin, Paris.

COUVET, D. & A. TEYSSÈDRE-COUVET (2010). *Écologie et biodiversité. Des populations aux socioécosystèmes.* Belin, Paris.

DANIEL, J.-Y. (dir.), A. BRAHIC, M. HOFFERT, R. MAURY, A. SCHAAF & M. TARDY (2006). *Sciences de la Terre et de l'Univers.* Vuibert, Paris, 2e édition (1e édition 1999).

DAUTEL, O. (dir.), A. PROUST, M. ALGRAIN, C. BORDI, A. HELME-GUIZON, F. SAINTPIERRE, M. VABRE & C. BOGGIO (2017). *Biologie Géologie BCPST 1re année.* Vuibert, Paris.

DENŒUD, J., T. FERROIR, O. GUIPPONI, H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON, M.-L. PONS & F. TEJEDOR (2011). *Biologie-Géologie BCPST-véto 2e année.* Tec & Doc, Lavoisier, Paris.

DENŒUD, J., C. GODINOT, O. GUIPPONI, H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON & F. TEJEDOR (2013). *Biologie-Géologie BCPST-véto 1e année.* Tec & Doc, Lavoisier, Paris.

DENŒUD, J., C. GODINOT, O. GUIPPONI, H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON, M.-L. PONS & F. TEJEDOR (2014). *Biologie-Géologie BCPST-véto 2e année.* Tec & Doc, Lavoisier, Paris.

DERCOURT, J. (2002). *Géologie et géodynamique de la France. Outre-mer et européenne.* « Sciences Sup », Dunod, Paris, 3e édition (1e édition 1997), 330 pages.

DERCOURT, J., J. PAQUET, P. THOMAS & C. LANGLOIS (2006). *Géologie. Objets, méthodes et modèles.* Dunod, Paris, 12e édition (1e édition 1974).

DUCO, A. (dir.), A. CARPENTIER, F. CELLE, G. DAOUST, N. DEWITZ, C. ETNER, H. FROISSARD, C. LAVILLE, A.-M. LE MOINE, L. LOISON, C. MÉMETEAU, B. MSIHID, J.-M. PICOCHE, S. REBULARD, P. REY, A. TASSEL, P.-O. THÉBAULT, E. SALGUEIRO, A. SEGUIN & S. VIGIER, 2010. *Sciences de la Vie et de la Terre Seconde.* Belin, Paris.

FOUCAULT, A. & J.-F. RAOULT (2005). *Dictionnaire de Géologie.* Dunod, Paris, 6e édition (1e édition 1980).

FOUCAULT, A., J.-F. RAOULT, F. CECCA & B. PLATEVOET (2014). *Dictionnaire de Géologie.* Dunod, Paris, 8e édition (1e édition 1980).

GODINOT, C., H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON & F. TEJEDOR (2010). *Biologie-Géologie 1re année BCPST-véto.* Tec & Doc, Lavoisier, Paris.

JAUJARD, D. (2015). *Géologie. Géodynamique. Pétrologie. Études de terrain.* Maloine, Paris.

JOLIVET, L. & H.-C. NATAF (1998). *Géodynamique.* Dunod, Paris.

JUNG, J. (1958). *Précis de pétrographie. Roches sédimentaires, métamorphiques et éruptives.* Masson et Cie, Paris.

JUTEAU, T. & R. MAURY (2008). *La croûte océanique. Pétrologie et dynamique endogènes.* Vuibert, Paris.

LACOSTE, A. & R. SALANON (1969). *Éléments de biogéographie et d'écologie.* Nathan, Paris.

LAGABRIELLE, Y., R. MAURY & M. RENARD (2013). *Mémo visuel de Géologie. L'essentiel en fiches. Licence. Prépas. CAPES.* Dunod, Paris.

