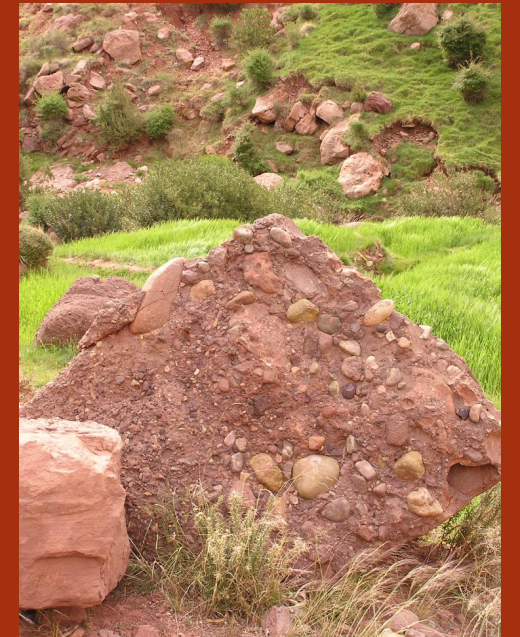
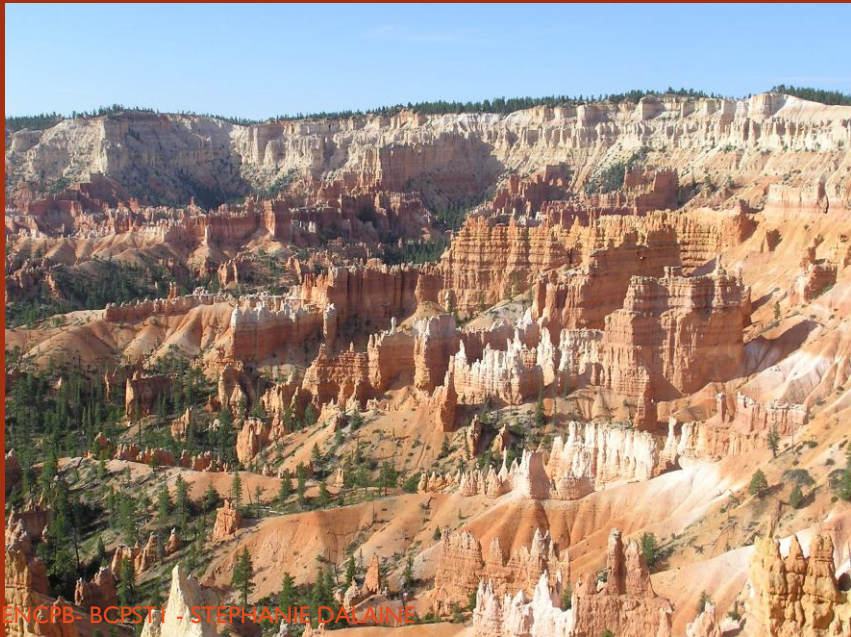


CHAPITRE ST-E-1 : MODELES DES PAYSAGES ET TRANSFERTS DE MATERIAUX EN SURFACE

ST-E : LE PHENOMENE SEDIMENTAIRE



EXTRAIT DU B.O.

Savoirs visés

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). Les produits de l'altération sont différemment mobilisables, en particulier en fonction de leur solubilité.

En surface des continents, l'érosion se traduit par des flux de matières en solution (solutés) ou en suspension (particules). La sédimentation s'opère dans des bassins sédimentaires dont la géométrie est conditionnée par le contexte géodynamique.

Capacités exigibles

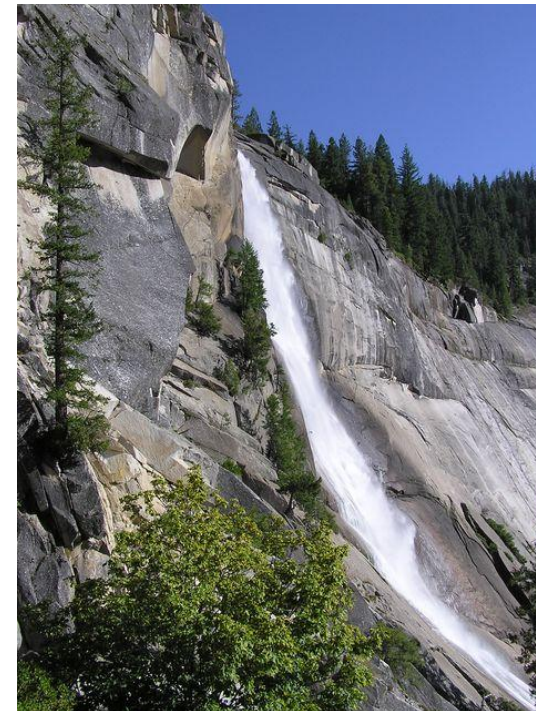
- Analyser le modelé d'un paysage à partir de documents photographiques et cartographiques.
- Identifier les principaux processus d'altération et d'érosion déterminant l'évolution d'un paysage.
- Proposer des hypothèses sur l'influence possible des différents facteurs structuraux, lithologiques et climatiques dans l'évolution du paysage.
- 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 formations résiduelles (exemple des bauxites).
- Expliquer le comportement des particules détritiques en fonction de la vitesse du courant et de la granulométrie par le diagramme de Hjulström.

INTRODUCTION

- Terre = siège d'une **dynamique interne** : magmatisme, sismicité (=sismicité) liée aux mouvements de plaques
- Terre = siège d'une **dynamique externe**: **lithosphère en** interaction avec atmosphère et hydrosphère
 - Reliefs: irrégularités de la surface terrestre dus à:
 - ✓ **phénomènes constructeurs** (forces tectoniques, volcanisme, poussée d'Archimède et isostasie, variations du niveau marin)
 - ✓ **phénomènes destructeurs** (instabilité des roches loin de leurs équilibres thermodynamiques ou chimiques dans les conditions de surface).
 - ⇒ roches subissent **altération** accompagnée d'une **érosion**



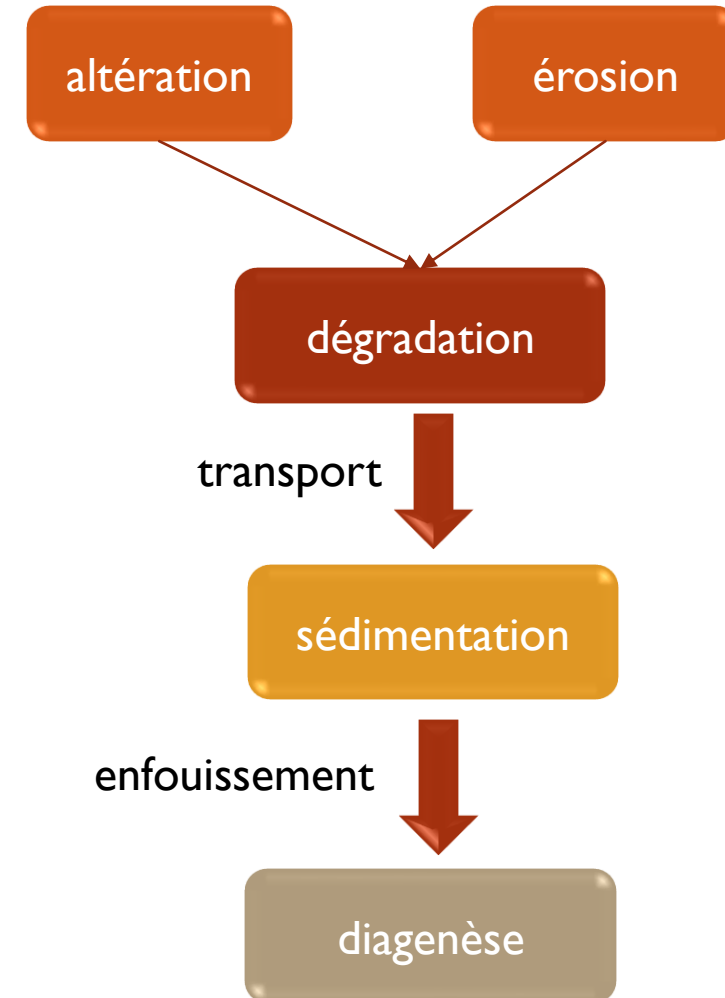
*Half Dome (Yosemite)
(S. Dalaine)*



INTRODUCTION

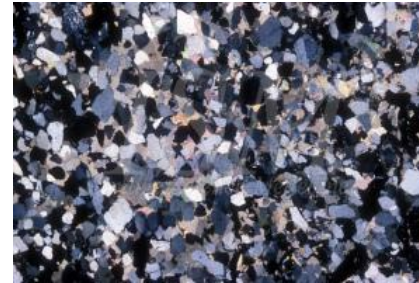


- **Altération**: ensemble des **mécanismes physiques et chimiques** qui vont **transformer** la roche-mère en des phases plus petites (particules) et libérer les ions constitutifs qui pourront **soit partir en solution, soit précipiter** sous forme de minéraux.
- **Erosion** (du grec *erodere* = ronger): ensemble des phénomènes qui à la surface du sol ou à faible profondeur **enlèvent tout ou une partie** des terrains existants. Les débris sont enlevés par un fluide : érosion éolienne, fluviale, glaciaire, marine.
- **Sédiments** (du latin *sedere* : être assis, séjourner) : ensemble constitué par la **réunion de particules** plus ou moins grosses ou de matières précipitées **ayant subi un certain transport**.
- **Roches sédimentaires** : roches **exogènes** = formés à la surface de la Terre (5% en volume de la croûte terrestre O + C)

