

ENSEIGNEMENT DE SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE (SVT)
°° SCIENCES DE LA TERRE °°
>> Cours <<

Chapitre 24

Modelés des paysages et transferts de matériaux en surface : altération et érosion

COURS COMPLET RÉDIGÉ

Objectifs : extraits du programme

ST-E Le phénomène sédimentaire (BCPST 1)	
Dans cette partie, l'étude des roches sédimentaires, formées à la surface de la Terre, souligne le rôle fondamental de l'eau dans le phénomène sédimentaire. Depuis la phase primordiale d'altération et d'érosion de roches préexistantes, les produits formés, solubles et/ou solides, sont transportés jusqu'à leur milieu de sédimentation au sein d'un bassin sédimentaire. La diversité des processus d'altération, de transport et de sédimentation explique la diversité des sédiments qui évolueront via la diagénèse en roches sédimentaires, essentiellement sous l'effet de la compaction et de la cimentation. Le phénomène sédimentaire est intimement lié au vivant. Les archives sédimentaires donnent accès à des informations utiles à la reconstitution historique et paléoenvironnementale.	
Savoirs visés	Capacités exigibles
ST-E-1 Modelés des paysages et transferts de matériaux en surface	
ST-E-1-1 Les facteurs d'altération	
Les matériaux en surface sont soumis à de multiples processus d'altération, qui engendrent des formations résiduelles, et d'érosion, avec en particulier l'entraînement de produits par les eaux. La diversité des modelés des paysages est liée à l'action relative de différents facteurs : des facteurs intrinsèques (lithologie, relief) et des facteurs externes (climat, végétation). Les principaux processus d'altération chimique par l'eau sont l'hydrolyse et la dissolution. L'altérabilité des silicates est due à la structure des cristaux et à la nature des ions présents dans le réseau cristallin qui interagissent avec les molécules d'eau. L'hydratation des ions est proportionnelle à leur charge ionique et inversement proportionnelle à leur rayon atomique. Cette propriété est illustrée par le diagramme de Goldschmidt. L'hydrolyse des silicates conduit à la formation d'argiles dont la nature est en relation avec l'intensité de l'altération, qui elle-même dépend du climat (bisiallisation, monosiallisation, allitisation).	- Analyser le modelé d'un paysage à partir de documents photographiques et cartographiques. - Identifier les principaux processus d'altération et d'érosion déterminant l'évolution d'un paysage. - Proposer des hypothèses sur l'influence possible des différents facteurs structuraux, lithologiques et climatiques dans l'évolution du paysage. - Caractériser le phénomène d'altération à partir de données de l'échelle du paysage à celle du minéral (sur l'exemple du granite). - Relier la diversité des produits d'altération aux conditions d'altération (climat et végétation). - Utiliser le diagramme de Goldschmidt afin de distinguer les éléments lessivés et les produits insolubles. - Analyser l'altération des roches carbonatées en s'appuyant sur l'équilibre des carbonates et ses éléments de contrôle. - Interpréter la présence éventuelle d'oxydes et d'hydroxydes de fer et d'aluminium (latéritisation) dans les

Les produits de l'altération sont différemment mobilisables, en particulier en fonction de leur solubilité.	formations résiduelles (exemple des bauxites).
Précisions et limites : <i>Le raisonnement est privilégié, construit sur un ou des exemples au choix qui peuvent être pris localement. Sont à connaître, quelques facteurs de surface (altitudes, relief et pentes, végétation) et quelques facteurs climatiques (température, précipitations). Les stades d'hydrolyse sont étudiés sur les feldspaths alcalins. On se limite à l'illite (TOT) et à la kaolinite (TO) pour mettre en évidence la bisiallisation et la monosiallisation, à partir de l'hydrolyse de l'orthose. La classification des argiles n'est pas au programme.</i>	
Liens : Le cycle du carbone (BG-A-1) Les sols (BG-B) Le climat de la Terre (BG-C) Les ressources géologiques (ST-I-2) Activités de terrain Géographie : analyse d'un paysage	

Introduction

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 :
 - o Sa **composition** :
 - **Diazote N₂ : 78 %**
 - **Dioxygène O₂ : 21 %** (rendant l'atmosphère très oxydante)
 - Le « reste » (gaz rares, CO₂...) : 1 %. On verra notamment en BCPST le rôle du **dioxyde de carbone CO₂**, seulement présent à **0,04 %** mais très important...
 - o Ses **écoulements (vents)**
 - o Sa **température** avec ses **variations**

On peut appeler **climat** **l'ensemble des conditions atmosphériques moyennes qui règnent dans un lieu donné**.

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**. Les **êtres vivants** peuvent également intervenir.

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**).

On appelle **paysage** une **portion visible de la surface terrestre continentale**. Le **modelé des paysages** peut désigner **l'organisation, la géométrie et la forme générales de la surface terrestre continentale sous l'effet des processus sédimentaires (formation, enlèvement, transport et/ou dépôt de sédiments)**.

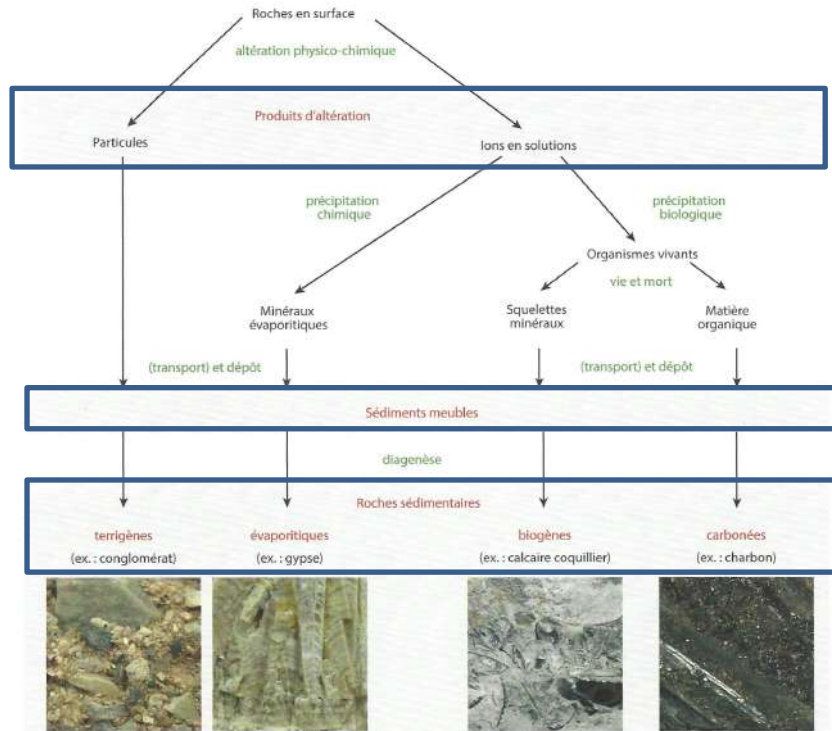
Quels sont les modalités, mécanismes et conséquences de la destruction des roches ?

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

Capacités exigibles

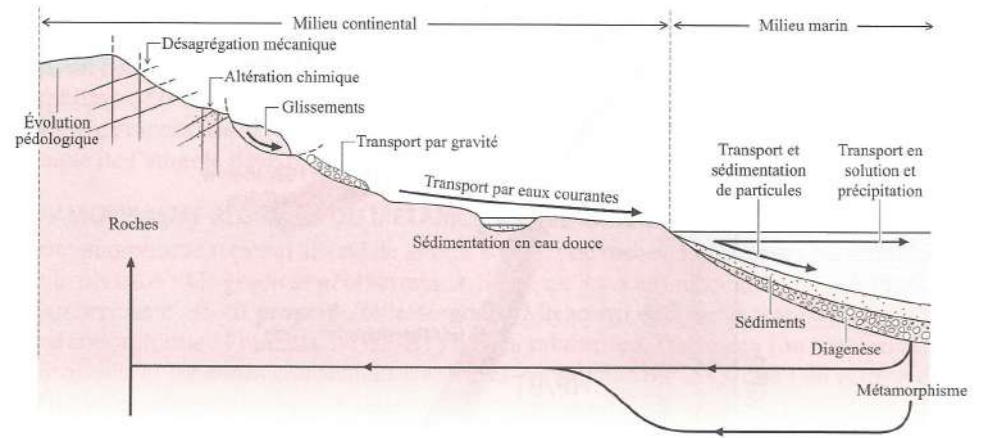
- ✓ Analyser le modelé d'un paysage à partir de documents photographiques et cartographiques.
- ✓ Identifier les principaux processus d'altération et d'érosion déterminant l'évolution d'un paysage.
- ✓ Proposer des hypothèses sur l'influence possible des différents facteurs structuraux, lithologiques et climatiques dans l'évolution du paysage.
- ✓ Relier la diversité des produits d'altération aux conditions d'altération (climat et végétation).

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



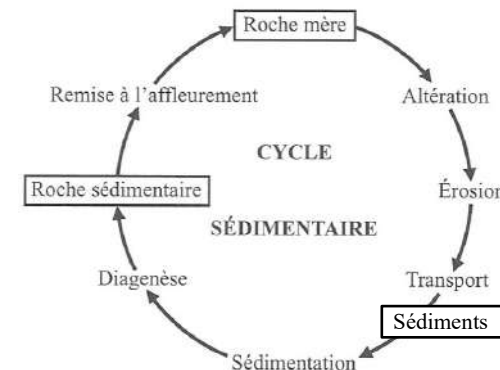
▲ FIGURE 1. Vue d'ensemble (très simplifiée) du phénomène sédimentaire.
D'après JAUJARD (2015).

- Le **phénomène sédimentaire** fait référence aux **processus suivants** (figures 1-2) :
 - 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 E2. Roches sédimentaires



▲ FIGURE 2. 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 3).



▲ FIGURE 3. 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

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 25 (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...

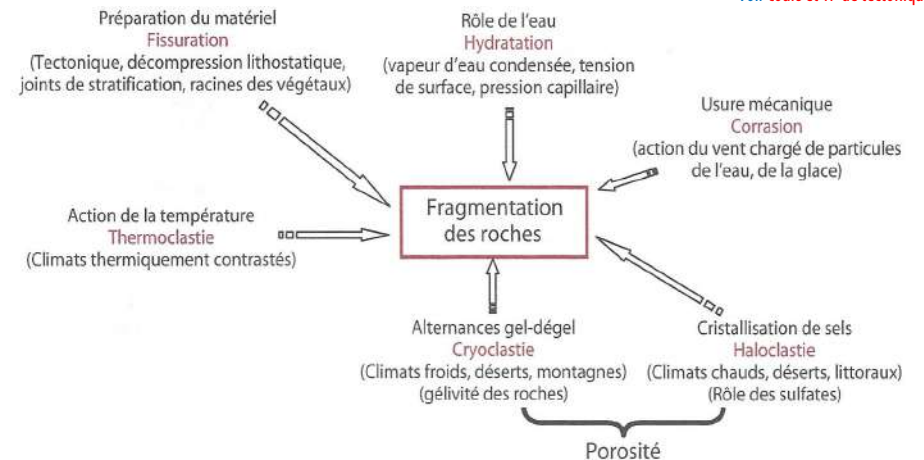
- Les **agents mécaniques** qui n'ont qu'une **activité principalement désagrégative** sont :
 - Les **variations de température** (impliquant ou non l'eau), notamment les **variations journalières** (mais aussi **saisonniers**). Elles peuvent avoir pour **conséquences** :
 - Des **phénomènes de dilatation** 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 de **hydratation-déshydratation de roches qui peuvent en modifier la structure** (ex. **fentes de dessiccation** 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**.

y. 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 cours et TP de tectonique



▲ FIGURE 4. **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'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 CO₂ (d'après COJAN & RENARD, 2006) :



albite

kaolinite

acide silicique

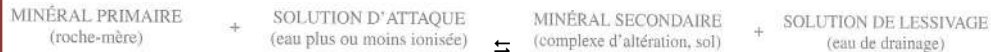
- Au sens large, on y inclut souvent – quoique à tort – **l'action altérative des composés acides (acidolyse)**, **celle des composés basiques (alcalinolyse)** et **celle des chlorures ou sulfates (salinolyse)**.

▼ **TABEAU 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**) :



➤ **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 solvation (là encore éventuellement aidée du CO₂ 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) :



β. L'air

i. Un mélange gazeux

Rappel de sa **composition** :

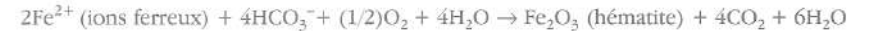
- Diazote** N₂ : **78 %**
- Dioxygène** O₂ : **21 %** (rendant l'atmosphère très oxydante)

- Le « reste » (gaz rares, CO₂...) : 1 %. On verra notamment le rôle du **dioxyde de carbone** CO₂, 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) :



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).

▼ **TABEAU 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

- L'altération due à **l'action combinée des acteurs mécaniques, chimiques et biologiques** est sous le **contrôle de plusieurs paramètres**, arbitrairement classés par le **nouveau programme** en facteurs « intrinsèques » et « extrinsèques ».
Cette **dichotomie** est sans doute un peu **artificielle**...

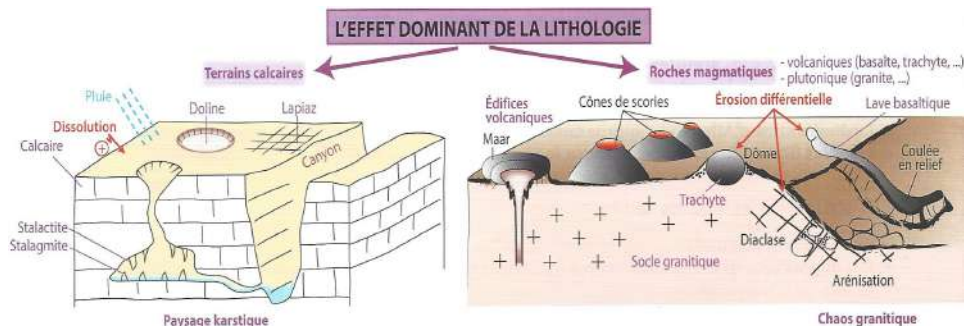
1. Un contrôle par des facteurs « intrinsèques » (= propres aux formations géologiques)

a. 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**) (figure 5 + voir plus loin).