LIZEAUX, C., D. BAUDE (dir.), V. AUDEBERT, C. BRUNET, G. GUTJAHR, Y. JUSSERAND, A. MATHEVET, P. PILLOT, S. RABOUIN & A. VAREILLE, 2007. *SVT Sciences de la Vie et de la Terre Première S.* Bordas, Paris.

LIZEAUX, C., D. BAUDE (dir.), C. BRUNET, A. CHASLEIX, B. FORESTIER, G. GUTJAHR, Y. JUSSERAND, A. MATHEVET, P. PILLOT, S. RABOUIN & A. VAREILLE, 2010. *Sciences de la Vie et de la Terre Seconde*. Bordas, Paris.
MACKENZIE. W. S. & A. E. ADAMS (2005). *Initiation à la pétrographie*. Dunod, Paris, 3e édition (1e édition 1992), 192 pages.
MARSHAK, S. (2010). *Terre, portrait d'une planète.* Traduction O. ÉVRAD. De Boeck, Bruxelles (3e édition américaine 2008).
MASCLE, G. (2008). *Les roches, mémoire du temps.* EDP Sciences, Les Ulis (91).
MATTAUER, M. (1998). *Ce que disent les pierres.* Belin – Pour la Science, Paris.
MEHIER, B. (1995). *Magmatisme et tectonique des plaques.* « Sciences de la Vie et de la Terre », Ellipses, Paris, 256 pages.
PEYCRU, P. (dir.), J.-M. DUPIN, J.-F. FOGELGESANG, D. GRANDPERRIN, C. VAN DER REST, F. CARIOU, C. PERRIER & B. AUGÈRE (2008). *Géologie tout-en-un 1re et 2e années BCPST.* Dunod, Paris.
PEYCRU, P., J.-F. FOGELGESANG, D. GRANDPERRIN, C. PERRIER (dir.), B. AUGÈRE, J.-F. BEAUX, C. BECK, F. CARIOU, J.-M. DUPIN, J.-L. SCHNEIDER, M. TARDY & C. VAN DER REST (2015). *Géologie tout-en-un BCPST 1er et 2e années.* Dunod, Paris.
POMEROL, C., Y. LAGABRIELLE & M. RENARD (2003) (12e édition, 1965). *Éléments de géologie.* « Masson Sciences », Dunod, Paris, 746 pages.
POMEROL, C., Y. LAGABRIELLE, M. RENARD & S. GUILLOT (2011). *Éléments de géologie.* Dunod, Paris, 14e édition (1e édition 1965).
PROVOST, A. & C. LANGLOIS (2011). *Mini manuel de Géologie – Roches et géochimie.* Dunod, Paris.
RENARD, M., Y. LAGABRIELLE, E. MARTIN & M. DE RAFÉLIS (2018). *Éléments de géologie. 16e édition du « Pomerol ».* 1e édition 1965 (Armand Colin). Dunod, Paris.
VIDAL, P. (1994). *Géochimie.* Dunod, Paris.

Pour faire une fiche de révision : quelques pistes

Il est conseillé de maîtriser les **grandes lignes du plan**

*Le **plan** ne doit pas être perçu comme un carcan figé, ou comme un modèle de plan de dissertation à ré-utiliser en devoir, mais bien comme un **outil d'apprentissage et de structuration** des **concepts importants**. Vous pouvez en **recopier les grandes lignes** ou **annexer le plan du polycopié** directement.*

Il est conseillé de réaliser un **lexique des principales définitions**.

Il est conseillé de reproduire les **schémas (et tableaux) majeurs** :

Liste indicative.