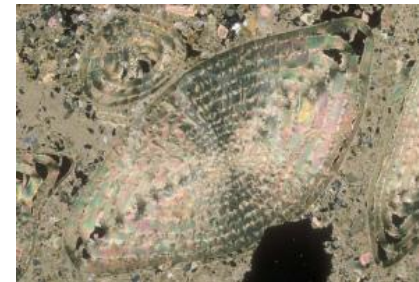


COMPARAISON DE 3 ROCHES SÉDIMENTAIRES

- Grès: microlithes jointifs faiblement diversifiés (2 ou 3 minéraux identifiables), dominance de grains de quartz
 - ⇒ Roche sédimentaire issue de la cimentation de grains de quartz (consolidés par diagenèse) → **roche sédimentaire détritique**
- Calcaire nummulitique: présence de tests calcaires de foraminifères du genre nummulite
 - ⇒ **Roche sédimentaire biogène**
- Gypse: roche constituée de cristaux de sulfate de calcium di-hydratés = minéral gypse
 - ⇒ Roche sédimentaire issue de l'évaporation de l'eau: **évaporite**



Grès en LPA



Calcaire nummulitique en LPA



Gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ (S. Dalaine)



Carrière de grès à Fontainebleau



Calcaire à nummulite et ditrupa (bâtiment d'accueil du jardin des plantes)

INTRODUCTION

- origine des particules sédimentaires? des solutés?
- transport entre la source et le lieu de dépôt?
- lien entre contexte et type de roche formée



Half Dome Yosemite (granodiorite)



Granodiorite du Half Dome (S. Dalaine)

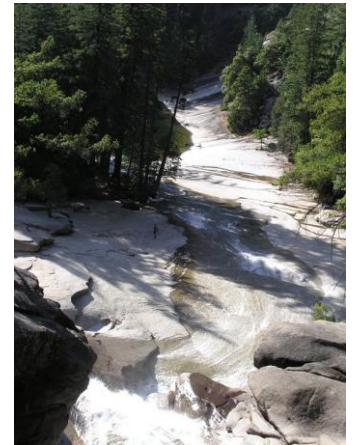
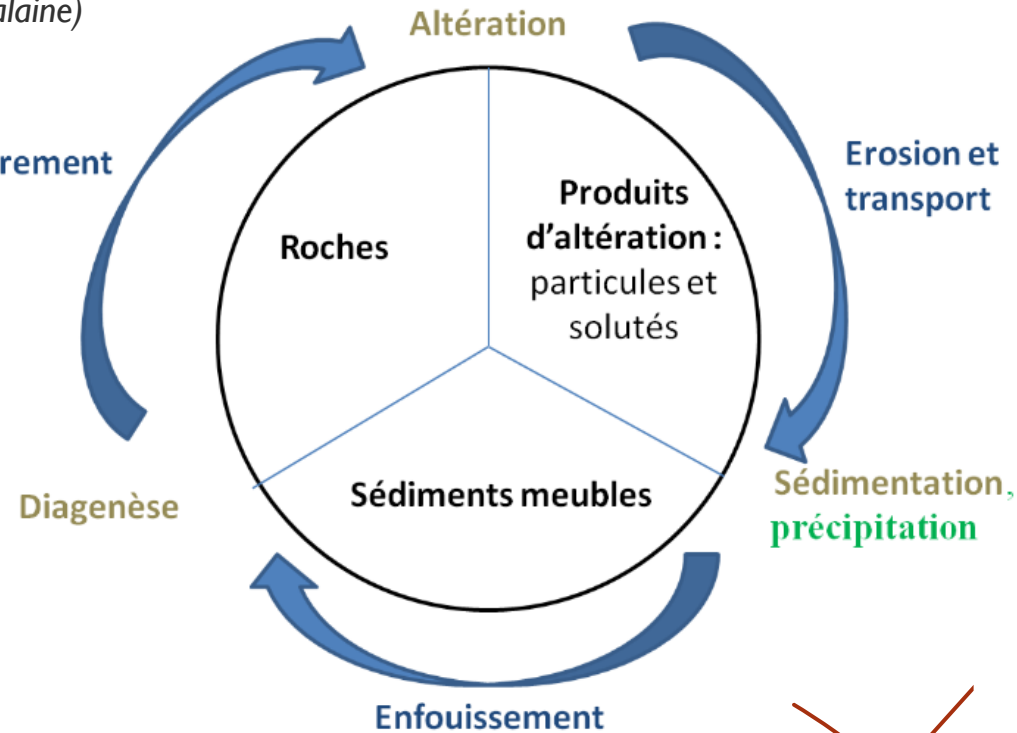
Mise à l'affleurement



Yosemite (S. Dalaine)



Grès de Fontainebleau (S. Dalaine)



Yosemite (S. Dalaine)

Figure 1 : cycle sédimentaire

PLAN: CHAPITRE ST-E-I : MODELÉS DES PAYSAGES ET TRANSFERTS DE MATÉRIAUX EN SURFACE I

- I. Facteurs à l'origine du modelé des paysages : altération physique et chimique**
- A. Etude d'un exemple, le paysage de cuesta à l'Est du Bassin parisien**
- B. Observation de la diversité de modelé des paysages**
 - 1. Observation d'un granite altéré
 - 2. Observation d'un karst
- C. les 3 facteurs à l'origine du modelé du paysage**
- D. L'altération physique des roches, les agents de la désagrégation mécanique des roches**
 - 1. Effets de la température : thermoclastie et cryoclastie
 - 2. Mécanismes dépendant de la gravité
 - 3. L'action de l'eau à l'état solide : exemple des glaciers
 - 4. autres agents de désagrégation mécanique
 - 5. Les conséquences de ces facteurs d'altération varient selon ...
- E. L'altération chimique des roches**
- F. La dissolution des carbonates**
 - 1. L'altération des roches silicatées, exemple du granite, une altération par hydrolyse
 - 2. L'hydrolyse des silicates par l'eau
- II. De l'érosion au transport des particules/solutés**
- A. Diversité des modes et agents de transports**
 - 1. Transport sous forme dissoute
 - 2. Transport en suspension
 - 3. Transport en masse
- B. Cas du transport des solutés : importance du substrat des bassins versants**
- C. Cas du transport des particules**

PLAN: CHAPITRE ST-E-I : MODELÉS DES PAYSAGES ET TRANSFERTS DE MATÉRIAUX EN SURFACE I

- I. Facteurs à l'origine du modelé des paysages : altération physique et chimique**
- A. Etude d'un exemple, le paysage de cuesta à l'Est du Bassin parisien**
- B. Observation de la diversité de modelé des paysages**
 - 1. Observation d'un granite altéré
 - 2. Observation d'un karst
- C. les 3 facteurs à l'origine du modelé du paysage**
- D. L'altération physique des roches, les agents de la désagrégation mécanique des roches**
 - 1. Effets de la température : thermoclastie et cryoclastie
 - 2. Mécanismes dépendant de la gravité
 - 3. L'action de l'eau à l'état solide : exemple des glaciers
 - 4. autres agents de désagrégation mécanique
 - 5. Les conséquences de ces facteurs d'altération varient selon ...
- E. L'altération chimique des roches**
- F. La dissolution des carbonates**
 - 1. L'altération des roches silicatées, exemple du granite, une altération par hydrolyse
 - 2. L'hydrolyse des silicates par l'eau
- II. De l'érosion au transport des particules/solutés**
- A. Diversité des modes et agents de transports**
 - 1. Transport sous forme dissoute
 - 2. Transport en suspension
 - 3. Transport en masse
- B. Cas du transport des solutés : importance du substrat des bassins versants**
- C. Cas du transport des particules**