▲ FIGURE 5. **Contrôle lithologique de l'altération.** D'après BORDI et al. (2018).

b. Le facteur structural (lié à l'activité tectonique) ; notion de relief structural

- 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 **modèle des paysages** et donc la manière dont les **agents physiques / chimiques / biologiques** peuvent altérer les roches.

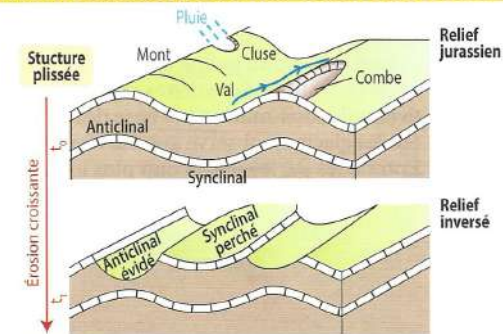
Exemple de contrôle structural dominant

En **terrain plissé**, les **roches les plus fragiles** mises à l'**affleurement** seront **préférentiellement altérées**, de sorte que le **paysage** peut ainsi être **modélisé par l'érosion différentielle** (figures 6-7).

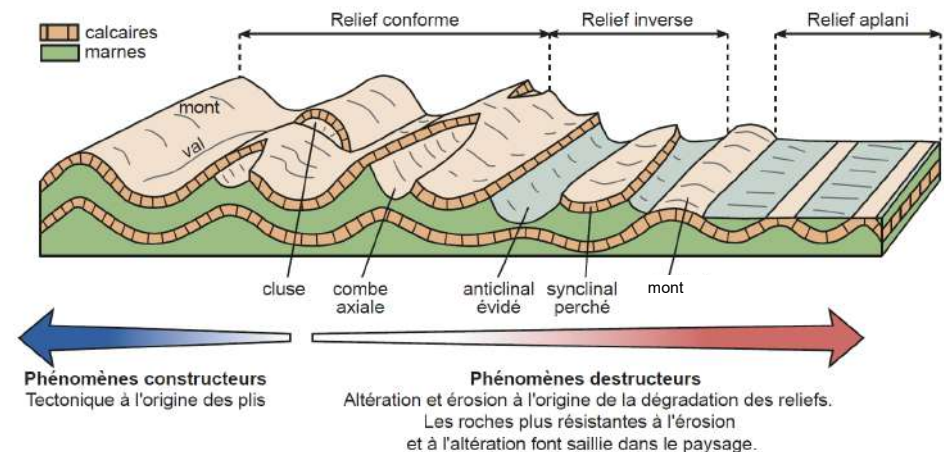
Plus l'**érosion augmente**, plus le **relief** passe de **conforme** à **inverse**.

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**.

L'EFFET DOMINANT DE LA COMPOSANTE STRUCTURALE



▲ FIGURE 5. **Contrôle structural de l'altération et de l'érosion.** D'après BORDI et al. (2018).

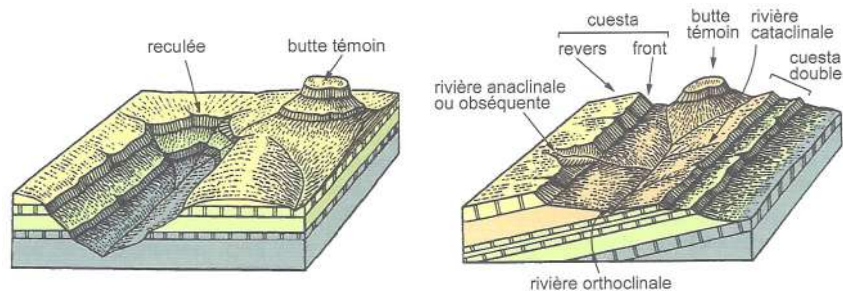


▲ FIGURE 6. **Reliefs conformes et inverses.** D'après BORDI et al. (2018).

Un peu de géomorphologie

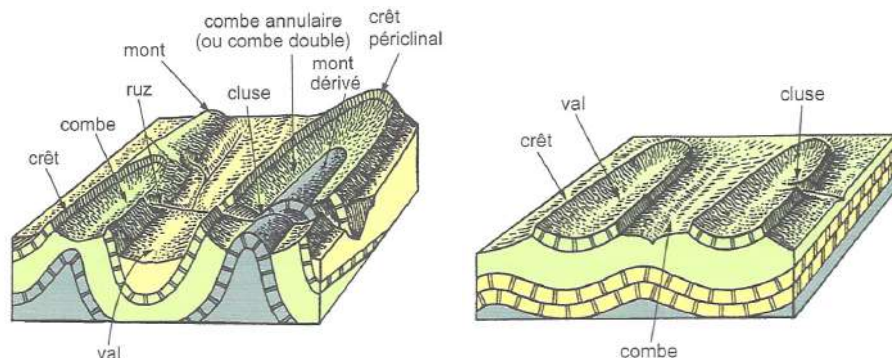
Voir le cours et les TP de cartographie

- On appelle **relief structural** la **forme de la surface topographique (relief)** d'une **région géologique héritée des processus géologiques**.
- On distingue **deux types de reliefs structuraux** correspondant en réalité aux **deux phases de la mise en place** (qui peuvent se superposer) du relief global :
 - Le **relief primitif** : relief obtenu par l'activité de **phénomènes géologiques édificateurs** (tectonique, magmatisme, remontée isostatique...).
 - Le **relief dérivé** : relief obtenu par l'action de l'érosion, y compris et notamment dans sa dimension différentielle.



Relief acinal = tabulaire

Relief monoclinal



Relief plissé conforme (= jurassien)

Relief plissé inverse (= subalpin)

▲ FIGURE 7. Quatre grands types de reliefs structuraux. D'après FOUCAULT et al. (2014).

- Les principaux reliefs structuraux (figure 7) sont :
 - Le **relief tabulaire** ou **acinal** où les couches creusées par l'érosion sont horizontales.
 - Les cours d'eau ne sont pas guidés par la pente des couches (= cours d'eau inséquents) ; ils serpentent et creusent des reliefs très découpés.
 - Sous l'effet de leur action, des plateaux aux bords découpés se dessinent ainsi que des **buttes témoins** (= butte localisée, de faible superficie, préservée de l'érosion par la résistance sommitale d'une ou plusieurs couches dures).
 - Les **reculées** sont des amphithéâtres rocheux creusés à la tête des cours d'eau.
 - Le **relief monoclinal** où les couches creusées par l'érosion sont parallèles et ont un pendage (souvent faible à modéré) constant.
 - Des **cuestas** (parfois « côtes ») se dessinent typiquement : ce sont des reliefs asymétriques comprenant une pente douce (revers) et une pente escarpée (front), cette dernière étant localisée au niveau d'une couche à l'affleurement dure, elle-même située sous et sur des couches plus tendres.
 - Les cours d'eau sont en grande partie guidés par les cuestas : les cours d'eau peuvent être inclinés dans le même sens que les couches (cours d'eau cataclinal = conséquent) ou serpenter perpendiculairement au pendage des couches, souvent dans la zone de plus faible

altitude la cuesta (cours d'eau orthoclinale = subséquent). Il arrive aussi que les cours d'eau recoupent la cuesta (cours d'eau anaclinal = obséquent).

- La cuesta délimite généralement des plateaux et l'on trouve aussi des buttes témoins localement.

- Le **relief plissé** (figures 6-7), relief édifié dans les zones de plis plutôt réguliers et aux flancs peu inclinés. On distingue :
 - Le **relief conforme** ou **relief jurassien** : relief plissé correspondant à une érosion modérée où les hauteurs correspondent à des anticlinaux et les creux à des synclinaux : il y a « conformité » entre sens de plissement et relief, ce dernier étant largement hérité du plissement.
 - Le **relief inverse** ou **relief subalpin** : relief plissé correspondant à une érosion importante où les hauteurs correspondent à des synclinaux (« synclinaux perchés ») et les creux à des anticlinaux : il y a « inversion » entre sens de plissement et relief, ce dernier étant largement hérité de l'érosion.

Les formations dans les reliefs plissés sont par exemple :

- Des **cluses** ou **clues** (fém.) : entailles creusées par un cours d'eau perpendiculairement à un pli.
- Des **monts** : reliefs hauts formés par le dos d'un anticlinal.
- Des **combes** (fém.) : dépressions creusées au cœur d'un mont [donc au sein d'un anticlinal].
- Des **monts dérivés** : monts situés dans une combe [donc au sein d'un anticlinal].
- Des **vals** ou **vau** (sing. masc. val) : dépressions au fond d'un synclinal.
- Des **crêts** (masc.) : corniche formée par le rebord d'une couche dure au sein d'un pli évidé.

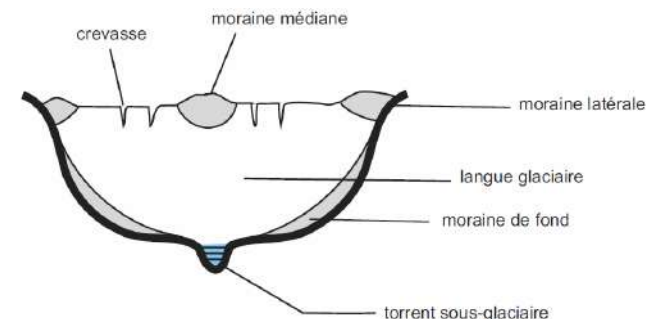
2. Un contrôle par des facteurs « extrinsèques » (= externes aux formations géologiques)

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

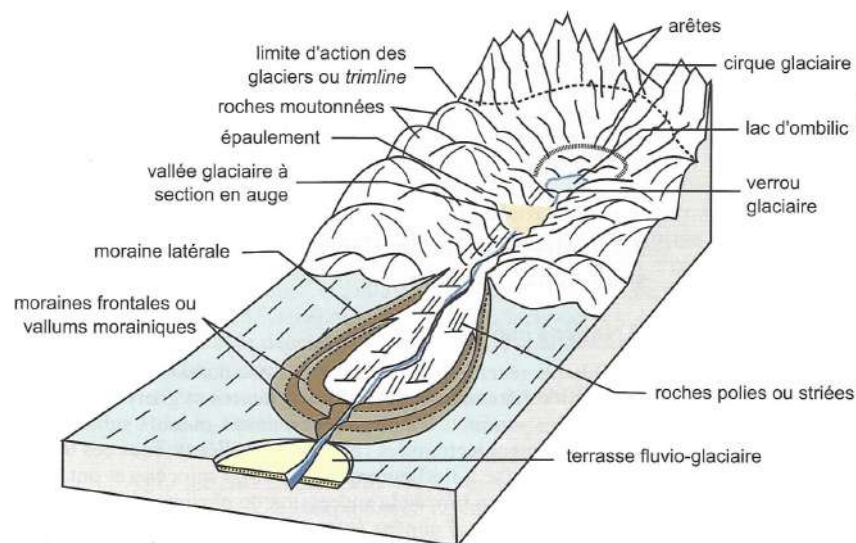
- On appelle **climat** l'ensemble des paramètres atmosphériques (notamment : température, précipitations) régnant en moyenne dans une région donnée.
- Comme nous le voyons en écologie (chapitre 17), le climat est lui-même dépendant de la position d'une région sur le globe (latitude / longitude) et de l'altitude.

Exemple de contrôle climatique dominant (altitudinal)

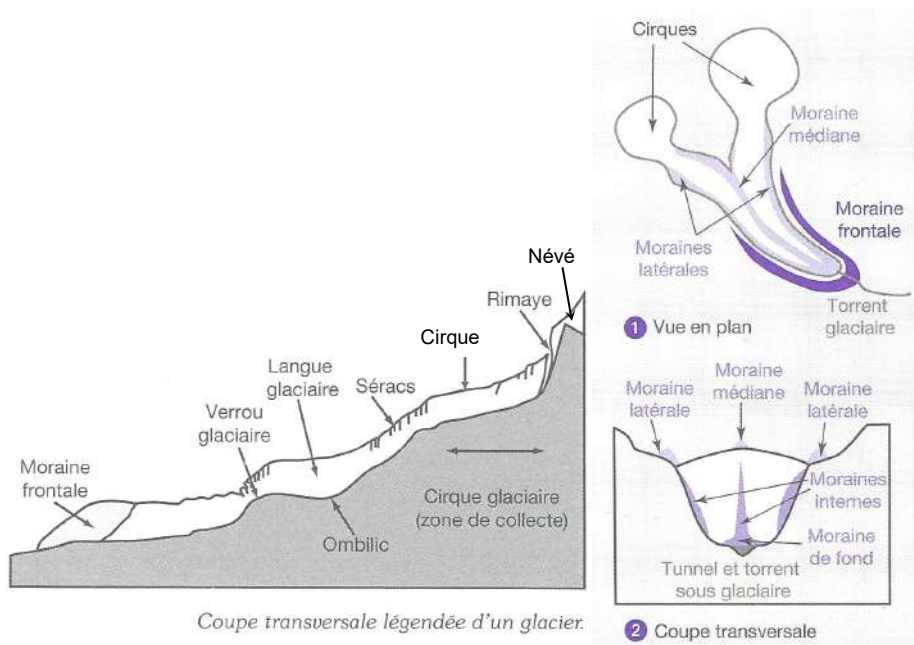
En milieu montagnard, c'est le climat (hiver rigoureux, forte insolation l'été, faible végétation) qui détermine la présence de glaciers qui découpent des paysages glaciaires (figures 8-9-10).



▲ FIGURE 8. Coupe dans un glacier montrant les types de moraines emportées (pour information ?). D'après PEYCRU et al. (2015).



▲ FIGURE 9. Le modelé glaciaire (pour information ?). D'après PEYCRU et al. (2015).



▲ FIGURE 10. Vue d'ensemble du modelé glaciaire (type alpin). D'après DENÈUD 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.