° **Structure** de la **Terre**
° **Phénomène sédimentaire** : schémas d'ensemble
° **Aspects mécaniques** de **l'altération**
° **Glacier** de montagne et **moraines**
° **Granite** : arrangement minéral
° Diagramme de **GOLDSCHMIDT** (simplifié)
° **Argiles** : TOT TOTO… avec des **figurés simples** (pouvoir expliquer)
° Diagramme de **PEDRO** : important !
° **Arénisation** du granite / paysage de **chaos**
° **Équations** du **système carbonates**
° **Paysage karstique**
° **Sol forestier** tempéré
° **Sol latéritique**
° **Pédogenèse**
[° **Succession écologique**]

(!) Ne pas oublier les **formules d'altération**… au moins en **littéral**…

Vous devez en outre **savoir** / **pouvoir** (voir TP) :
° **Identifier**, de manière diagnosée, un **granite** et ses **produits d'altération**
° **Identifier** les principaux types de **sédiments** et **roches sédimentaires**
° **Reconnaître** les **horizons** d'un **sol**

Plan du chapitre

Objectifs : extraits du programme 1
Préambule : structure de la Terre solide 1
Introduction 2

I. L'altération (au sens large) des roches, un processus de destruction des roches impliquant des acteurs et des facteurs de contrôle variés : une vue d'ensemble 3
A. L'inclusion de l'altération dans le phénomène sédimentaire 3
B. Les acteurs de l'altération 3
1. Les objets de l'altération : les roches 3
2. Les agents de l'altération 4
a. Les agents mécaniques 4
α. Des agents à la fois de désagrégation mécanique et d'érosion : les vents et surtout les courants d'eaux (+ la glace) 4
β. Des agents de désagrégation mécanique sans action érosive : variations de température, eau interstitielle, sels… 4
γ. Et la tectonique ! 4
b. Les agents chimiques et leur action 4
α. L'eau et les solutés (formant la « solution d'attaque ») 4
i. Notion de solution d'attaque 4
ii. Deux actions principales possibles d'altération chimique des roches 4
➢ *La modification chimique par la solution d'attaque des minéraux en présence avec production de minéraux résiduels : l'hydrolyse [+ acidolyse, salinolyse, alcalinolyse]* 4
➢ *La décomposition complète par la solution d'attaque d'une roche en ses ions constitutifs : la dissolution* 5
β. L'air 5
i. Un mélange gazeux 5
ii. Une action oxydante du dioxygène 5
c. Les agents biologiques : les êtres vivants (… y compris l'Homme) 5
C. Les produits de l'altération 5
1. Les produits résiduels : des minéraux peu ou pas (parfois pas encore…) altérés 5
2. Les produits de transformation : des minéraux secondaires formés par modification chimique des minéraux primaires 5
3. Les produits de néoformation : des minéraux qui cristallisent à partir d'ions préalablement mis en solution 5
D. Les facteurs de contrôle de l'altération 6
1. La nature des roches (lithologie) et des minéraux en présence 6
2. Le climat (température et précipitations), lui-même largement dépendant de la latitude/longitude et de l'altitude 6
3. Le facteur structural (lié à l'activité tectonique) 7