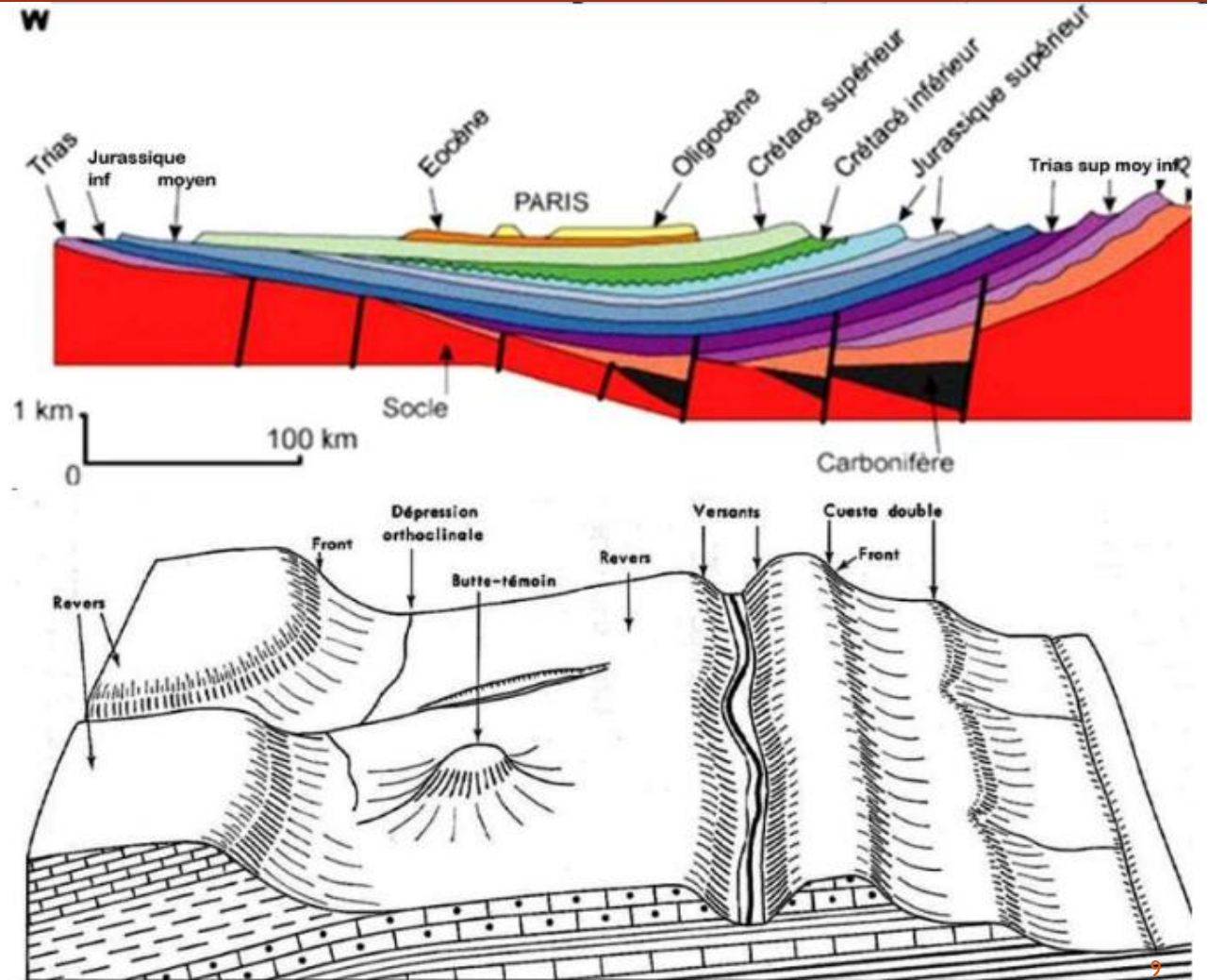
I. FACTEURS A L'ORIGINE DU MODELE DES PAYSAGES : ALTERATION PHYSIQUE ET CHIMIQUE

A. ETUDE D'UN EXEMPLE, LE PAYSAGE DE CUESTA A L'EST DU BASSIN PARISIEN

■ **Cuesta:** relief dissymétrique marqué par un **talus** (le front) et un **revers** (plateau incliné)



- **Bordure Est du Bassin parisien:** succession de cuestas
- Cartes 1/50 000: **aspect persillé** avec léger pendage en direction du centre du bassin
- Relief structural dû à **érosion différentielle** des couches sédimentaires
 - ✓ **Calcaires, meulières résistants à l'érosion** (talus, buttes témoins)
 - ✓ **Marnes meubles, tendres** facilement altérables et mobilisables (plaines)

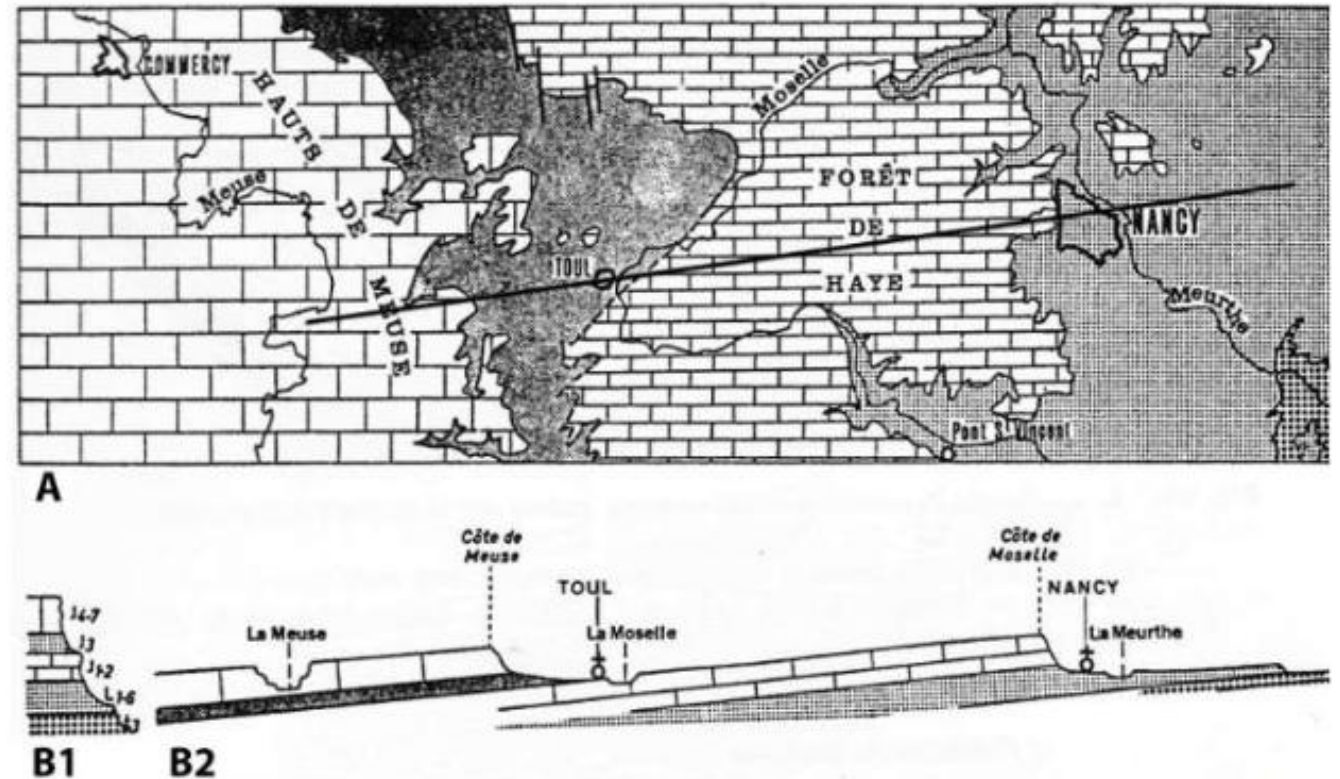


Les éléments du relief monoclinale : la cuesta

I. FACTEURS A L'ORIGINE DU MODELE DES PAYSAGES : ALTERATION PHYSIQUE ET CHIMIQUE

A. ETUDE D'UN EXEMPLE, LE PAYSAGE DE CUESTA A L'EST DU BASSIN PARISIEN

- Cuesta = paysage causé par 2 facteurs :
 - **facteur structural = inclinaison des couches**
 - **influence de la lithologie (résistance différentielle des couches à l'érosion)**



Comportement différentiel des couches au niveau des cuestas jurassiques de l'Est du Bassin parisien

Barre de la Jaume

SE

NW



On n'entend pas les cigales, mais on voit les espèces calcicoles et basiphiles!

Cuesta de Sainte Anne d'Evenos (Var)
<https://www.geodiversite.net/media/1154>

AUTRE EXEMPLE DE CUESTA DANS LE VAR: SAINTE ANNE EVENOS

- 10. **c6** = **Valdo-Fuvélien**. Calcaires noirâtres et marnes riches en débris de Mollusques avec intercalations de passées ligniteuses (Cf. [Argillère de Fontanieu](#)).
- 9. **c5M** = **Santonien supérieur**. Marnes, marnes et sables, grès.
- 8. **c5R** = **Santonien inférieur**. Calcaires à Rudistes de la Barre de La Cadière d'Azur.
- 7. **c5-4M** = **Coniacien supérieur**. Marnes à Spongiaires.
- 6. **c5-4G** = **Coniacien moyen**. Grès avec intercalations de bancs calcaires
- 5. **c4R** = **Coniacien inférieur**. Calcaires à Rudistes de la Barre de la Jaume.

Lacunes L2 du Cénomaniens moyen à supérieur et du Turonien.

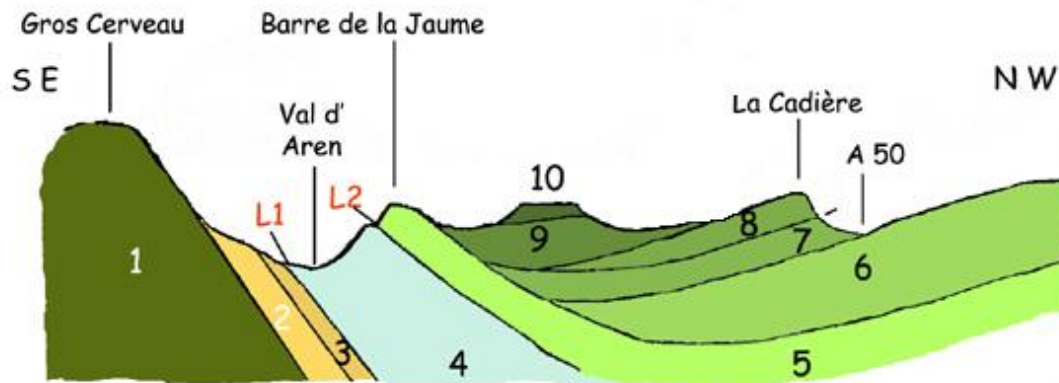
4. **c2a** = **Cénomaniens inférieur à moyen**. Grès et sables de Sainte-Anne d'Evenos à orbitolines et turritelles.

Lacune L1 de Albien

3. **n6** = **Gargasien (Aptien supérieur)**. Calcaire marneux et marnes à rudistes, foraminifères planctoniques et algues.

2. **n5** = **Bédoulien (Aptien inférieur)**. Calcaire argileux à silex et ammonites.