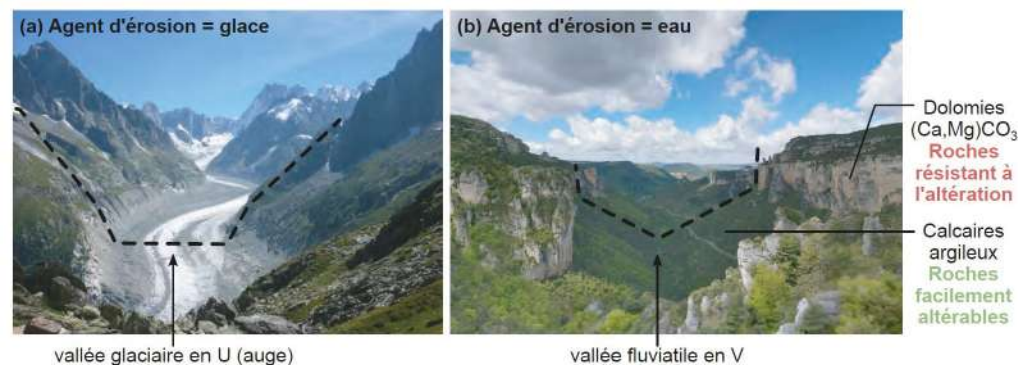
Exemple de contrôle climatique dominant (latitudinal)

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 (1968), en réalité STRAKHOV (1967) clairement **au programme** !

Exemple de contrôle climatique dominant (altitudinal) : vallée en auge vs. en V selon le climat

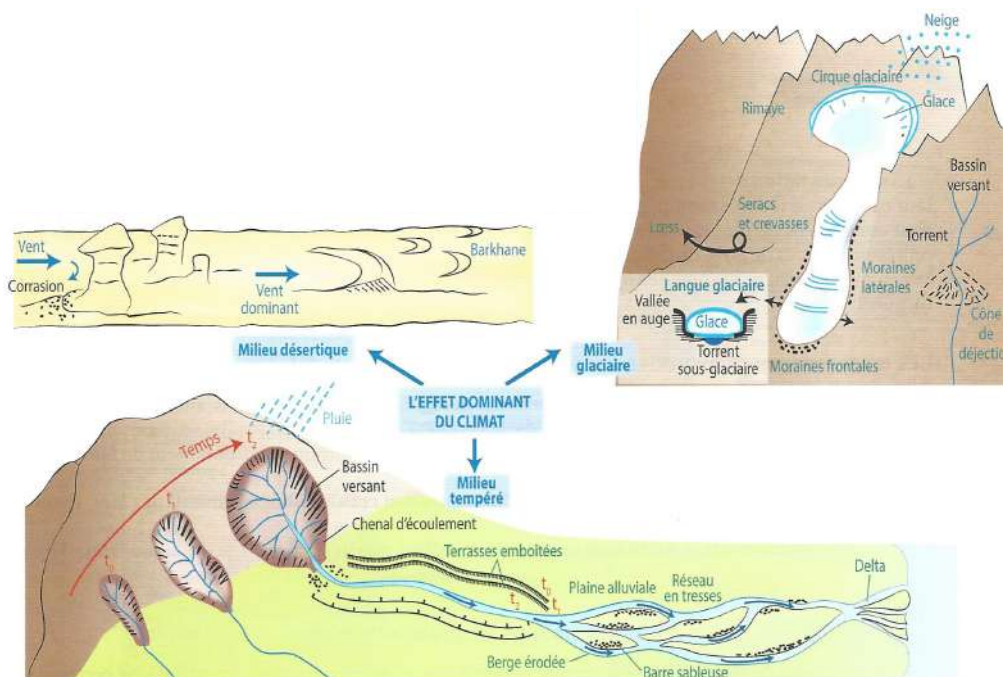
En domaine montagnard ou semi-montagnard, les **vallées glaciaires** (creusées par la **glace**) ont plutôt une **forme en U (= en auge)** alors les **vallées fluviales** (creusées par l'**eau liquide**) ont plutôt une **forme en V** (figure 11).



▲ FIGURE 11. Deux types de vallées creusées par de la glace ou de l'eau liquide.

D'après PERRIER, BEAUX et al. (2021).

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



▲ FIGURE 12. Contrôle climatique de l'altération : une illustration simple.
D'après BORDI *et al.* (2018).

b. La végétation : une dualité action altérative localisée vs. action stabilisatrice plus globale des formations en place

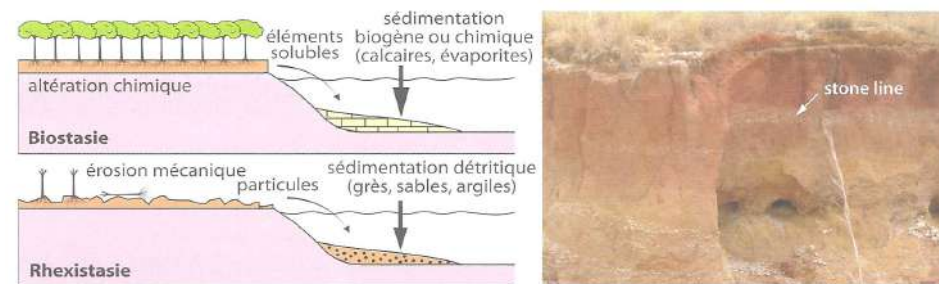
α. Une acidification sols et des roches, et une désagrégation mécanique de la roche-mère [effet localisé]

- Comme nous l'avons vu en **physiologie végétale** (chapitre 4), les **végétaux** ont tendance à **acidifier localement les sols** au niveau desquels ils sont **ancrés**, et donc par conséquent la **roche sous-jacente**, ce qui en facilite l'**altération chimique**.
- De plus, la **croissance des racines** tend à participer à la **fragmentation de la roche-mère** et donc à sa **désagrégation mécanique**.

β. Un couvert végétal qui tend à maintenir les sédiments et les sols : la bio-rhexistasie [effet global]

- 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 13).
- **Lorsque le couvert végétal est important, le sol est retenu et l'altération chimique est favorisée** : c'est la **biostasie**.
- **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. *rhéxis*, 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 13. Rôle du couvert végétal dans le maintien ou l'érosion naturels des sols : la bio-rhexistasie. D'après RENARD *et al.* (2018).

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'**entraînement de produits** par les **eaux**. La diversité des **modèles des paysages** est liée à l' de différents **facteurs** : des **facteurs intrinsèques** (lithologie, relief) et des **facteurs externes** (climat, végétation).
- ✓ Les principaux processus d'altération chimique par l'eau sont l'**hydrolyse** et la **dissolution**.

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**.
 - L'**altération des roches carbonatées** (exemple : calcaire) qui aboutit à la **mise en suspension de carbonates**.

Voir TP E2 (Roches sédimentaires)

Capacité exigible

- ✓ **Caractériser** le phénomène d'altération à partir de données de l'échelle du paysage à celle du minéral (sur l'exemple du granite).
- ✓ **Utiliser** le diagramme de Goldschmidt afin de distinguer les éléments lessivés et les produits insolubles.
- ✓ **Analyser** l'altération des roches carbonatées en s'appuyant sur l'équilibre des carbonates et ses éléments de contrôle.
- ✓ **Interpréter** la présence éventuelle d'oxydes et d'hydroxydes de fer et d'aluminium (latéritisation) dans les formations résiduelles (exemple des bauxites).

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

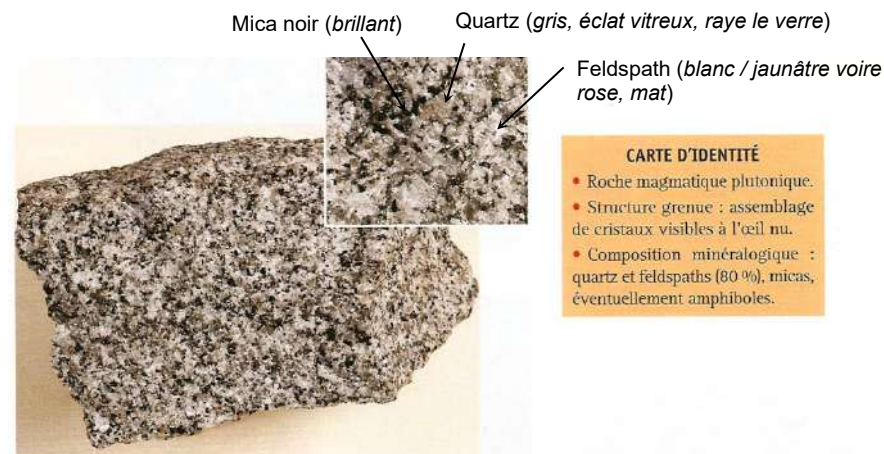
1. Cas du granite

- Le **granite** (figure 14) 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 KAlSi_3O_8 : orthose ou microcline
- Feldspath sodique $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$: albite
- Feldspath calcique $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$: anorthite
- NB On **distingue** classiquement (figure 15) :
 - 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 aluminopotassique, sans fer ni magnésium** (ou à l'état de traces) $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH},\text{F})_2$
 - les **micas noirs = biotites comprenant du fer et du magnésium** $\text{K}(\text{Mg},\text{Fe})_3(\text{OH},\text{F})_2(\text{Si}_3\text{AlO}_{10})$

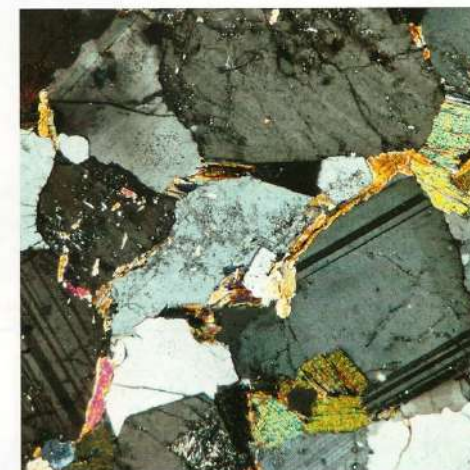
* Tous ces minéraux sont des **silicates**, c'est-à-dire des **minéraux cristallisés combinant l'ion SiO_4^{4-} à d'autres oxydes métalliques** (encadré A).



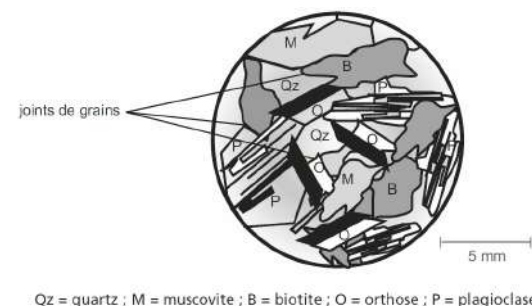
a. Échantillon de granite.



b. Lame mince de granite observée en lumière polarisée non analysée.

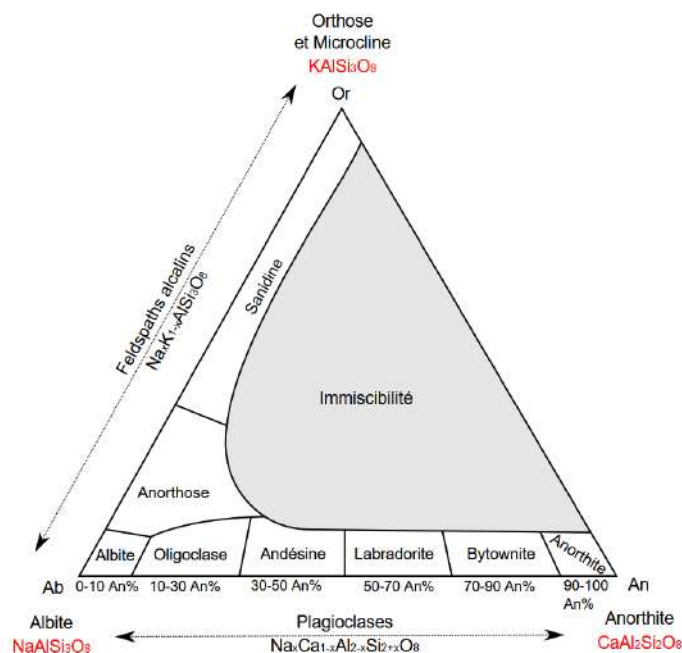


c. Lame mince de granite observée en lumière polarisée analysée.



▲ FIGURE 14. Le granite.

D'après LIZEAUX, BAUDE *et al.* (2007) et PEYCRU *et al.* (2008).



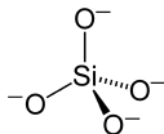
▲ FIGURE 15. Séries feldspathiques. D'après Wikipédia.

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

Type de silicates	Architecture	Familles à connaître
Nésosilicates	Tétraèdres isolés 	Olivines (solution solide entre la forstérite Mg_2SiO_4 et la fayalite Fe_2SiO_4). Grenats . <i>Silicates d'alumine</i> (Al_2OSiO_4), minéraux importants dans le métamorphisme. Zircons ($ZrSiO_4$).
Inosilicates	Tétraèdres en chaîne : chaque tétraèdre est uni à deux ou trois tétraèdres. Chaîne simple Chaîne double 	Deux cas de figure : chaîne simple : pyroxènes . - Système orthorhombique : <i>orthopyroxènes</i> (solution solide entre l' <i>enstatite</i> $Mg_2Si_2O_6$ et la <i>ferrosilite</i> $Fe_2Si_2O_6$) - Système monoclinique : <i>clinopyroxènes</i> (solution solide entre le diopside, $CaMgSi_2O_6$ et l' <i>hedenbergite</i> , $CaFeSi_2O_6$). Chaîne double : amphiboles . La <i>hornblende</i> et la <i>glaucofane</i> 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 : <i>coésite</i> , <i>cristobalite</i> ... 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' <i>albite</i> $NaAlSi_3O_8$ et l' <i>anorthite</i> $CaAl_2Si_2O_8$) ; - feldspaths potassiques (<i>orthose</i> $KAlSi_3O_8$ 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, $KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$) ; - biotite (mica noir, $K(Fe,Mg)_3AlSi_3O_{10}(OH)_2$). Argiles (<i>illite</i> , <i>smectite</i> , <i>kaolinite</i> ... cf. chap. 16). <i>Chlorites</i> et <i>serpentinites</i> , qui proviennent de l'altération de la biotite, des pyroxènes, des amphiboles et des olivines.