II. L'altération (au sens large) des roches : mécanismes et conséquences de l'altération chimique et de la désagrégation physique 8
A. Préalable : rappels des caractéristiques des deux roches-mères étudiées comme exemples 8
1. Cas du granite 8
2. Cas des roches carbonatées 10
B. Les processus chimiques (= altération chimique) 10
1. Cas du granite : une altération chimique surtout par hydrolyse 10
a. Une altérabilité chimique variable (altérabilité différentielle) des minéraux silicatés, en lien avec leur température de cristallisation : le diagramme de GOLDISH (1938) 10
b. Une altérabilité des minéraux due à la nature des ions piégés dans le réseau cristallin : le diagramme de GOLDSCHMIDT (1934) 10
c. Une hydrolyse des minéraux silicatés du granite (sauf le quartz) qui aboutit notamment à la formation de minéraux argileux 11
α. Les argiles, composés géologiques ayant une définition granulométrique, une définition minéralogique et une définition pétrologique 11
β. Les argiles, des minéraux en feuillets présentant une certaine diversité 12
γ. Les argiles, minéraux secondaires formés lors de l'altération du granite 12
d. Une hydrolyse dont l'efficacité et la nature des produits formés dépend des conditions climatiques (notamment la température) 12
α. Une formation d'argiles variées voire d'oxydes complets en fonction de l'efficacité croissance de l'hydrolyse : bisiallitisation, monosiallitisation et allitisation (= latéritisation) 12
i. La bisiallitisation : formation d'argiles TOT 13
ii. La monosiallitisation (kaolinisation) : formation d'argiles TO 13
iii. L'allitisation (latérisation) : formation d'oxydes d'aluminium et de fer 13
β. Des processus d'hydrolyse largement contrôlés par les conditions climatiques (notamment la température) : le diagramme de PEDRO (1968) 13
e. Une hydrolyse à laquelle participe le CO_2 dissous dans la solution d'attaque (par son rôle acidifiant) 13
2. Cas des roches carbonatées : une altération chimique par dissolution (où intervient encore le CO_2 atmosphérique) 14
a. L'équation de dissolution des carbonates 14
b. Quelques facteurs influençant la dissolution des carbonates : teneur en CO_2 atmosphérique, température, pH, salinité 14
3. Remarque sur le rôle du CO_2 dans l'altération chimique : l'altération, un puits de consommation du CO_2 atmosphérique 14
C. Les processus mécaniques (= désagrégation mécanique) 14
1. Une désagrégation du granite qui forme des diaclases et aboutit à former un chaos en boules et de l'arène granitique 14
2. Une désagrégation mécanique possible des carbonates 14
3. Une coopération des processus mécaniques et chimiques lors de l'altération 15
D. L'enlèvement des produits d'altération qui aboutit à l'érosion des continents 15
1. Des produits d'altération qui peuvent rester sur place (formation résiduelle) ou se déplacer (sédiments) 15
2. Un enlèvement qui s'effectue essentiellement par ruissellement 15
3. Un flux sédimentaire qui termine dans la mer ou l'océan (s'il n'a pas sédimenté localement sur le continent) 15
E. Des processus qui influencent le modelé des paysages 16
1. Le chaos granitique, paysage typique d'altération des terrains granitiques 16
2. Le karst, paysage typique d'altération des terrains carbonatés 16
F. Bilan : vue d'ensemble des processus d'altération 17

III. L'altération (au sens large) des roches, un processus qui aboutit à la genèse de formations résiduelles telles que des sols 19
A. La nature et l'organisation des sols 19
1. Le sol, interface entre géosphère, biosphère, atmosphère et hydrosphère provenant de l'altération physique, chimique et biologique d'une roche 19
2. La structure spatiale du sol 19
a. La structuration spatiale du sol : une entité découpée en niveaux superposés, les horizons 19
b. Des variations latérales de structure ou composition possibles, éventuellement selon des gradients 20
3. La composition organique et minérale du sol 20
a. La fraction organique : molécules biologiques, molécules humiques 20