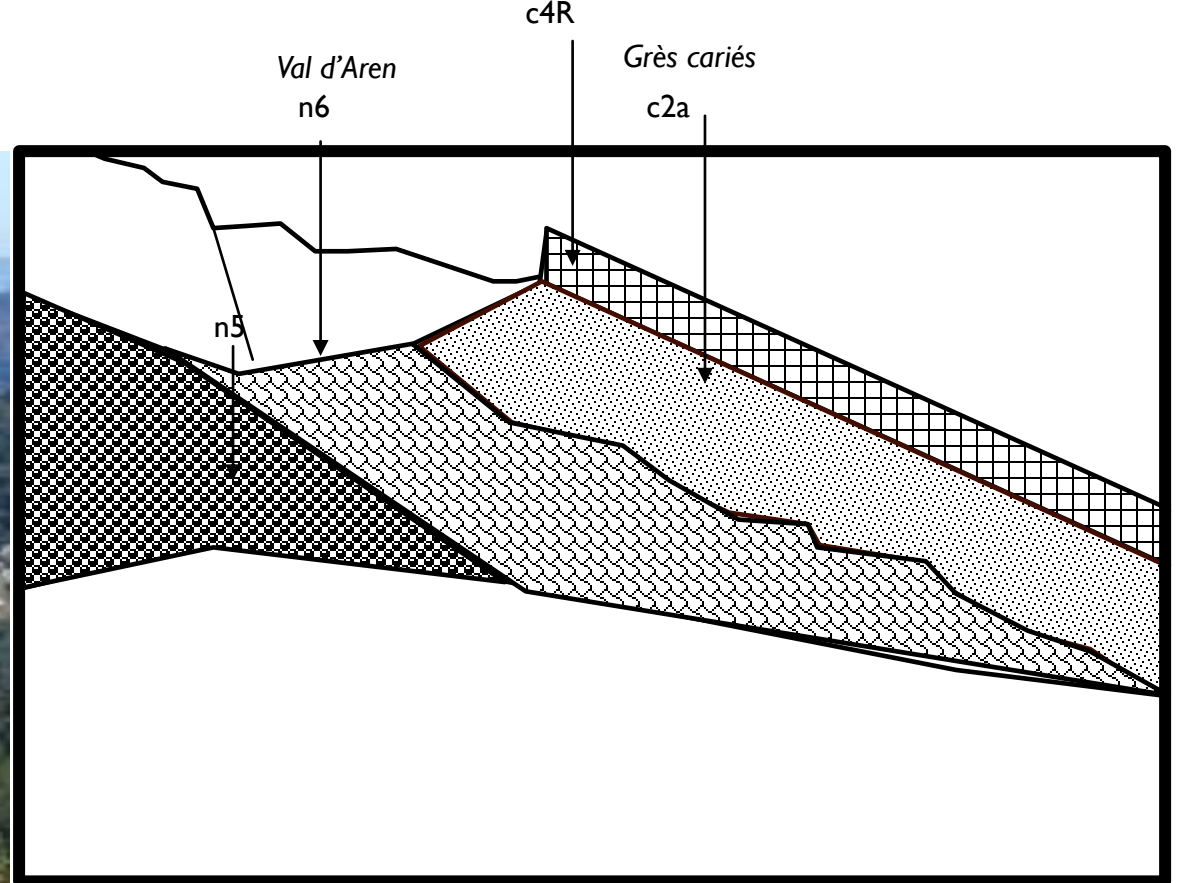
1. **n4U** = **Barrémien à faciès urgonien**. Calcaire à rudites et à madréporaires du Gros Cerveau.



Cuesta de Sainte Anne d'Evenos



Cuesta de Sainte Anne d'Evenos



- c4R: Coniacien inférieur. **Calcaires à Rudistes** de la Barre de Jaume
c2a: Cénomaniens inférieur et moyen. Grès et sables de Sainte-Anne d'Evenos à orbitolines et turritelles.
n6: Gargasien (stratotype de Gargamelle). Calcaire marneux et marnes à Rudistes, foraminifères planctoniques et algues
n5: Bédoulien (Aptien inférieur). Calcaire argileux à silex et ammonites

LES BASSINS ÉPICONTINENTAUX MÉSOZOÏQUE

■ Au Mésozoïque (Trias, Jurassique, Crétacé), le **niveau marin** est plus élevé qu'actuellement (la température globale à l'époque est plus élevée, et la fonte des glaciers polaires entraîne une hausse du niveau marin).



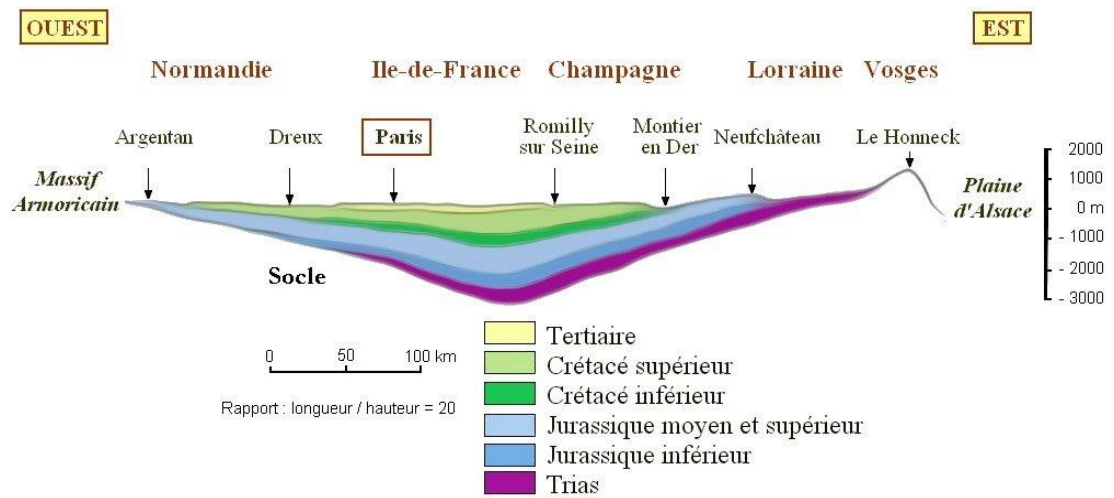
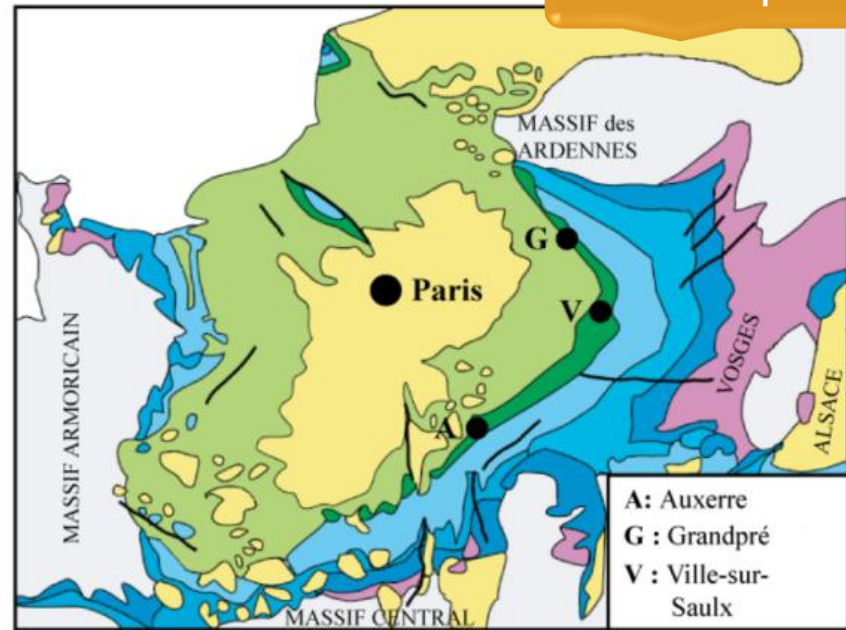
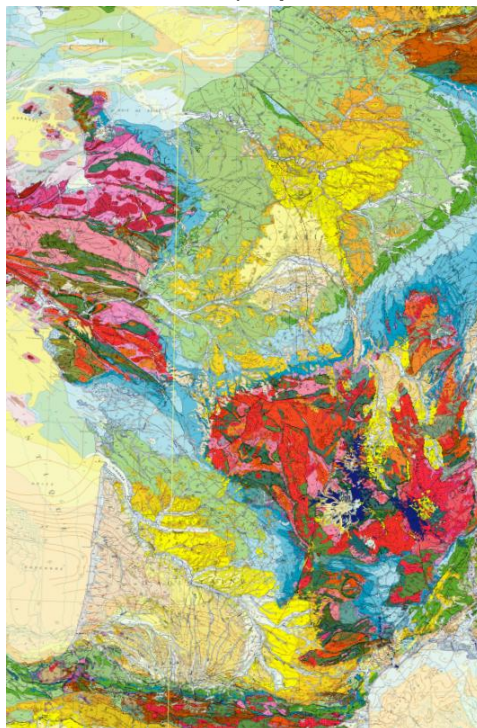
⇒ **grands bassins sédimentaires** dits **épicontinentaux** remplis par des sédiments marins (parfois lacustres) qui se déposent sur le **socle hercynien**