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**.
Dans l'immédiat (ce cours), on retiendra surtout les **tectosilicates** et les **phyllosilicates**.

2. Cas des roches carbonatées

Revoir le TP E2. 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 .

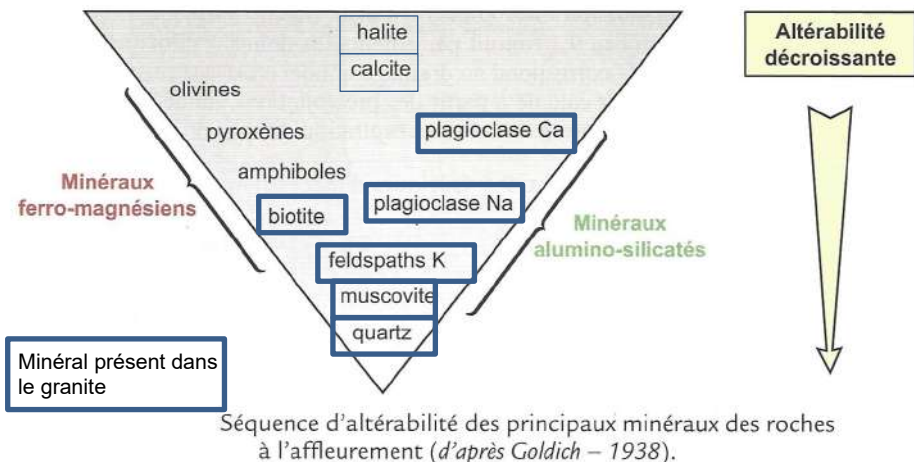
- Elles **comprennent** notamment :
 - Les **calcaires**, **roches majoritairement (à plus de 50 %) composée de carbonate de calcium CaCO_3 , le plus souvent sous la forme minérale nommée « calcite »**.
Il existe une **autre forme cristalline de CaCO_3** , plus rare, l'**aragonite**, que l'on trouve par exemple des **certaines roches métamorphiques** ou **certaines coquilles biologiques** (ex. coquille des Moules)
 - Les **dolomies**, **roches comprenant plus de 50 % de dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$** .
 - 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 16).

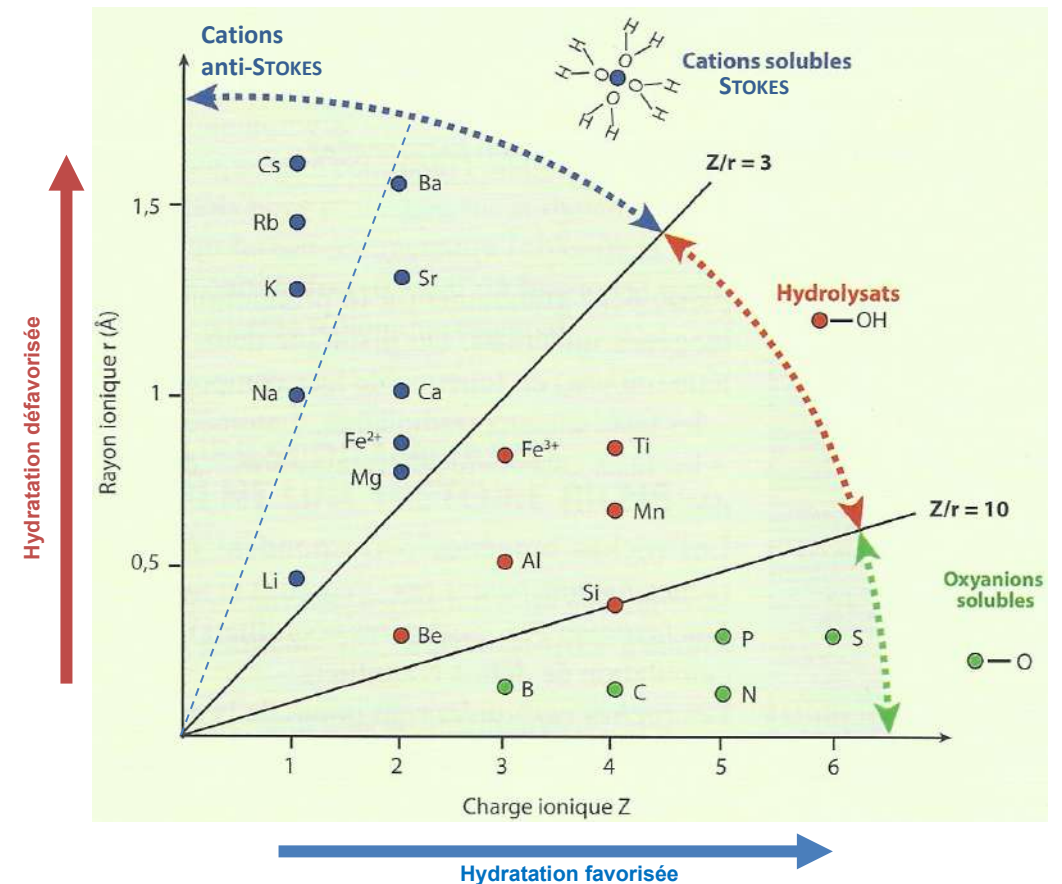


Sont également pris en compte sur cette figure les minéraux rencontrés dans les roches sédimentaires (halite des évaporites, calcite des calcaires).

▲ FIGURE 16. **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, plus ils sont **altérables**. En lien avec leur **composition minéralogique**, les **roches basiques** (= **pauvres en silice**) s'altèrent ainsi **plus facilement** sur les **roches acides** (= **riches en silice**).
- 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** et **micas blancs** (muscovite) **peu altérables** ;
 - **Micas noirs** (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 17. **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 17) 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, ne s'hydratant pas (ou peu) mais possédant 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 polyatomiques oxydés (ex. CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , 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

Dans un élan de **simplification**, voire de caricature, le **programme** stipule que, basique, « l'hydratation des ions est [favorisée par la hausse de la] charge ionique et [défavorisée par la hausse de] leur rayon atomique. »

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

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

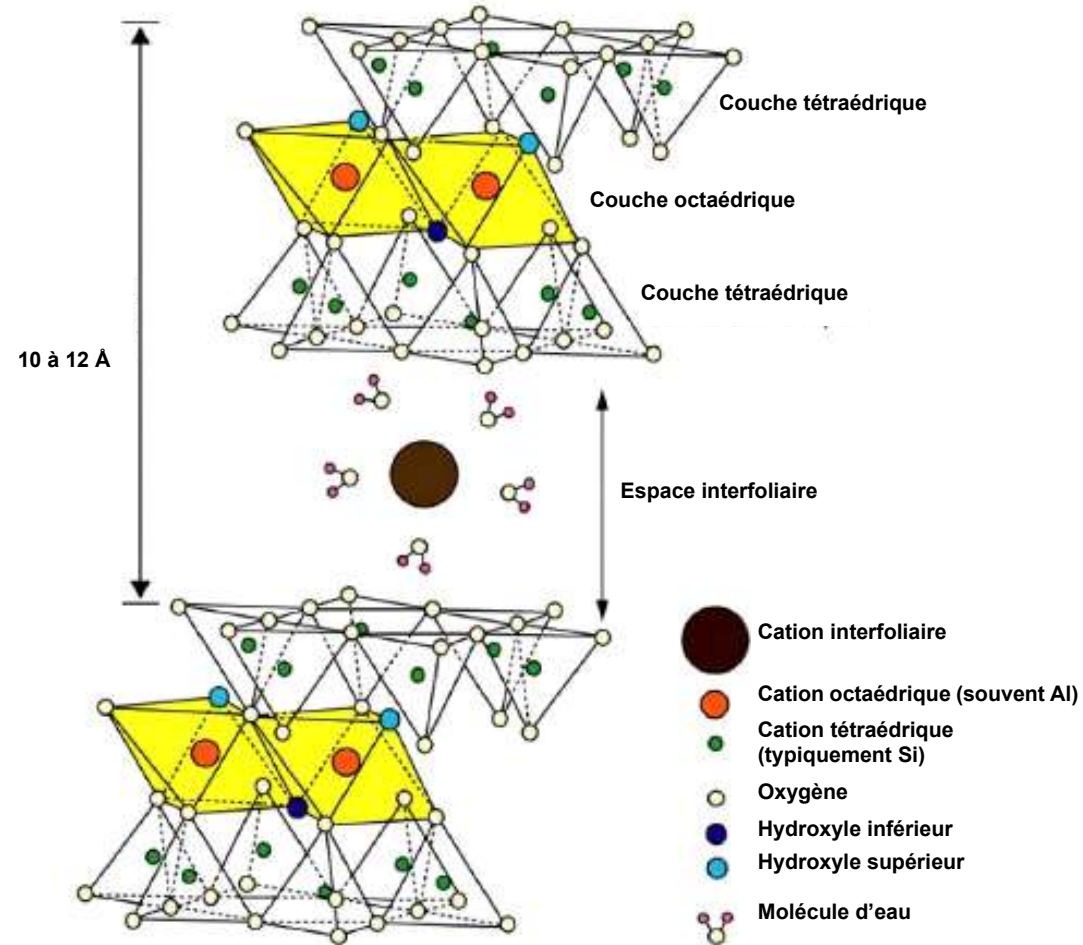
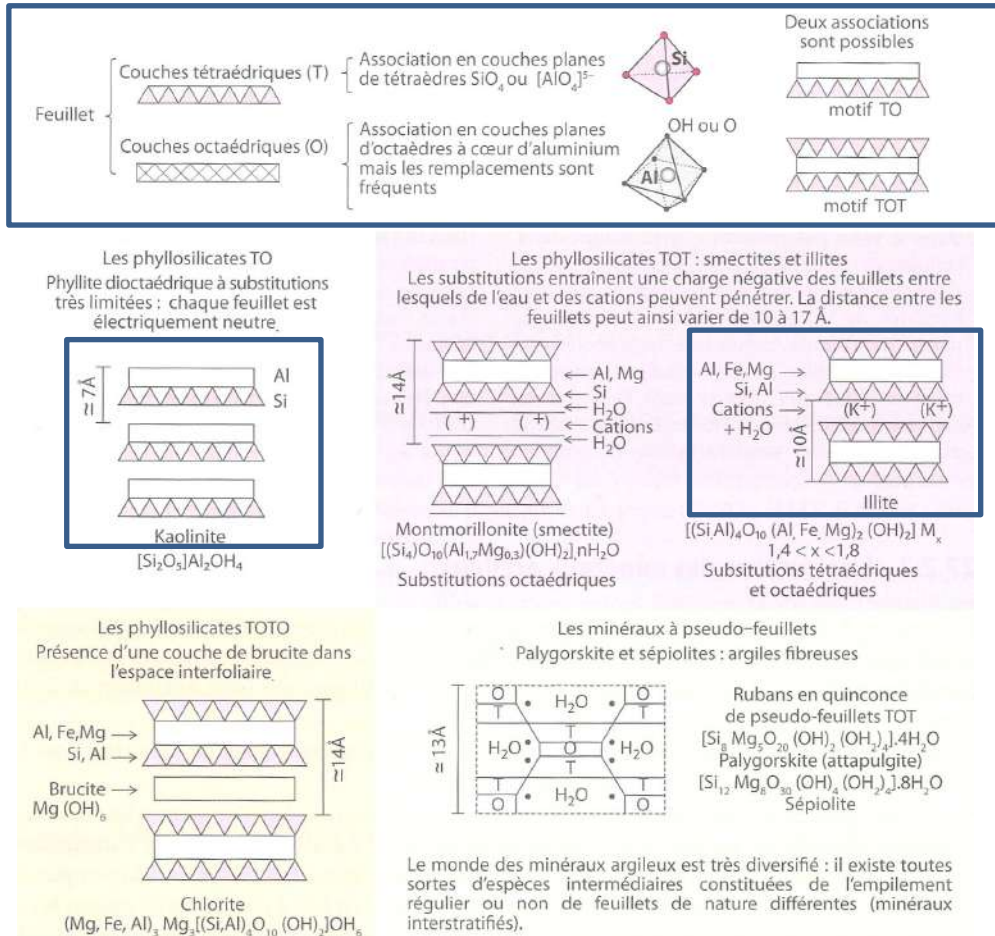


FIGURE 18. Structure d'une argile TOT. https://www.memoireonline.com/06/15/9140/m_Argile-et-mineraux-argileux-proprietes-physico-chimiques-et-proprietes-et-proprietes-collo4.html (consultation mars 2019) A. EL HACHMI (Univ. Abdelmalek Essaadi, Tanger, 2013)

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



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

▲ FIGURE 19. **Les principaux minéraux argileux.** D'après RENARD *et al.* (2018).
Les deux exemples à connaître dans le programme sont encadrés.

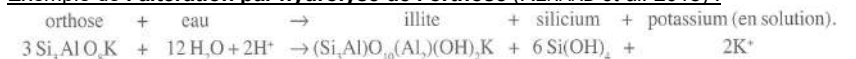
- On peut définir les **argiles** de trois façons qui, dans la réalité concrète, se superposent très largement :
 - La **définition granulométrique** stipule qu'une argile est une **particule sédimentaire détritique de taille inférieure à 2 μm**.
 - La **définition minéralogique** stipule qu'une argile est un **minéral de style phyllosilicates constitués de feuillets séparés par des espaces interfoliaires** (figure 18).
 - La **définition pétrologique** qui donne le nom d'argile (ou **roche argileuse**) à une **roche composée de minéraux argileux**.

- Les **feuillets** sont composés par l'**empilement ordonné** de deux types de couches (figures 18-19) :
 - 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 OH^- .
- En fonction de la **nature** et du **nombre de couches** composant un **feuillet**, on peut classer les **argiles** en **trois grandes catégories** (figure 19) [en fluo : exemples au programme] :
 - Les **phyllites 1/1 = TO** : un feuillet comprend une couche T une couche O.
Ex. **kaolinite** $\text{Si}_2\text{O}_5\text{Al}_2(\text{OH})_4$
 - 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) :



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 : bisiallisation, monosiallisation et allitisation (= latéritisation)

- 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) (figure 20, tableau IV).