b. La fraction minérale : éléments de roches/minéraux (dont les argiles), eau, ions, air 20
c. Des fractions qui s'associent et forment notamment un complexe argilo-humique (CAH) retenant les cations 20
B. Les modalités de formation d'un sol (pédogenèse) et les facteurs qui la contrôlent 21
1. Une formation qui suppose l'altération d'une roche-mère 21
a. Une altération largement due aux agents physiques et chimiques, au moins dans un premier temps 21
b. Une altération dépendante des conditions climatiques et de la roche-mère qui conditionnent le type de sol formé 21
α. L'altération et notamment le type d'argile formé dépend des conditions climatiques 21
β. Comparaison de deux sols issus de l'altération granitique : un sol tempéré (arénitique) et un sol équatorial (latéritique) 21
γ. Des sols résiduels dont la diversité s'explique largement par la combinaison des facteurs climatiques et la nature de la roche-mère [hors programme] 22
2. Une formation qui suppose l'intervention des êtres vivants et la mise en place d'une longue succession écologique progressive 22
a. Une synergie entre activité géologique et activité biologique qui assure une mise en place progressive du sol caractérisée par la différenciation des horizons 22
b. Une mise en place du sol qui s'accompagne d'une succession écologique 23
3. Un processus lent 23
a. Un épaississement du sol de 0,02 à 0,1 mm par an 23
b. La formation d'un sol « complet », un processus qui dure entre plusieurs centaines d'années et plusieurs centaines de milliers d'années 23
C. Le sol, une interface fragile et non renouvelable 23
1. Une interface naturellement maintenue par le couvert végétal : la bio-rhexistasie 23
2. Une interface fortement menacée et altérée par les activités humaines 23
a. L'agriculture intensive : épuisement des sols, labours excessifs 24
b. L'artificialisation : urbanisation et industrialisation 24
c. La pollution (agricole, industrielle et ménagère) 24
d. La disparition du couvert végétal (déforestation, remembrement) 24
3. L'émergence de pratiques responsables ? 24
D. Le sol, un réservoir de carbone surtout organique 25
1. Les formes du carbone présent dans le sol : des formes minérales minoritaires et des formes organiques dominantes 25
2. Un important réservoir de carbone organique 25

Références 25
Pour faire une fiche de révision : quelques pistes 26
Plan du chapitre 27
Plan simplifié du chapitre 28
Plan très simplifié du chapitre 29

Plan simplifié du chapitre

Objectifs : extraits du programme 1
Préambule : structure de la Terre solide 1
Introduction 2

I. L'altération (au sens large) des roches, un processus de destruction des roches impliquant des acteurs et des facteurs de contrôle variés : une vue d'ensemble 3
A. L'inclusion de l'altération dans le phénomène sédimentaire 3
B. Les acteurs de l'altération 3
1. Les objets de l'altération : les roches 3
2. Les agents de l'altération 4
C. Les produits de l'altération 5
1. Les produits résiduels : des minéraux peu ou pas (parfois pas encore…) altérés 5
2. Les produits de transformation : des minéraux secondaires formés par modification chimique des minéraux primaires 5
3. Les produits de néoformation : des minéraux qui cristallisent à partir d'ions préalablement mis en solution 5
D. Les facteurs de contrôle de l'altération 6
1. La nature des roches (lithologie) et des minéraux en présence 6
2. Le climat (température et précipitations), lui-même largement dépendant de la latitude/longitude et de l'altitude 6
3. Le facteur structural (lié à l'activité tectonique) 7

II. L'altération (au sens large) des roches : mécanismes et conséquences de l'altération chimique et de la désagrégation physique 8
A. Préalable : rappels des caractéristiques des deux roches-mères étudiées comme exemples 8
1. Cas du granite 8
2. Cas des roches carbonatées 10
B. Les processus chimiques (= altération chimique) 10
1. Cas du granite : une altération chimique surtout par hydrolyse 10
2. Cas des roches carbonatées : une altération chimique par dissolution (où intervient encore le CO_2 atmosphérique) 14
3. Remarque sur le rôle du CO_2 dans l'altération chimique : l'altération, un puits de consommation du CO_2 atmosphérique 14
C. Les processus mécaniques (= désagrégation mécanique) 14
1. Une désagrégation du granite qui forme des diaclases et aboutit à former un chaos en boules et de l'arène granitique 14
2. Une désagrégation mécanique possible des carbonates 14
3. Une coopération des processus mécaniques et chimiques lors de l'altération 15
D. L'enlèvement des produits d'altération qui aboutit à l'érosion des continents 15
1. Des produits d'altération qui peuvent rester sur place (formation résiduelle) ou se déplacer (sédiments) 15
2. Un enlèvement qui s'effectue essentiellement par ruissellement 15
3. Un flux sédimentaire qui termine dans la mer ou l'océan (s'il n'a pas sédimenté localement sur le continent) 15
E. Des processus qui influencent le modelé des paysages 16
1. Le chaos granitique, paysage typique d'altération des terrains granitiques 16
2. Le karst, paysage typique d'altération des terrains carbonatés 16
F. Bilan : vue d'ensemble des processus d'altération 17