⇒ Bassin Parisien

⇒ Bassin Aquitain

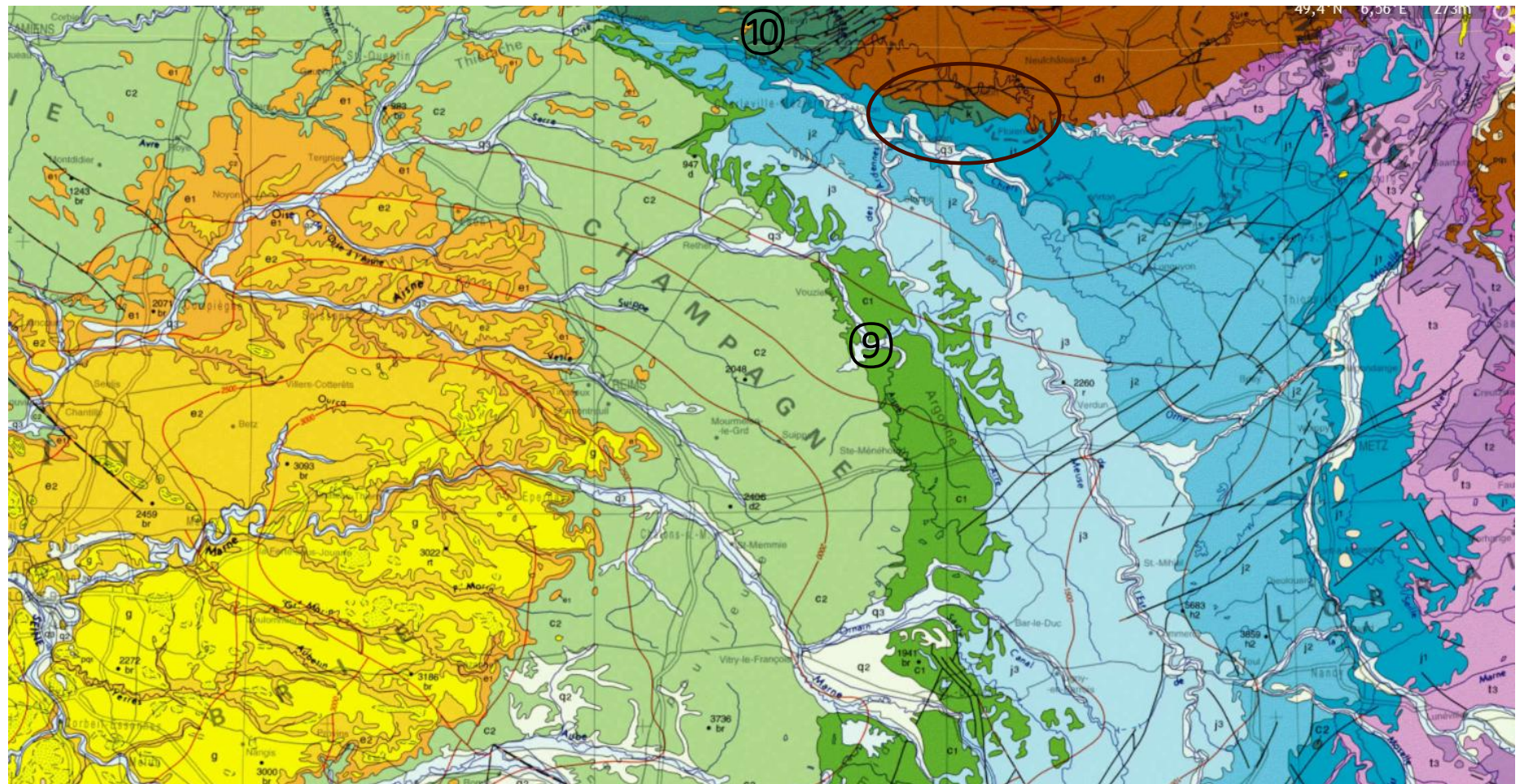
■ Indices d'une **transgression**

=avancée de la mer sur les terres



LES BASSINS ÉPICONTINENTAUX MÉSOZOÏQUE

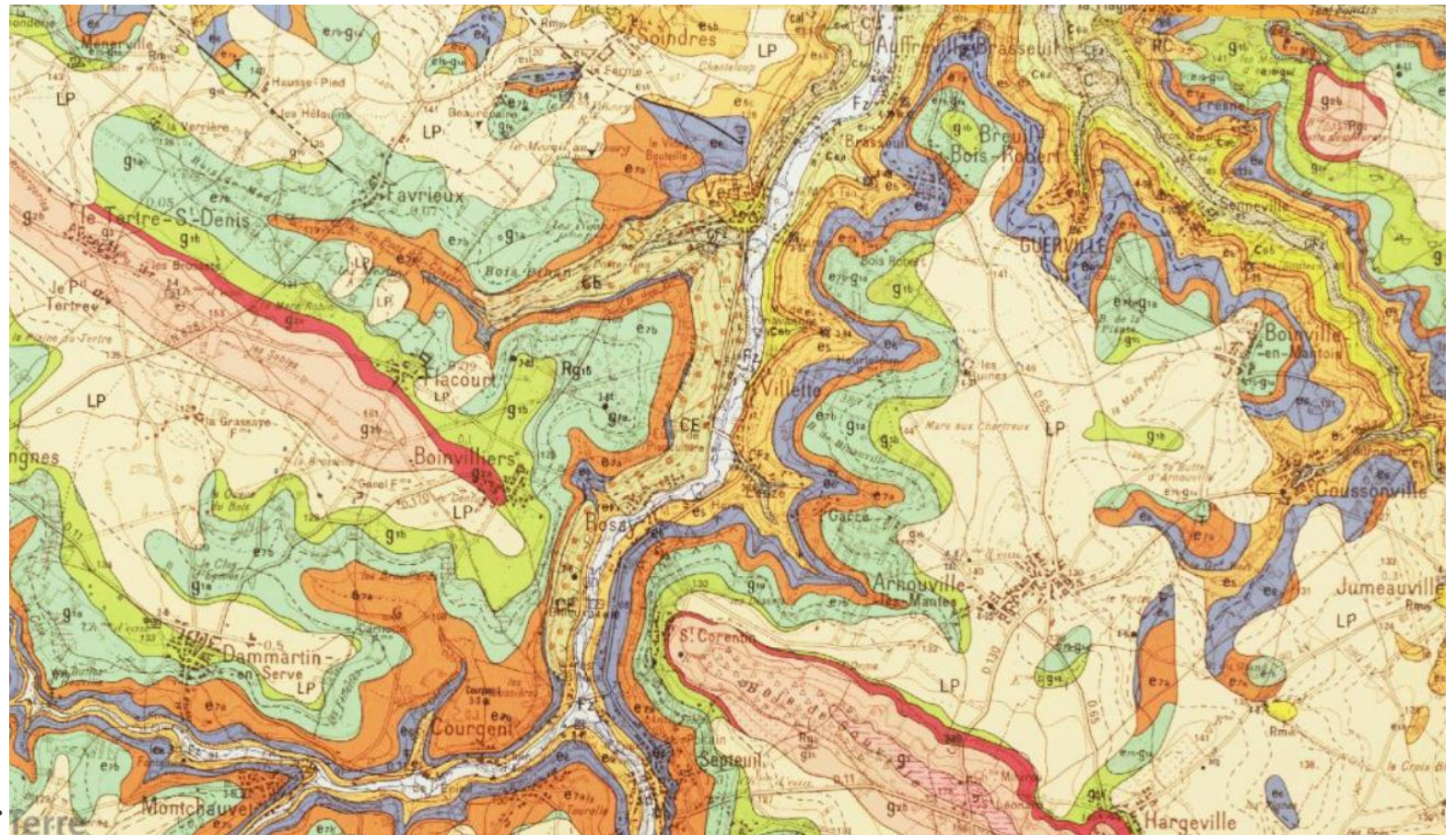
- 9. Isobathes indiquant la profondeur du Bassin parisien
- 10. Contact anormal : témoin d'épisodes de transgression/régression