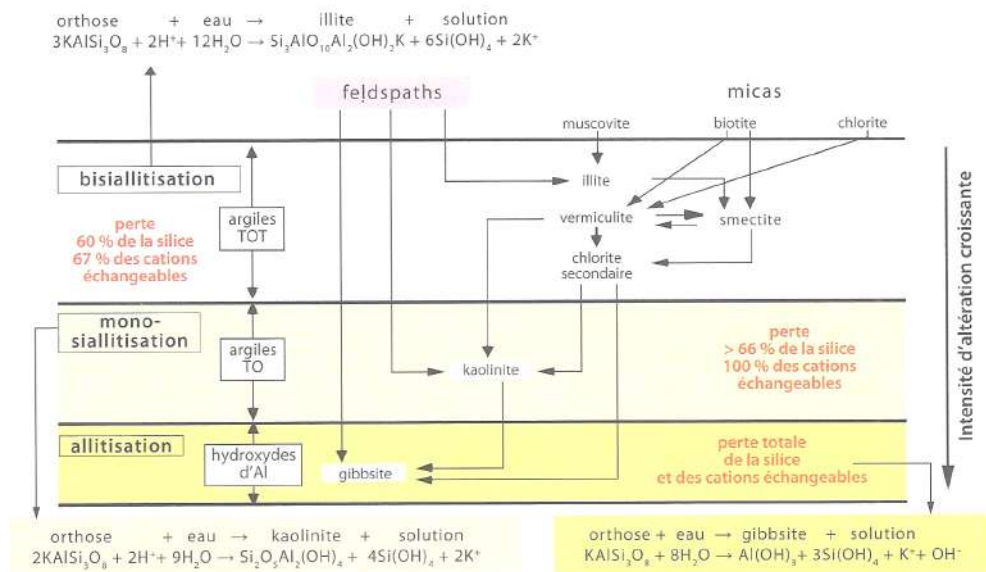


Schéma d'évolution des feldspaths, des micas et des argiles au cours des différents stades de l'hydrolyse.

▲ FIGURE 20. L'altération des matériaux granitiques : vue d'ensemble [pour information].
D'après RENARD *et al.* (2018).

i. La bisiallittisation : formation d'argiles TOT

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

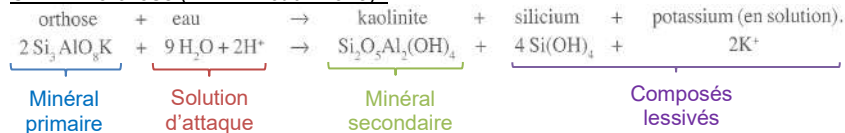
Cas de l'orthose (RENARD *et al.* 2018) :



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

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

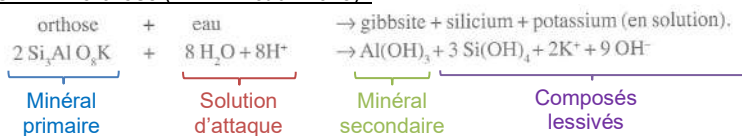
Cas de l'orthose (RENARD *et al.* 2018) :



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

- On appelle **allittisation** (= 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 $\text{Al}(\text{OH})_3$ et d'hydroxydes de fer.
- La **gibbsite** est un constituant essentiel des **bauxites**, roche résiduelle latéritique formée en zone tropicale humide qui permet notamment l'extraction d'aluminium.

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

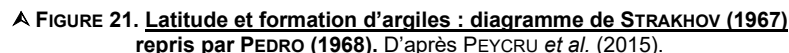


▼ TABLEAU IV. Bilan sur l'hydrolyse des silicates. D'après PERRIER, BEAUX *et al.* (2021).

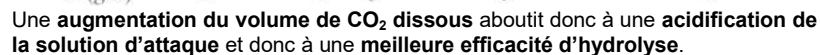
	Hydrolyse partielle		Hydrolyse totale
Bilan	Désilicification incomplète		Désilicification totale
	Désalcalinisation incomplète	Désalcalinisation totale	
Minéraux formés	Phyllosilicates 2/1 (TOT) <i>ex. illite</i>	Phyllosilicates 1/1 (TO) <i>ex. kaolinite</i>	Hydroxydes d'Al <i>ex. gibbsite</i>
Cations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

β. Des processus d'hydrolyse largement contrôlés par les conditions climatiques (notamment la température) : le diagramme de STRAKHOV (1967) / PEDRO (1968)

- La température est largement responsable de l'intensité de l'hydrolyse (figure 21) et on notera :
 - Plutôt une bisiallittisation dans les climats tempérés ;
 - Plutôt une monosiallittisation dans les climats tropicaux à saison sèche ;
 - Plutôt une allittisation 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.



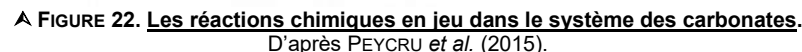
- Lors de l'**hydrolyse**, des **ions H^+** sont **consommés** et leur **disponibilité** influence donc l'**hydrolyse**.
- Le **volume de CO_2 dissous** est en **équilibre** avec les **ions H^+** selon la réaction suivante :



- $$\begin{array}{ccc} \text{orthose} & \text{solution d'attaque} & \text{illite} \\ 2,3 \text{ KAlSi}_3\text{O}_8 + 8,4 \text{ H}_2\text{O} + 2 \text{ CO}_2 \rightleftharpoons & & \text{K}_{0,3}\text{Al}_2[\text{Si}_{3,7}\text{Al}_{0,3}]_{10}(\text{OH})_2 \\ & & + 2 \text{ K}^+ + 2 \text{ HCO}_3^- + 3,2 \text{ Si}(\text{OH})_4 \\ & & \text{solution de lessivage} \end{array}$$

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

- 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 :



- 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, mais en réalité, cela **favorise aussi les micro-organismes précipitateurs de CaCO_3** donc la **bioprécipitation** qui l'emporte **souvent largement** sur la dissolution.
 - La **salinité** augmente.

- 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 CO₂** qui, dans les faits, s'équilibre avec les **processus géologiques libérateurs de CO₂** (volcanisme, précipitation de carbonates...).

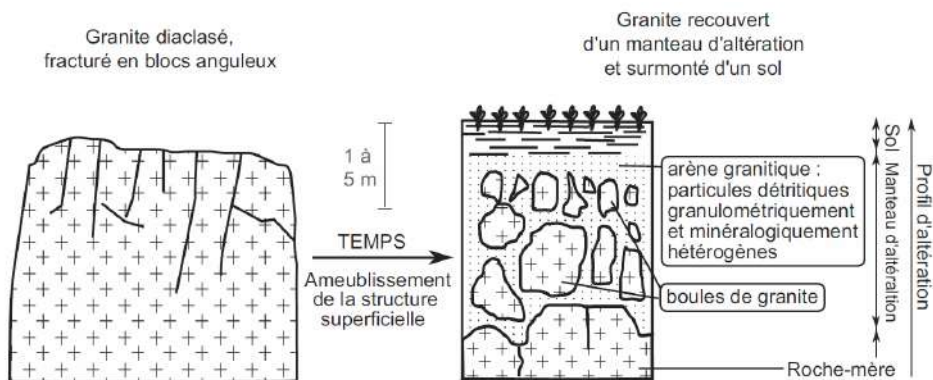
Ces aspects sont repris dans le chapitre de BCPST2 de Bioécosciences (paléoclimats, cycle du carbone).

C. Les processus mécaniques (= désagrégation mécanique)

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

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

- Les **diaclasses** 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 23**), la formation de ces diaclasses 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 23**).



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 23. 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, cryoclastie, thermoclastie) peuvent **fracturer les calcaires** et autres roches carbonatées.

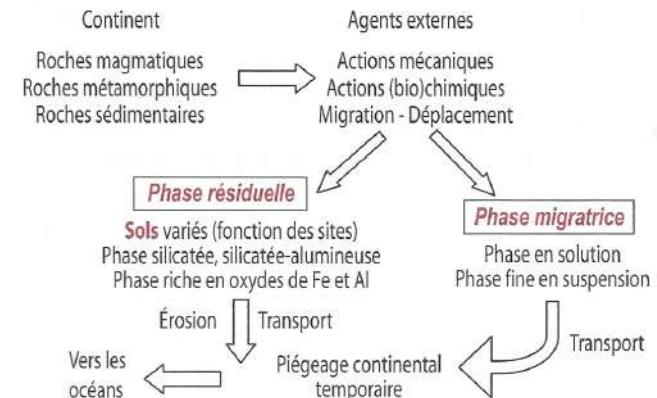
3. Une coopération des processus mécaniques et chimiques lors de l'altération

- 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 24**) :
 - 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 24. Le devenir des produits de l'altération.
D'après EMMANUEL *et al.* (2007).

2. Un enlèvement qui s'effectue essentiellement par ruissellement

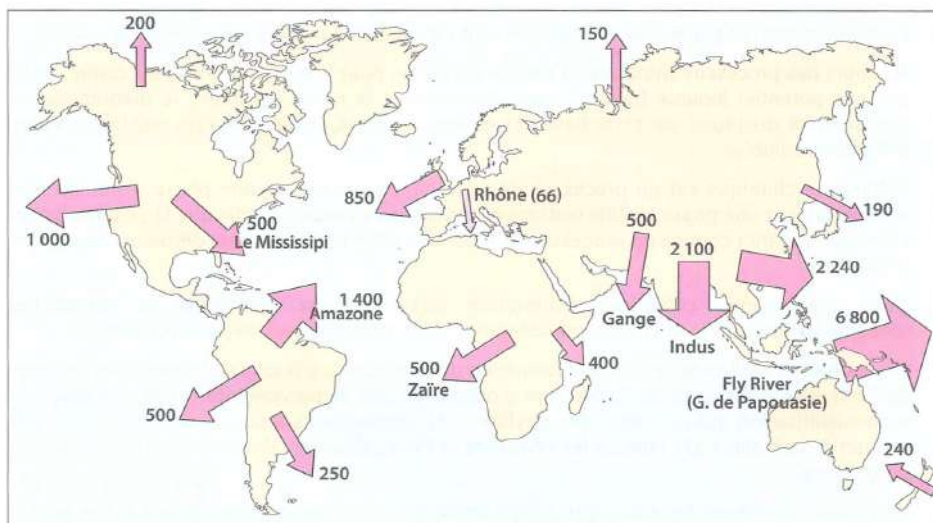
Le **transport sédimentaire** sera évoqué dans le **chapitre 25** sur la sédimentation.

- 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 25).



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).

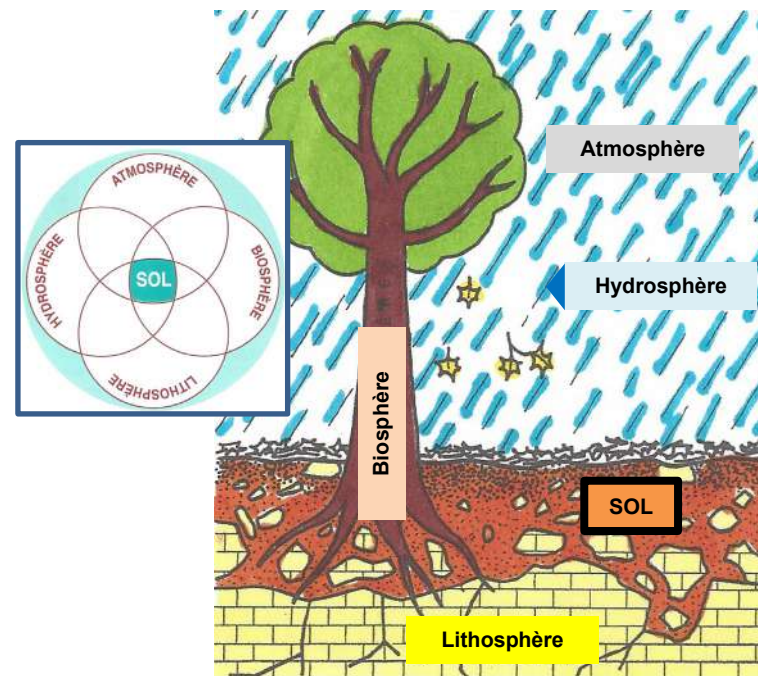
▲ FIGURE 25. **Flux détritique fluvial dans le monde.**
D'après RENARD *et al.* (2018).

- 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. Les sols, des formations continentales résiduelles qui se forment sous contrôle climatique : l'exemple de l'altération du granite

Les **sols** constituent une grosse partie du **programme de BCPST2**.

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



▲ FIGURE 26. **Le sol, interface entre vivant et non-vivant.**
D'après LIZEAUX, BAUDE *et al.* (2010) et LACOSTE & SALANON (1969), modifié.

- Le **sol** (figure 26) 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).
- Le **sol** peut être découpé en **différents niveaux superposés** qu'on appelle **horizons** : 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)**.

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

a. Une altération largement due aux agents physiques et chimiques, et aux êtres vivants

- 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 météorique** 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**.
- Les **êtres vivants** interviennent par ailleurs dans l'**altération des matériaux** et la **matière organique morte** se mélange avec la **matière minérale**.