III. L'altération (au sens large) des roches, un processus qui aboutit à la genèse de formations résiduelles telles que des sols **19**
A. La nature et l'organisation des sols **19**
1. Le sol, interface entre géosphère, biosphère, atmosphère et hydrosphère provenant de l'altération physique, chimique et biologique d'une roche 19
2. La structure spatiale du sol 19
3. La composition organique et minérale du sol 20
B. Les modalités de formation d'un sol (pédogenèse) et les facteurs qui la contrôlent **21**
1. Une formation qui suppose l'altération d'une roche-mère 21
2. Une formation qui suppose l'intervention des êtres vivants et la mise en place d'une longue succession écologique progressive 22
3. Un processus lent 23
C. Le sol, une interface fragile et non renouvelable **23**
1. Une interface naturellement maintenue par le couvert végétal : la bio-rhexistasie 23
2. Une interface fortement menacée et altérée par les activités humaines 23
3. L'émergence de pratiques responsables ? 24
D. Le sol, un réservoir de carbone surtout organique **25**
1. Les formes du carbone présent dans le sol : des formes minérales minoritaires et des formes organiques dominantes 25
2. Un important réservoir de carbone organique 25

Références **25**
Pour faire une fiche de révision : quelques pistes **26**
Plan du chapitre **27**
Plan simplifié du chapitre **28**
Plan très simplifié du chapitre **29**

Plan très simplifié du chapitre

Objectifs : extraits du programme **1**
Préambule : structure de la Terre solide **1**
Introduction **2**

I. L'altération (au sens large) des roches, un processus de destruction des roches impliquant des acteurs et des facteurs de contrôle variés : une vue d'ensemble **3**
A. L'inclusion de l'altération dans le phénomène sédimentaire **3**
B. Les acteurs de l'altération **3**
C. Les produits de l'altération **5**
D. Les facteurs de contrôle de l'altération **6**

II. L'altération (au sens large) des roches : mécanismes et conséquences de l'altération chimique et de la désagrégation physique **8**
A. Préalable : rappels des caractéristiques des deux roches-mères étudiées comme exemples **8**
B. Les processus chimiques (= altération chimique) **10**
C. Les processus mécaniques (= désagrégation mécanique) **14**
D. L'enlèvement des produits d'altération qui aboutit à l'érosion des continents **15**
E. Des processus qui influencent le modelé des paysages **16**
F. Bilan : vue d'ensemble des processus d'altération **17**

III. L'altération (au sens large) des roches, un processus qui aboutit à la genèse de formations résiduelles telles que des sols **19**
A. La nature et l'organisation des sols **19**
B. Les modalités de formation d'un sol (pédogenèse) et les facteurs qui la contrôlent **21**
C. Le sol, une interface fragile et non renouvelable **23**
D. Le sol, un réservoir de carbone surtout organique **25**

Références **25**
Pour faire une fiche de révision : quelques pistes **26**
Plan du chapitre **27**
Plan simplifié du chapitre **28**
Plan très simplifié du chapitre **29**

© Tanguy JEAN. Les textes et les figures originales sont la propriété de l'auteur. Les figures extraites d'autres sources restent évidemment la propriété des auteurs ou éditeurs originaux.
Document terminé en mars 2019 • Dernière actualisation : avril 2020.
Contact : Tanguy.Jean4@gmail.com
Adresse de téléchargement : https://www.svt-tanguy-jean.com/

Ces données sont placées sous licence *Creative Commons Attribution – Pas d'Utilisation commerciale 4.0 CC BY NC* qui autorise la reproduction et la diffusion du document, à condition d'en citer explicitement la source et de ne pas en faire d'utilisation commerciale.