II. LES PRINCIPALES DISPOSITIONS DES COUCHES SÉDIMENTAIRES SUR LES CARTES GÉOLOGIQUES AU 1/50 000^{ÈME}

A. RELIEF MONOCLINAL ET TABULAIRE

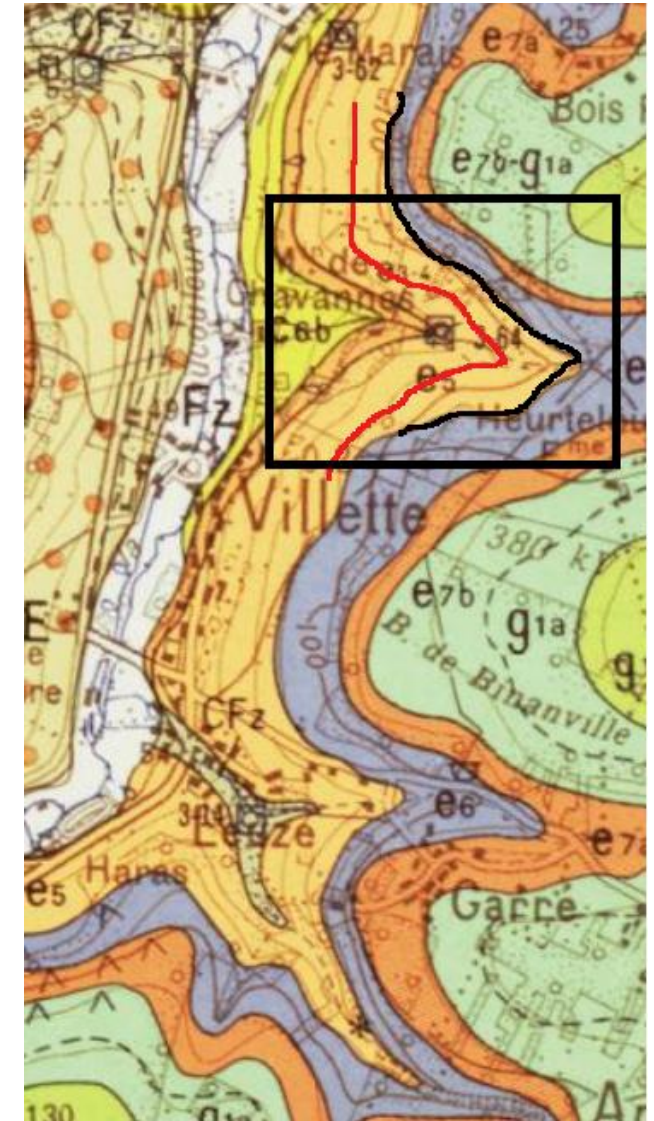
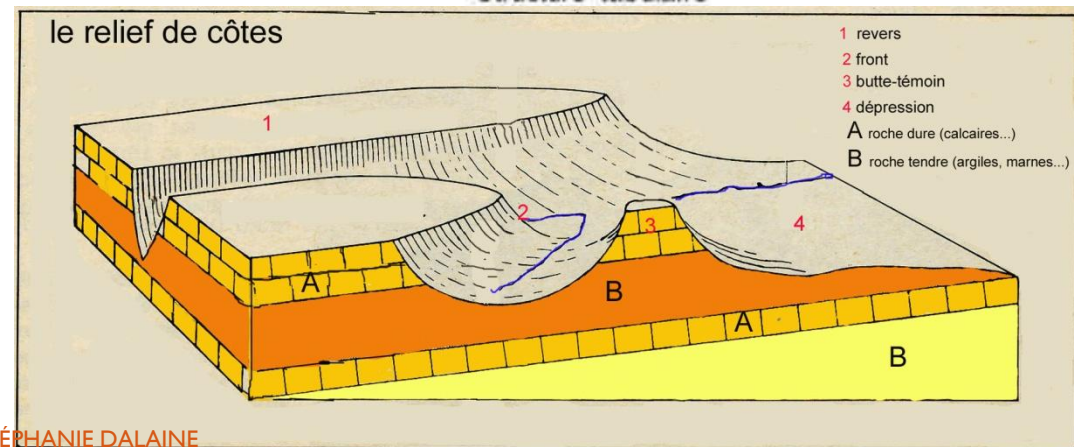
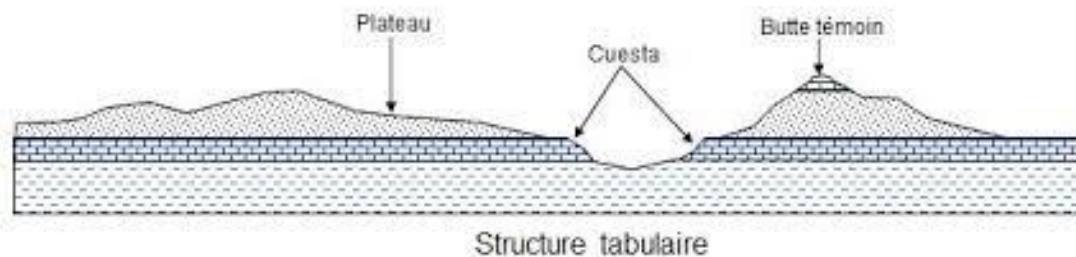
- Pas d'orientation préférentielle des structures, structure « persillée » : relief monoclinale ou tabulaire
- Relief monoclinale:
- strates **concordantes** orientées toutes selon le même pendage.
- **cuestas** (formées d'un relief fort du côté du front, et d'un plateau peu incliné sur le revers de la cuesta)
- **buttes témoins** (conservées par l'érosion)
- si pendage très faible ou nul (strates horizontales) = **structure tabulaire** → strates dont les contours géologiques suivent parfaitement les courbes de niveau.



Carte Houdan Ile-de-France 1/50 000^e

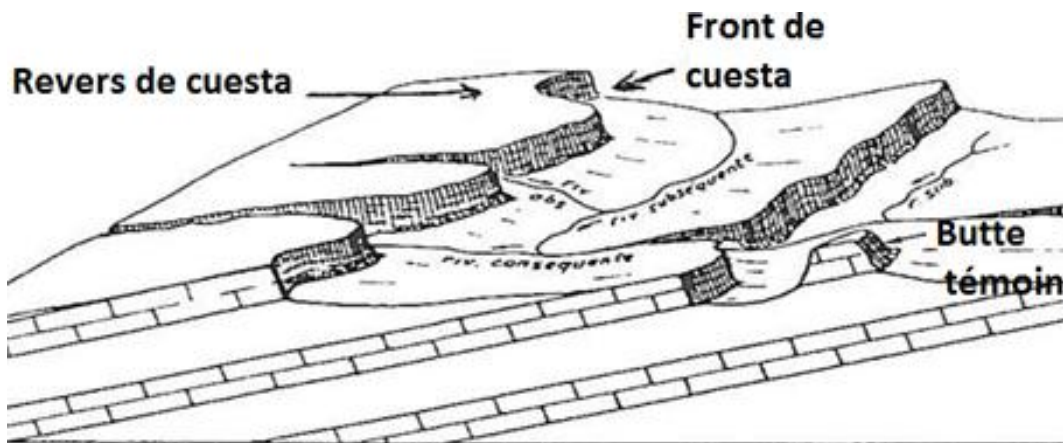
A. RELIEF MONOCLINAL ET TABULAIRE

- Distinguer deux grands types de relief :
- Le **relief tabulaire** se retrouve en général en cœur de bassin sédimentaire.
- ⇒ Les changements de couches sont **parallèles aux courbes de niveau** : relief tabulaire
- ⇒ Les changements de couches sont presque parallèles aux courbes de niveau, et suivent globalement les cours d'eau :



A. RELIEF MONOCLINAL ET TABULAIRE

- Distinguer deux grands types de relief :
- **Relief monoclinal:** s'observe notamment en bordure de bassin, et le sens du pendage pointe vers le centre du bassin. L'est de la France présente typiquement ce type de relief.



Front de cuesta



Carte de Brie (1/50 000^e)

A. RELIEF MONOCLINAL ET TABULAIRE

Distinguer deux grands types de relief :

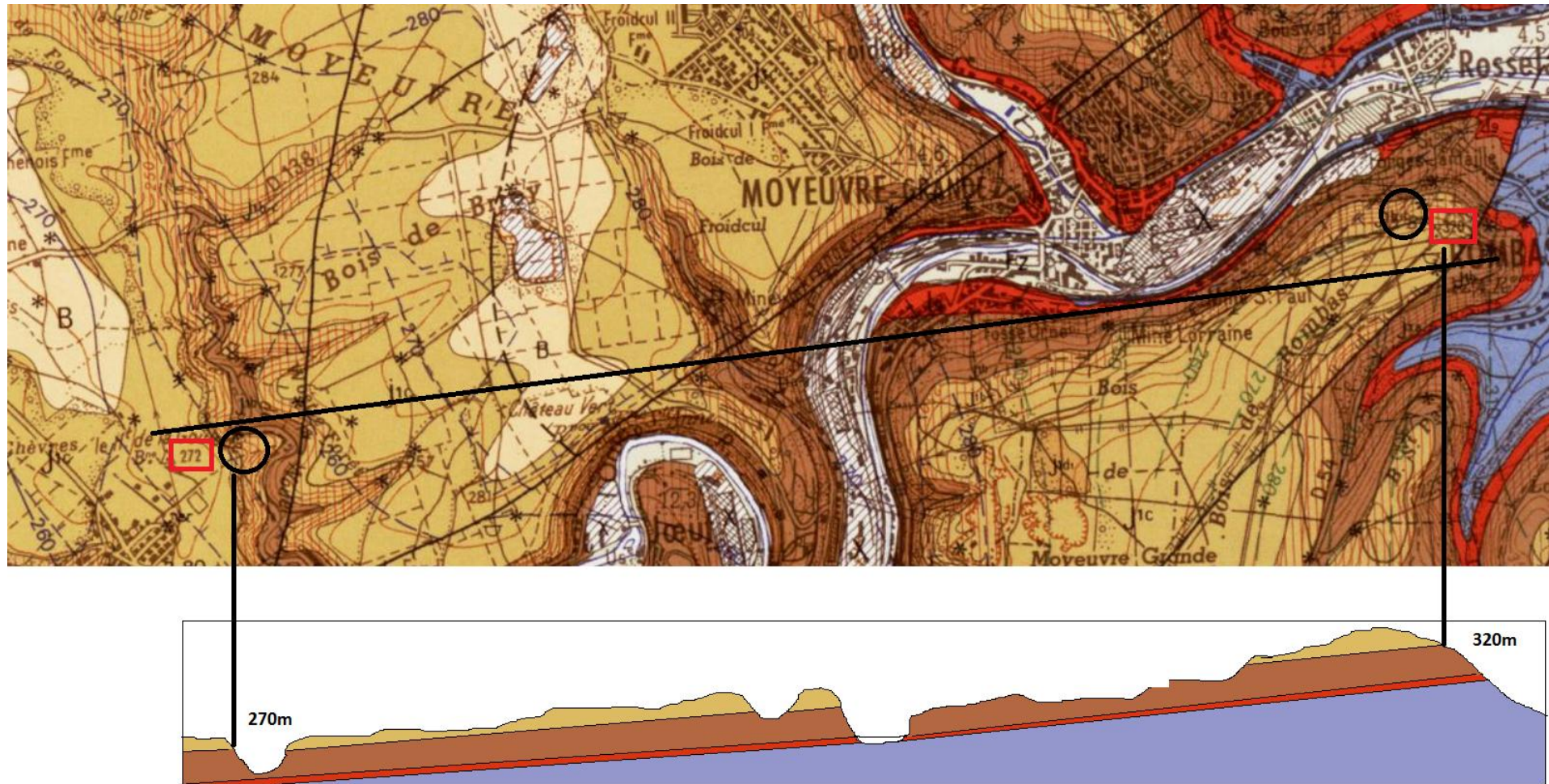
Comment retrouver le pendage global d'un relief monoclinal ?