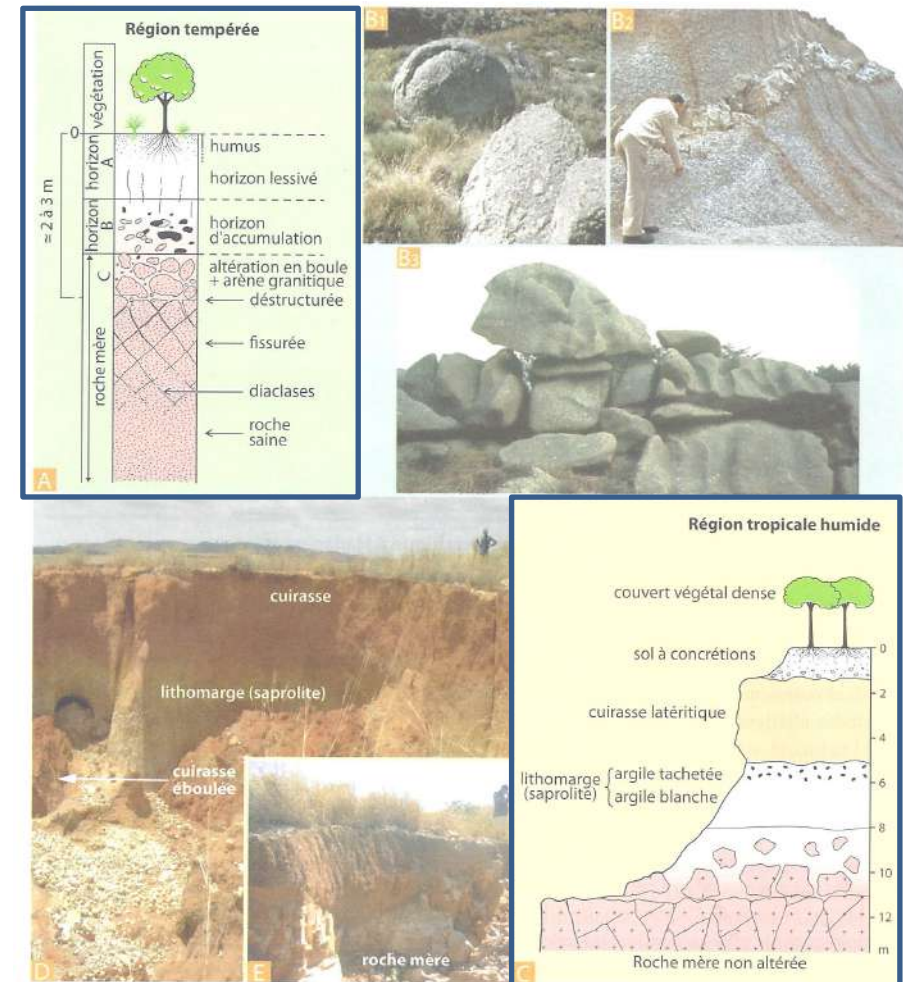
b. Une altération dépendante des conditions climatiques et de la roche-mère qui conditionnent le type de sol formé

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

- Comme nous l'avons vu avec le **diagramme de STRAKHOV / PEDRO (plus haut)**, le **type d'argile formée (bisiallisation, monosiallisation)** 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)

- La comparaison d'un **sol forestier tempéré**, de type **arénitique** (conditions de **bisiallisation**) 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 (ferrallitique 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**.



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 diaclasses. Plus intense à l'intersection des plans de diaclasses, 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.)

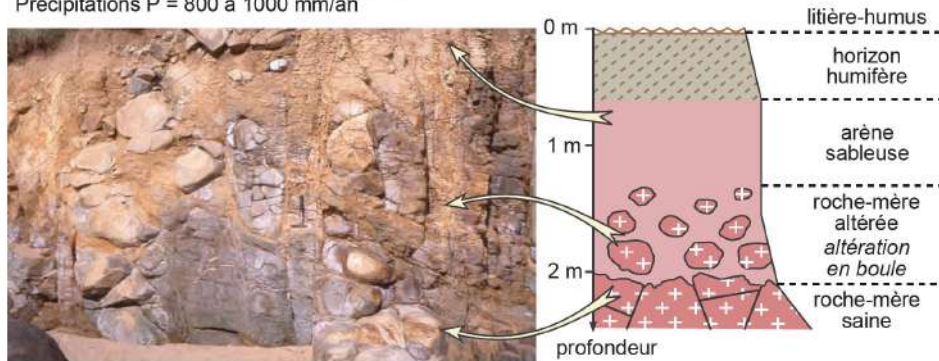
C. En climat tropical humide : la latérisation (cuirasse et saprolite) peut se développer sur des dizaines de mètres.

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

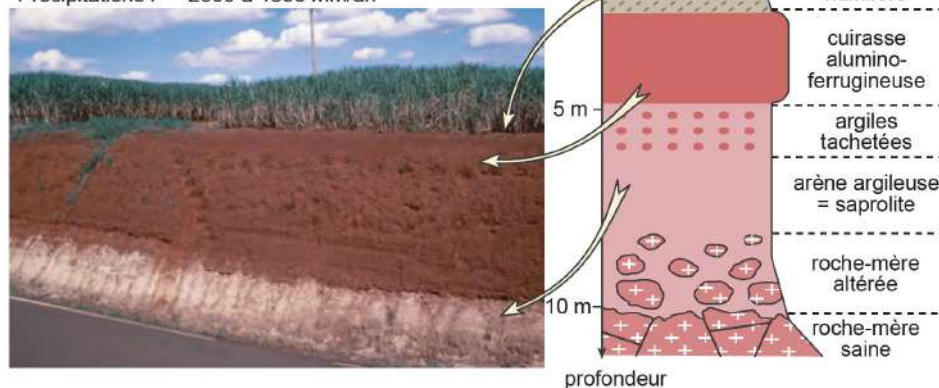
(a) Altération en milieu tempéré

Température moyenne annuelle $T = 12^{\circ}\text{C}$,
Précipitations $P = 800$ à 1000 mm/an



(b) Altération en milieu tropical humide

Température moyenne annuelle $T = 27^{\circ}\text{C}$,
Précipitations $P = 2500$ à 4500 mm/an



▲ FIGURE 28. **Arénisation vs. latérisation.** D'après PERRIER, BEAUX *et al.* (2021).

F. Des processus qui influencent le modelé des paysages

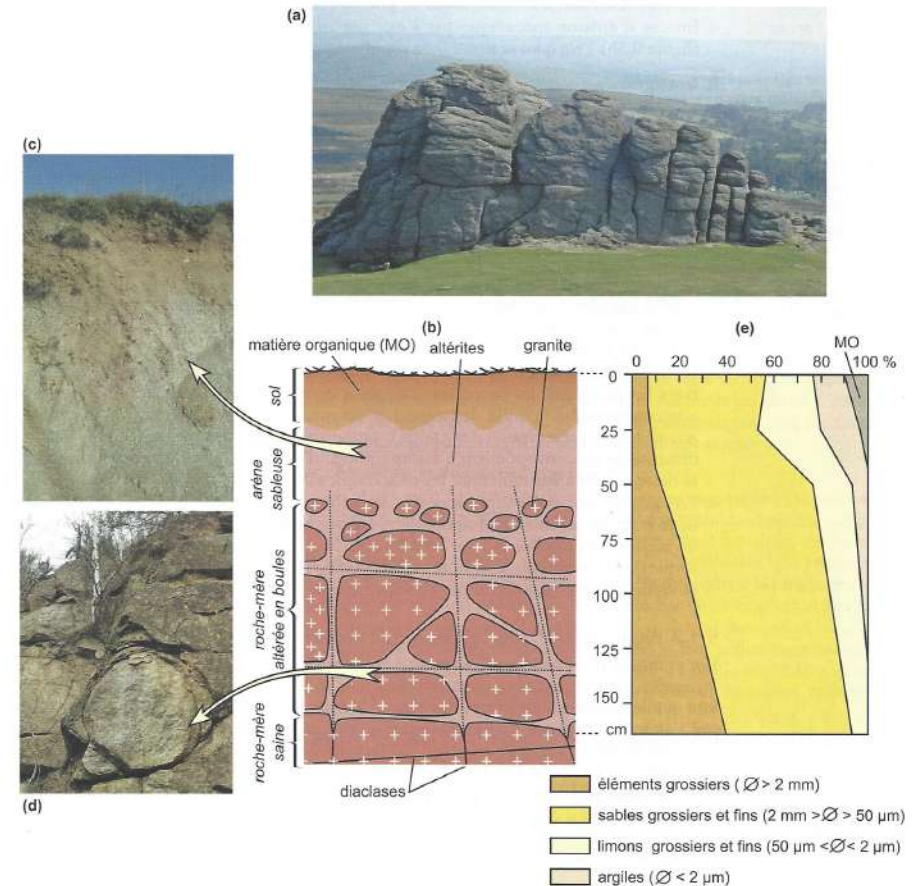
- Les **paysages** sont évidemment **impactés** par les **processus d'altération**. On se propose de **caractériser deux paysages de climat tempéré** où s'altèrent les **roches-modèles du programme**.

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

- La **figure 29** 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 **zones où le sol a été plus ou moins complètement lessivé**, laissant apparaître la **roche sous-jacente** (**figure 27**).

La **figure 29** 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 29 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 29 e**).

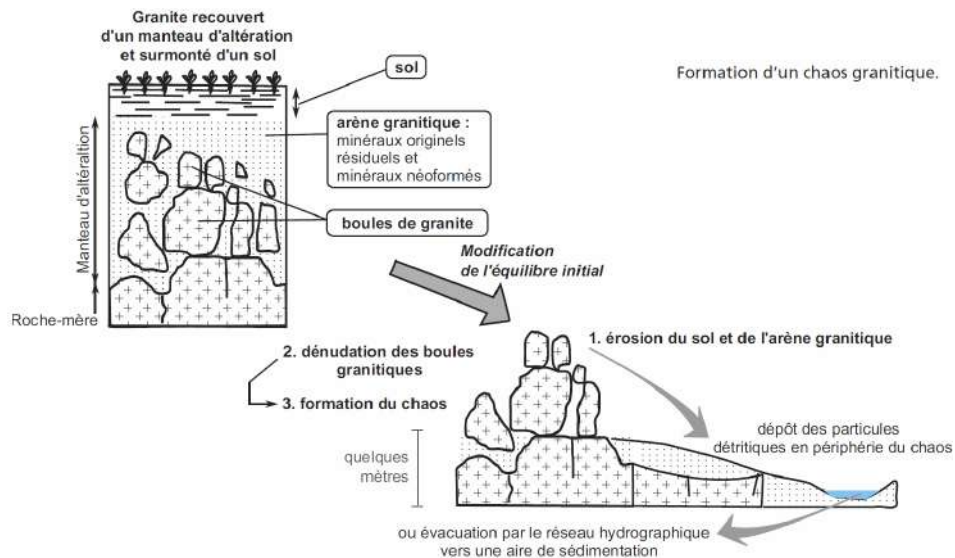


Aspect d'un paysage de massif granitique ancien en zone tempérée et détails du profil d'altération du granite.

(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 29. **Chaos granitique et arénisation.**

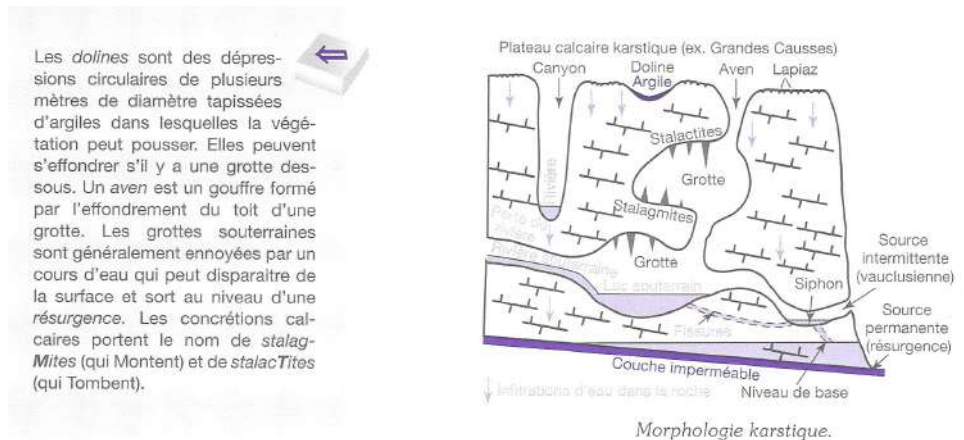
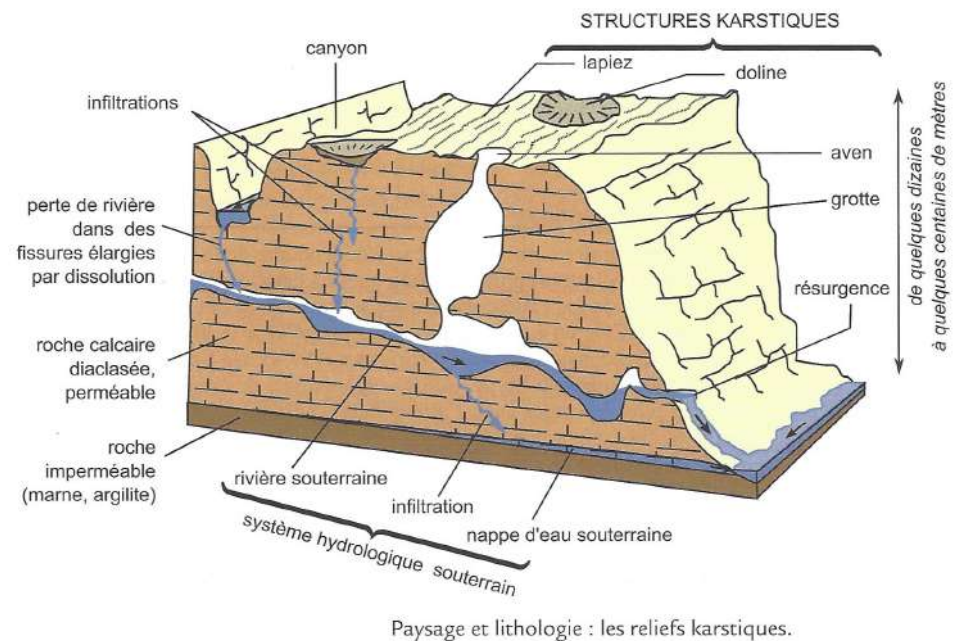
D'après PEYCRU *et al.* (2015).



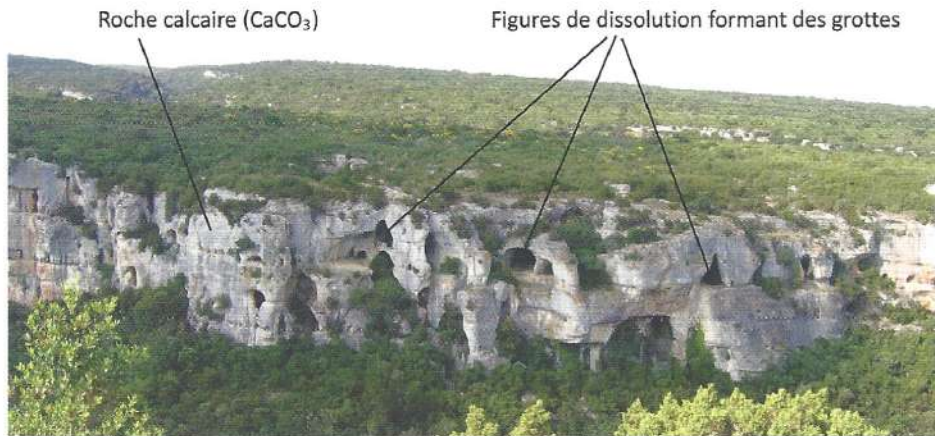
▲ FIGURE 30. La mise au jour d'un chaos granitique par lessivage des formations superficielles.
D'après PEYCRU et al. (2008).

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

- On appelle **karst** ou **paysage karstique** (figure 28) 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.



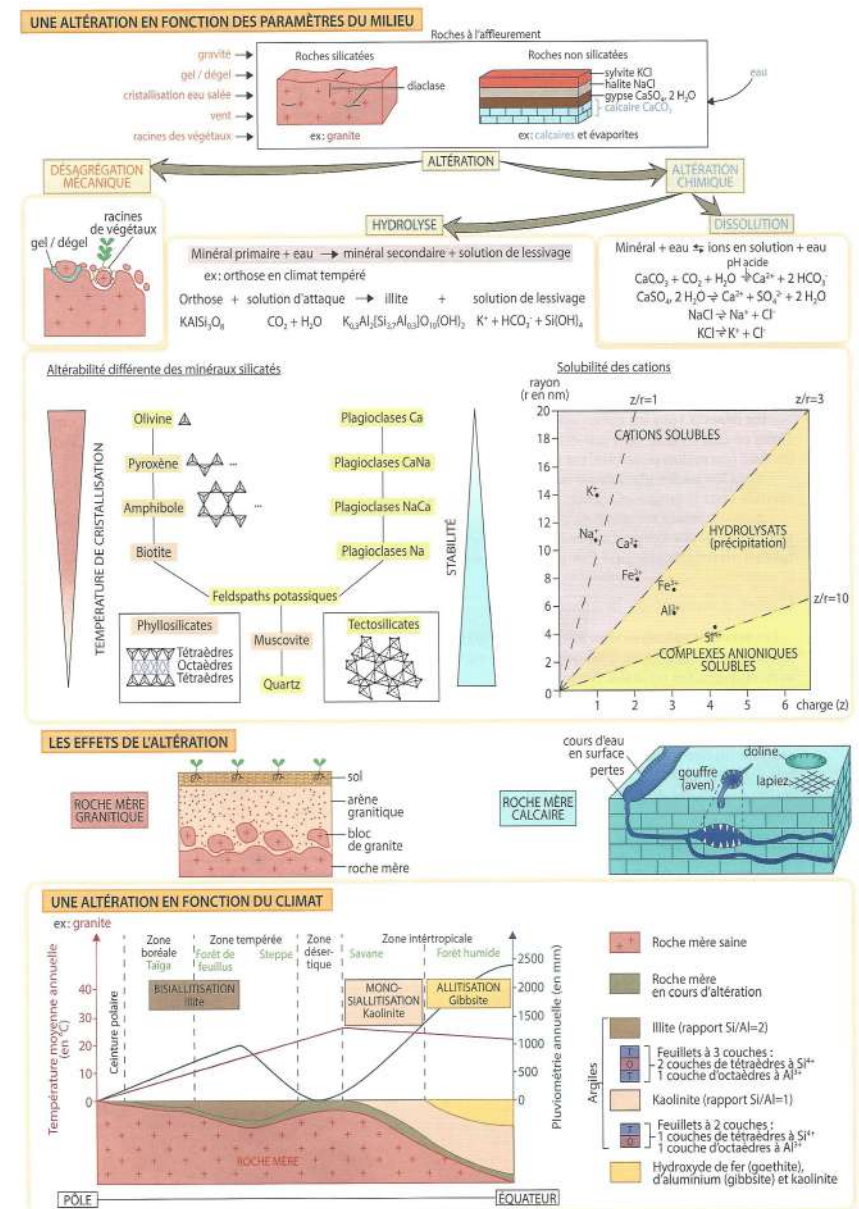
▲ FIGURE 31. Paysage karstique.
D'après PEYCRU et al. (2015) et DENÉUD et al. (2013).



Un paysage calcaire présentant de nombreuses cavités dues à la dissolution des carbonates (Minerve, Hérault).

▲ FIGURE 29. Paysage karstique.
D'après DAUTEL et al. (2021).

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



▲ FIGURE 32. L'altération : une vue d'ensemble.
D'après BORDI et al. (2018).

Bilan (adapté du programme)

- ✓ L'**altérabilité des silicates** est due à la **structure des cristaux** et à la **nature des ions présents** dans le **réseau cristallin** qui interagissent avec les **molécules d'eau**. L'**hydratation des ions** est proportionnelle [sic] à leur **charge ionique** et inversement proportionnelle [sic] à leur **rayon atomique**. Cette propriété est illustrée par le diagramme de GOLDSCHMIDT.
- ✓ L'**hydrolyse des silicates** conduit à la **formation d'argiles** dont la nature est en relation avec l'**intensité de l'altération**, qui elle-même dépend du **climat (bisiallisation, monosiallisation, allitisation)**.
- ✓ Les **produits de l'altération** sont différemment **mobilisables**, en particulier en fonction de leur **solubilité**.

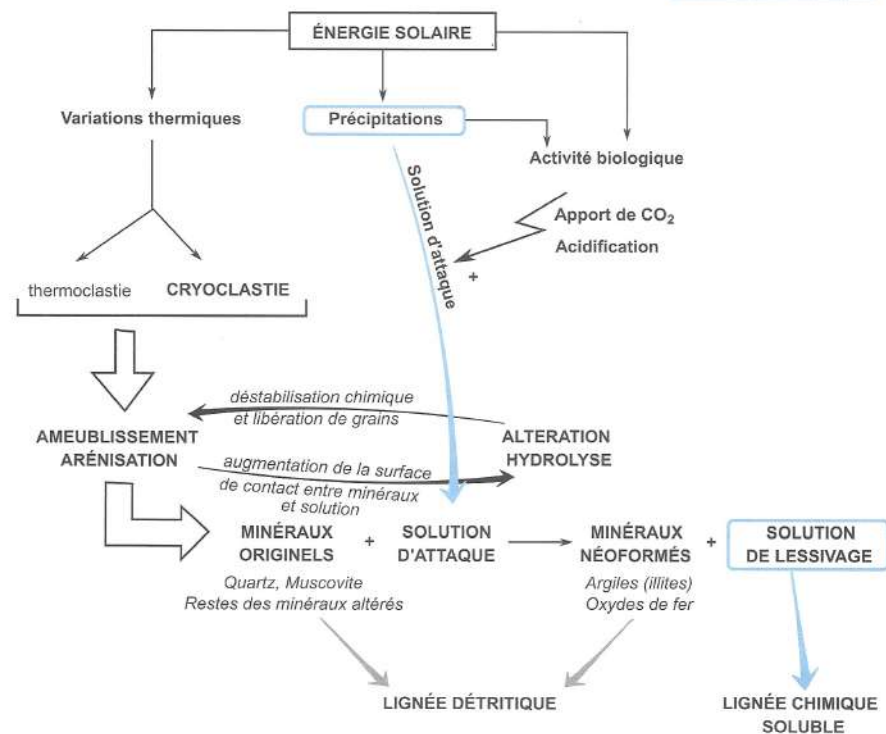
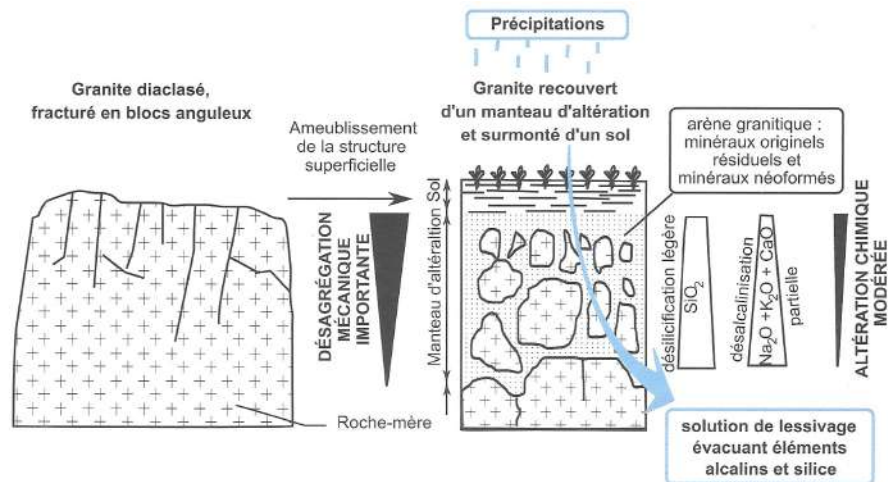
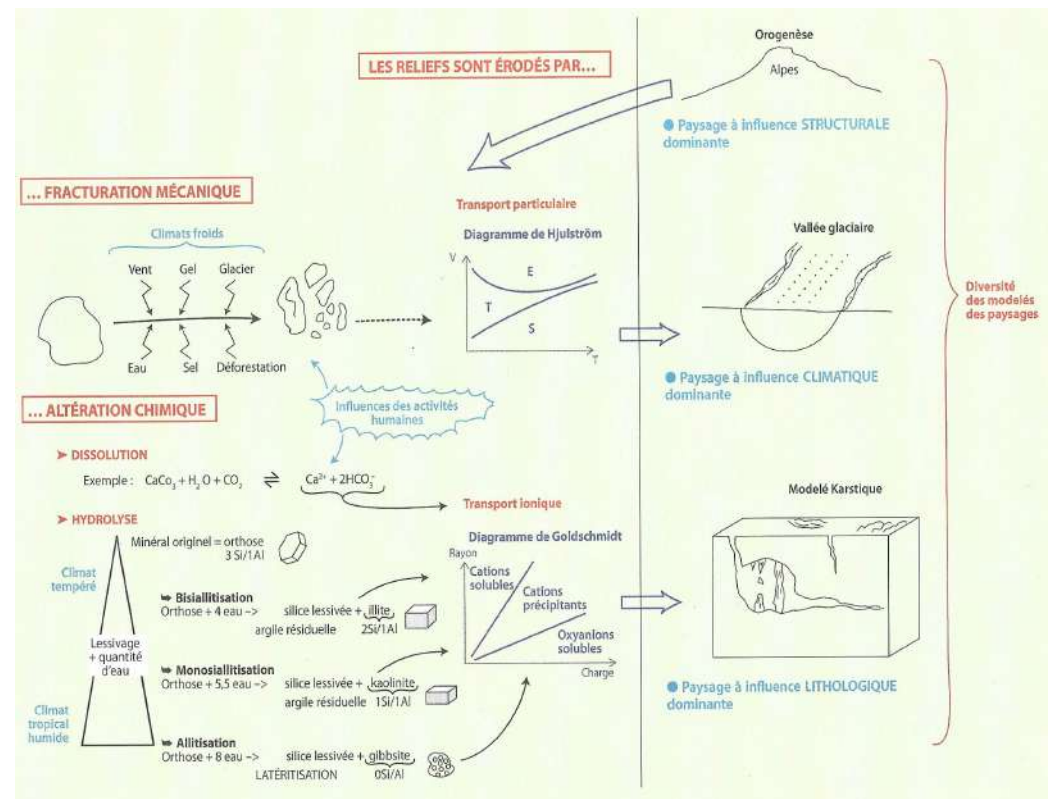


Schéma bilan de l'altération granitique en climat tempéré.

▲ FIGURE 33. L'altération du granite en climat tempéré.
D'après PEYCRU *et al.* (2008).



▲ FIGURE 34. L'altération : une vue d'ensemble.
D'après DAUTEL *et al.* (2017).

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** : 2 exemples au programme... avec des **figurés simples** (pouvoir expliquer)
- ° Diagramme de **STRAKHOV/PEDRO** : important !
- ° **Arénisation** du granite / paysage de **chaos**
- ° **Équations du système carbonates**
- ° **Paysage karstique**
- ° **Sol forestier** tempéré
- ° **Sol latéritique**

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

Vous devez en outre **savoir / pouvoir** (voir **TP**) :

- ° **Identifier**, de manière diagnostiquée, un **granite** et ses **produits d'altération**
- ° **Identifier** les principaux types de **sédiments** et **roches sédimentaires**
- ° **Reconnaître** les **horizons** d'un **sol**

Références

- AUBOIN, J., J. DERCOURT & B. LABESSE (1970). *Manuel de travaux pratiques de cartographie. 1^{er} cycle et maîtrise*. Dunod, Paris.
- BARD, J.-P. (1990). *Microtextures des roches magmatiques et métamorphiques*. Masson, Paris, 2^e édition (1^{re} édition 1980).
- BARDINTZEFF, J.-M. (2006). *Volcanologie*. Dunod, Paris, 3^e édition (1^{re} 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, 2^e édition (1^{re} édition 2010).
- BEAUX, J.-F., J.-F. FOGELGESANG, P. AGARD & V. BOUTIN (2011). *Atlas de Géologie Pétrologie. BCPST 1^{re} et 2^e 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. BOUDJEMAI, H. CLAUCE, O. GUIPPONI & Y. KRAUSS (2018). *Mémento Géologie BCPST 1^{re} et 2^e années*. Vuibert, Paris.
- BORDI, C., F. SAINTPIERRE (dir.), M. ALGRAIN-PITAVY, R. BOUDJEMAI, H. CLAUCE, O. GUIPPONI & Y. KRAUSS (2021). *Mémento Géologie BCPST 1^{re} et 2^e 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, 2^e édition (1^{re} édition 1989).
- CARON, J.-M., A. GAUTHIER, J.-M. LARDEAUX, A. SCHAAF, J. ULYSSE & J. WOZNIK (2003) (2^e édition, 1989). *Comprendre et enseigner la planète Terre*. Ophrys, Gap – Paris, 303 pages.
- CHAMLEY, H. (2000). *Bases de sédimentologie*. Dunod, Paris, 2^e édition (1^{re} 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, 6^e édition.
- COJAN, I. & M. RENARD (2006). *Sédimentologie*. Dunod, Paris, 2^e édition (1^{re} 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, 2^e édition (1^{re} édition 1999).
- DAUTEL, O. (dir.), A. PROUST, M. ALGRAIN, C. BORDI, A. HELME-GUIZON, F. SAINTPIERRE, M. VABRE & C. BOGGIO (2017). *Biologie Géologie BCPST 1^{re} année*. Vuibert, Paris.
- DAUTEL, O. (dir.), M. ALGRAIN-PITAVY, C. BORDI, A. HELME-GUIZON, B. MOLLIER, A. PROUST, M. QUERTINIEZ, F. SAINTPIERRE & M. VABRE (2021). *Prépas scientifiques BCPST 1^{re} année. Biologie Géologie. Tout-en-un*. Vuibert, Paris.
- DENÈUD, J., T. FERROIR, O. GUIPPONI, H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON, M.-L. PONS & F. TEJEDOR (2011). *Biologie-Géologie BCPST-véto 2^e année*. Tec & Doc, Lavoisier, Paris.
- DENÈUD, J., C. GODINOT, O. GUIPPONI, H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON & F. TEJEDOR (2013). *Biologie-Géologie BCPST-véto 1^{re} année*. Tec & Doc, Lavoisier, Paris.
- DENÈUD, J., C. GODINOT, O. GUIPPONI, H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON, M.-L. PONS & F. TEJEDOR (2014). *Biologie-Géologie BCPST-véto 2^e année*. Tec & Doc, Lavoisier, Paris.
- DERCOURT, J. (2002). *Géologie et géodynamique de la France. Outre-mer et européenne*. « Sciences Sup », Dunod, Paris, 3^e édition (1^{re} édition 1997), 330 pages.
- DERCOURT, J., J. PAQUET, P. THOMAS & C. LANGLOIS (2006). *Géologie. Objets, méthodes et modèles*. Dunod, Paris, 12^e édition (1^{re} 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. MSHID, J.-M. PICOCHÉ, 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, 6^e édition (1^{re} édition 1980).
- FOUCAULT, A., J.-F. RAOULT, F. CECCA & B. PLATEVOET (2014). *Dictionnaire de Géologie*. Dunod, Paris, 8^e édition (1^{re} édition 1980).
- GODINOT, C., H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON & F. TEJEDOR (2010). *Biologie-Géologie 1^{re} 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. JUSSELAND, 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. JUSSELAND, 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, 3^e édition (1^{re} édition 1992), 192 pages.
- MARSHAK, S. (2010). *Terre, portrait d'une planète*. Traduction O. ÉVRAD. De Boeck, Bruxelles (3^e 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.
- PERRIER, C. & J.-F. BEAUX (dir.), A. BOUFFIER, L. BOUGEIS, P. CARRÈRE, T. DARRIBÈRE, J. DÉMARET-NICOLAS, A. EMOND, S. MAURY, O. MONNIER, T. SOUBAYA, A. VERGNAUD & A. WOEHRLÉ (2021). *Biologie-Géologie BCPST 1. Tout-en-un*. Dunod, Malakoff (F).
- 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 1^{re} et 2^e 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 1^{re} et 2^e années*. Dunod, Paris.
- POMEROL, C., Y. LAGABRIELLE & M. RENARD (2003) (12^e 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, 14^e édition (1^{re} 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. 16^e édition du « Pomerol »*. 1^{re} édition 1965 (Armand Colin). Dunod, Paris.
- VIDAL, P. (1994). *Géochimie*. Dunod, Paris.

Plan du chapitre

Objectifs : extraits du programme	1
Introduction	1
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	2
A. L'inclusion de l'altération dans le phénomène sédimentaire	2
B. Les acteurs de l'altération	3
1. Les objets de l'altération : les roches	3
2. Les agents de l'altération	3
a. Les agents mécaniques	3
α. Des agents à la fois de désagrégation mécanique et d'érosion : les vents et surtout les courants d'eaux (+ la glace)	3
β. Des agents de désagrégation mécanique sans action érosive : variations de température, eau interstitielle, sels...	3
γ. Et la tectonique !	3
b. Les agents chimiques et leur action	3
α. L'eau et les solutés (formant la « solution d'attaque »)	3
i. Notion de solution d'attaque	3
ii. Deux actions principales possibles d'altération chimique des roches	3
➢ La modification chimique par la solution d'attaque des minéraux en présence avec production de minéraux résiduels : l'hydrolyse [+ acidolyse, salinolyse, alcalinolyse]	3
➢ La décomposition complète par la solution d'attaque d'une roche en ses ions constitutifs : la dissolution	4
β. L'air	4
i. Un mélange gazeux	4
ii. Une action oxydante du dioxygène	4
c. Les agents biologiques : les êtres vivants (... y compris l'Homme)	4
C. Les produits de l'altération	4
1. Les produits résiduels : des minéraux peu ou pas (parfois pas encore...) altérés	4
2. Les produits de transformation : des minéraux secondaires formés par modification chimique des minéraux primaires	4
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	5
1. Un contrôle par des facteurs « intrinsèques » (= propres aux formations géologiques)	5
a. La nature des roches (lithologie) et des minéraux en présence	5
b. Le facteur structural (lié à l'activité tectonique) ; notion de relief structural	5
2. Un contrôle par des facteurs « extrinsèques » (= externes aux formations géologiques)	6
a. Le climat (température et précipitations), lui-même largement dépendant de la latitude/longitude et de l'altitude	6
b. La végétation : une dualité action altérative localisée vs. action stabilisatrice plus globale des formations en place	8
α. Une acidification sols et des roches, et une désagrégation mécanique de la roche-mère [effet localisé]	8
β. Un couvert végétal qui tend à maintenir les sédiments et les sols : la bio-rhexistase [effet global]	8

II. L'altération (au sens large) des roches : mécanismes et conséquences de l'altération chimique et de la désagrégation physique	9
A. Préalable : rappels des caractéristiques des deux roches-mères étudiées comme exemples	9
1. Cas du granite	9
2. Cas des roches carbonatées	11
B. Les processus chimiques (= altération chimique)	11
1. Cas du granite : une altération chimique surtout par hydrolyse	11
a. Une altérabilité chimique variable (altérabilité différentielle) des minéraux silicatés, en lien avec leur température de cristallisation : le diagramme de GOLDISH (1938)	11
b. Une altérabilité des minéraux due à la nature des ions piégés dans le réseau cristallin : le diagramme de GOLDSCHMIDT (1934)	11
c. Une hydrolyse des minéraux silicatés du granite (sauf le quartz) qui aboutit notamment à la formation de minéraux argileux	12
α. Les argiles, composés géologiques ayant une définition granulométrique, une définition minéralogique et une définition pétrologique	12
β. Les argiles, des minéraux en feuillets présentant une certaine diversité	13
γ. Les argiles, minéraux secondaires formés lors de l'altération du granite	13
d. Une hydrolyse dont l'efficacité et la nature des produits formés dépend des conditions climatiques (notamment la température)	13
α. Une formation d'argiles variées voire d'oxydes complets en fonction de l'efficacité croissance de l'hydrolyse : bisiallisation, monosiallisation et allitisation (= latérisation)	13
i. La bisiallisation : formation d'argiles TOT	14
ii. La monosiallisation (kaolinisation) : formation d'argiles TO	14
iii. L'allitisation (latérisation) : formation d'oxydes d'aluminium et de fer	14
β. Des processus d'hydrolyse largement contrôlés par les conditions climatiques (notamment la température) : le diagramme de STRAKHOV (1967) / PEDRO (1968)	14
e. Une hydrolyse à laquelle participe le CO ₂ dissous dans la solution d'attaque (par son rôle acidifiant)	15
2. Cas des roches carbonatées : une altération chimique par dissolution (où intervient encore le CO ₂ atmosphérique)	15
a. L'équation de dissolution des carbonates	15
b. Quelques facteurs influençant la dissolution des carbonates : teneur en CO ₂ atmosphérique, température, pH, salinité	15
3. Remarque sur le rôle du CO ₂ dans l'altération chimique : l'altération, un puits de consommation du CO ₂ atmosphérique	15
C. Les processus mécaniques (= désagrégation mécanique)	16
1. Une désagrégation du granite qui forme des diaclases et aboutit à former un chaos en boules et de l'arène granitique	16
2. Une désagrégation mécanique possible des carbonates	16
3. Une coopération des processus mécaniques et chimiques lors de l'altération	16
D. L'enlèvement des produits d'altération qui aboutit à l'érosion des continents	16
1. Des produits d'altération qui peuvent rester sur place (formation résiduelle) ou se déplacer (sédiments)	16
2. Un enlèvement qui s'effectue essentiellement par ruissellement	16
3. Un flux sédimentaire qui termine dans la mer ou l'océan (s'il n'a pas sédimenté localement sur le continent)	17
E. Les sols, des formations continentales résiduelles qui se forment sous contrôle climatique : l'exemple de l'altération du granite	17
1. Le sol, interface entre géosphère, biosphère et hydrosphère provenant de l'altération physique, chimique et biologique d'une roche	17
2. Une formation qui suppose l'altération d'une roche-mère	18
a. Une altération largement due aux agents physiques et chimiques, et aux êtres vivants	18

b. Une altération dépendante des conditions climatiques et de la roche-mère qui conditionnent le type de sol formé	18
α. L'altération et notamment le type d'argile formé dépend des conditions climatiques	18
β. Comparaison de deux sols issus de l'altération granitique : un sol tempéré (arénitique) et un sol équatorial (latéritique)	18
F. Des processus qui influencent le modelé des paysages	19
1. Le chaos granitique, paysage typique d'altération des terrains granitiques	19
2. Le karst, paysage typique d'altération des terrains carbonatés	20
G. Bilan : vue d'ensemble des processus d'altération	21

Pour faire une fiche de révision : quelques pistes	23
Références	23
Plan du chapitre	24
Plan simplifié du chapitre	26
Plan très simplifié du chapitre	26

Plan simplifié du chapitre

Objectifs : extraits du programme	1
Introduction	1
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	2
A. L'inclusion de l'altération dans le phénomène sédimentaire	2
B. Les acteurs de l'altération	3
1. Les objets de l'altération : les roches	3
2. Les agents de l'altération	3
C. Les produits de l'altération	4
1. Les produits résiduels : des minéraux peu ou pas (parfois pas encore...) altérés	4
2. Les produits de transformation : des minéraux secondaires formés par modification chimique des minéraux primaires	4
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	5
1. Un contrôle par des facteurs « intrinsèques » (= propres aux formations géologiques)	5
2. Un contrôle par des facteurs « extrinsèques » (= externes aux formations géologiques)	6
II. L'altération (au sens large) des roches : mécanismes et conséquences de l'altération chimique et de la désagrégation physique	9
A. Préalable : rappels des caractéristiques des deux roches-mères étudiées comme exemples	9
1. Cas du granite	9
2. Cas des roches carbonatées	11
B. Les processus chimiques (= altération chimique)	11
1. Cas du granite : une altération chimique surtout par hydrolyse	11
2. Cas des roches carbonatées : une altération chimique par dissolution (où intervient encore le CO ₂ atmosphérique)	15
3. Remarque sur le rôle du CO ₂ dans l'altération chimique : l'altération, un puits de consommation du CO ₂ atmosphérique	15
C. Les processus mécaniques (= désagrégation mécanique)	16
1. Une désagrégation du granite qui forme des diaclases et aboutit à former un chaos en boules et de l'arène granitique	16
2. Une désagrégation mécanique possible des carbonates	16
3. Une coopération des processus mécaniques et chimiques lors de l'altération	16
D. L'enlèvement des produits d'altération qui aboutit à l'érosion des continents	16
1. Des produits d'altération qui peuvent rester sur place (formation résiduelle) ou se déplacer (sédiments)	16
2. Un enlèvement qui s'effectue essentiellement par ruissellement	16
3. Un flux sédimentaire qui termine dans la mer ou l'océan (s'il n'a pas sédimenté localement sur le continent)	17
E. Les sols, des formations continentales résiduelles qui se forment sous contrôle climatique : l'exemple de l'altération du granite	17
1. Le sol, interface entre géosphère, biosphère, atmosphère et hydrosphère provenant de l'altération physique, chimique et biologique d'une roche	17
2. Une formation qui suppose l'altération d'une roche-mère	18
F. Des processus qui influencent le modelé des paysages	19
1. Le chaos granitique, paysage typique d'altération des terrains granitiques	19
2. Le karst, paysage typique d'altération des terrains carbonatés	20
G. Bilan : vue d'ensemble des processus d'altération	21

Pour faire une fiche de révision : quelques pistes	23
Références	23
Plan du chapitre	24
Plan simplifié du chapitre	26
Plan très simplifié du chapitre	26

Plan très simplifié du chapitre

Objectifs : extraits du programme	1
Introduction	1
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	2
A. L'inclusion de l'altération dans le phénomène sédimentaire	2
B. Les acteurs de l'altération	3
C. Les produits de l'altération	4
D. Les facteurs de contrôle de l'altération	5
II. L'altération (au sens large) des roches : mécanismes et conséquences de l'altération chimique et de la désagrégation physique	9
A. Préalable : rappels des caractéristiques des deux roches-mères étudiées comme exemples	9
B. Les processus chimiques (= altération chimique)	11
C. Les processus mécaniques (= désagrégation mécanique)	16
D. L'enlèvement des produits d'altération qui aboutit à l'érosion des continents	16
E. Les sols, des formations continentales résiduelles qui se forment sous contrôle climatique : l'exemple de l'altération du granite	17
F. Des processus qui influencent le modelé des paysages	19
G. Bilan : vue d'ensemble des processus d'altération	21
Pour faire une fiche de révision : quelques pistes	23
Références	23
Plan du chapitre	24
Plan simplifié du chapitre	26
Plan très simplifié du chapitre	26

© 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 juin 2022 (à partir d'un support de prépa TB) • Dernière actualisation : mars 2026.
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.