Ici, le changement de couche a lieu vers 270m d'altitude

Ici, le changement de couche a lieu vers 320m d'altitude



A. RELIEF MONOCLINAL ET TABULAIRE



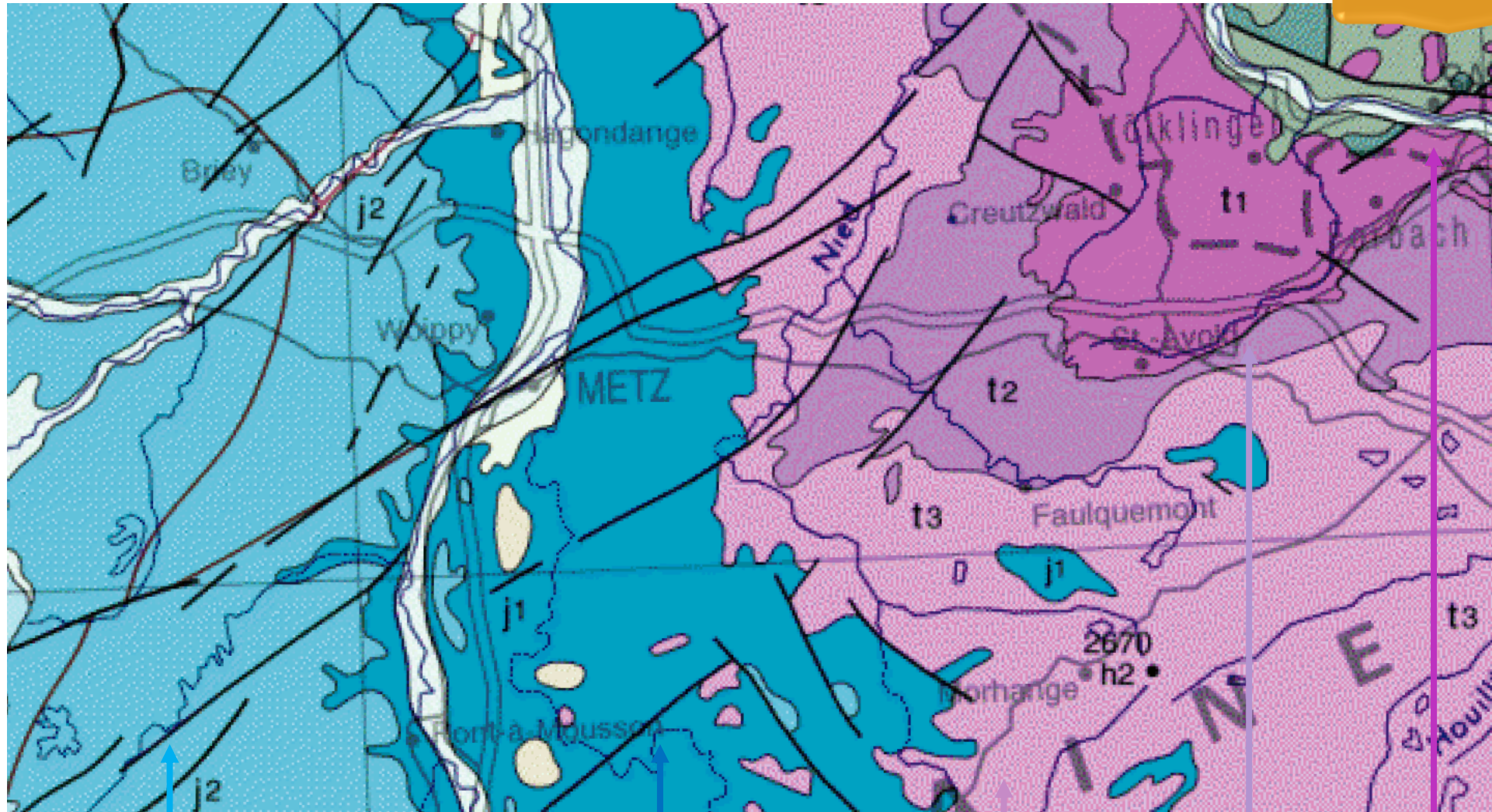
On a donc un pendage vers la gauche (vers l'Ouest)

Relief monoclin:



Relief tabulaire:





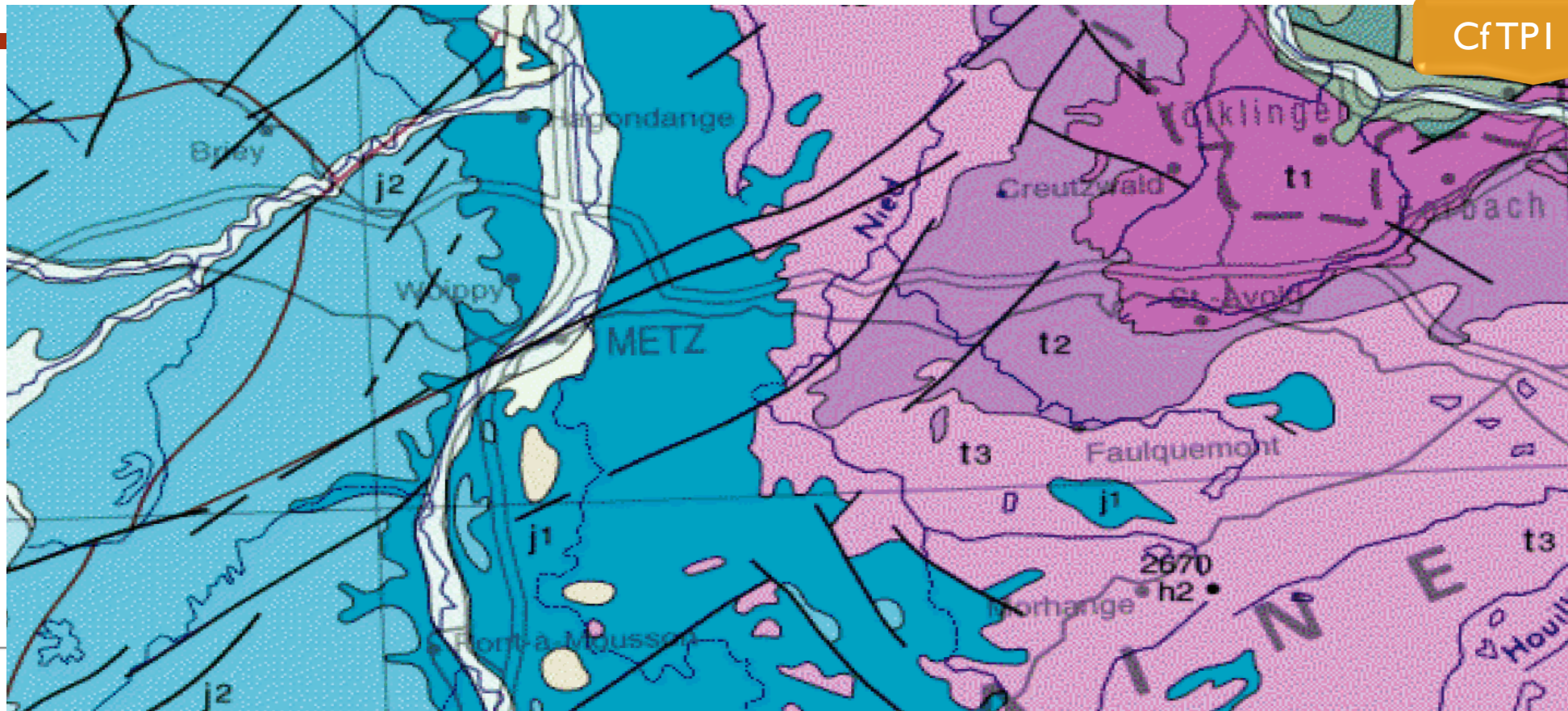
Jurassique
moyen

Jurassique
inférieur

Trias
supérieur

Trias
moyen

Trias
inférieur

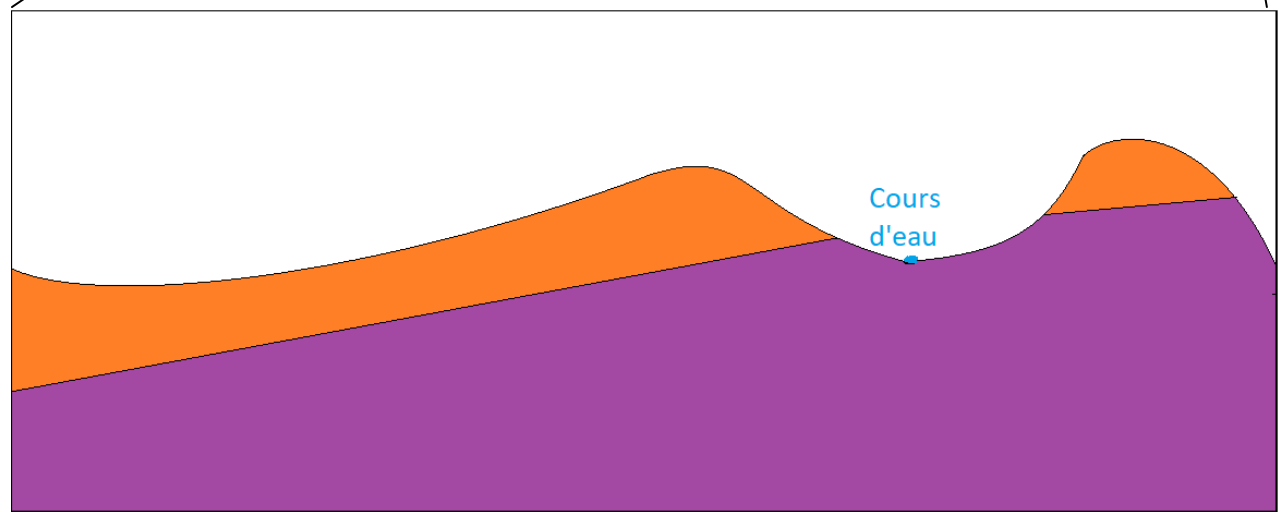
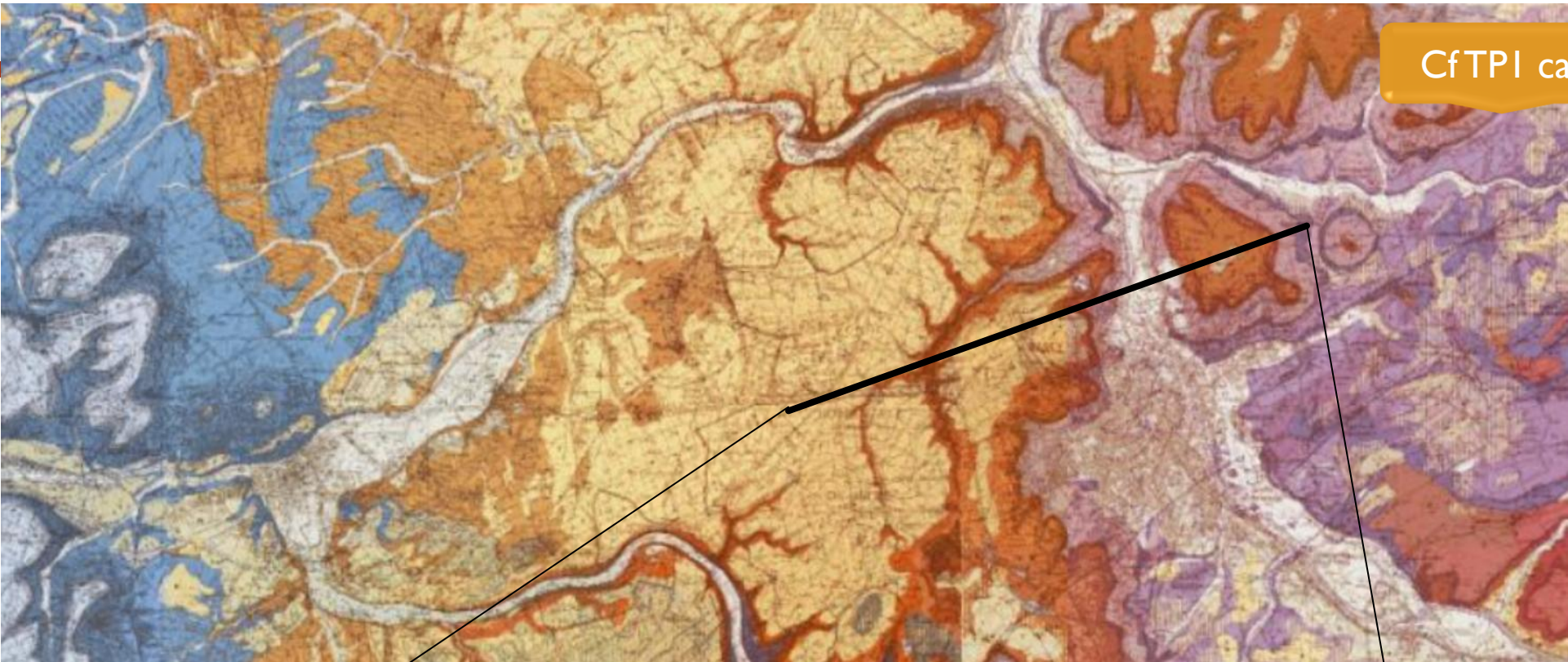




Revers de cuesta

Front de cuesta

Butte témoin



PLAN: CHAPITRE ST-E-I : MODELÉS DES PAYSAGES ET TRANSFERTS DE MATÉRIAUX EN SURFACE I

- I. Facteurs à l'origine du modelé des paysages : altération physique et chimique**
- A. Etude d'un exemple, le paysage de cuesta à l'Est du Bassin parisien**
- B. Observation de la diversité de modelé des paysages**
 - 1. Observation d'un granite altéré
 - 2. Observation d'un karst
- C. les 3 facteurs à l'origine du modelé du paysage**
- D. L'altération physique des roches, les agents de la désagrégation mécanique des roches**
 - 1. Effets de la température : thermoclastie et cryoclastie
 - 2. Mécanismes dépendant de la gravité
 - 3. L'action de l'eau à l'état solide : exemple des glaciers
 - 4. autres agents de désagrégation mécanique
 - 5. Les conséquences de ces facteurs d'altération varient selon ...
- E. L'altération chimique des roches**
- F. La dissolution des carbonates**
 - 1. L'altération des roches silicatées, exemple du granite, une altération par hydrolyse
 - 2. L'hydrolyse des silicates par l'eau
- II. De l'érosion au transport des particules/solutés**
- A. Diversité des modes et agents de transports**
 - 1. Transport sous forme dissoute
 - 2. Transport en suspension
 - 3. Transport en masse
- B. Cas du transport des solutés : importance du substrat des bassins versants**
- C. Cas du transport des particules**

B. OBSERVATION DE LA DIVERSITE DE MODELE DES PAYSAGES

I. Observation d'un granite altéré

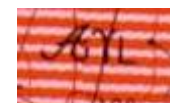
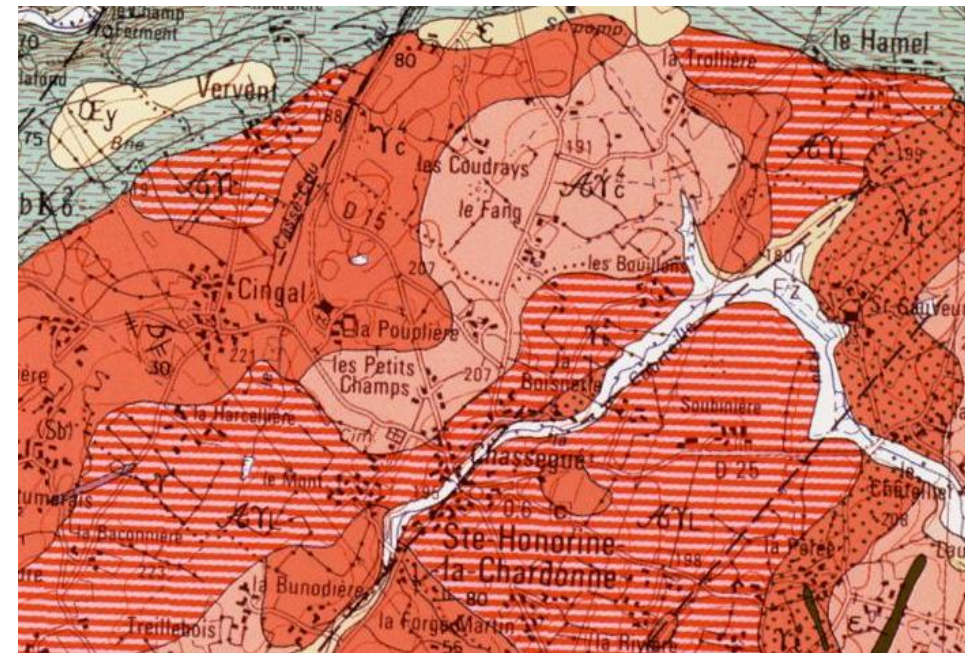


Altération croissante

Granite sain avec diaclases = fractures délimitant des blocs anguleux

Granite altéré aux diaclases élargies et remplies d'un peu d'arène

Arène dominante et boules de granité résiduel



Arènes limoneuses (massif d'Athis)



Arènes granitiques (massif d'Athis)



végétation

sol

Altérite
(arène)

Granite sain

diaclasses

Granite
altéré
(boule)



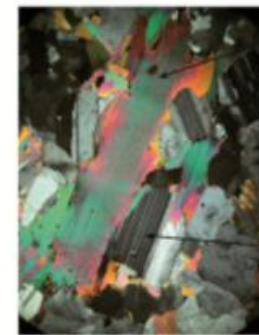
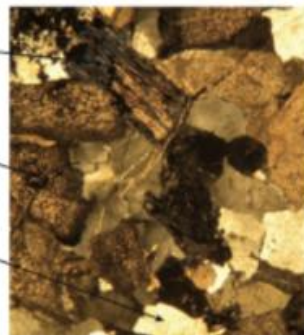
Eau météoritique

Granite de Flamanville (S. Dalaine)

Biotite altérée

Feldspath altéré

Quartz



Biotite non
altérée

Quartz

Feldspath non
altéré

Schéma interprétatif du granite de
Flamanville (S. Dalaine)

B. OBSERVATION DE LA DIVERSITE DE MODELE DES PAYSAGES



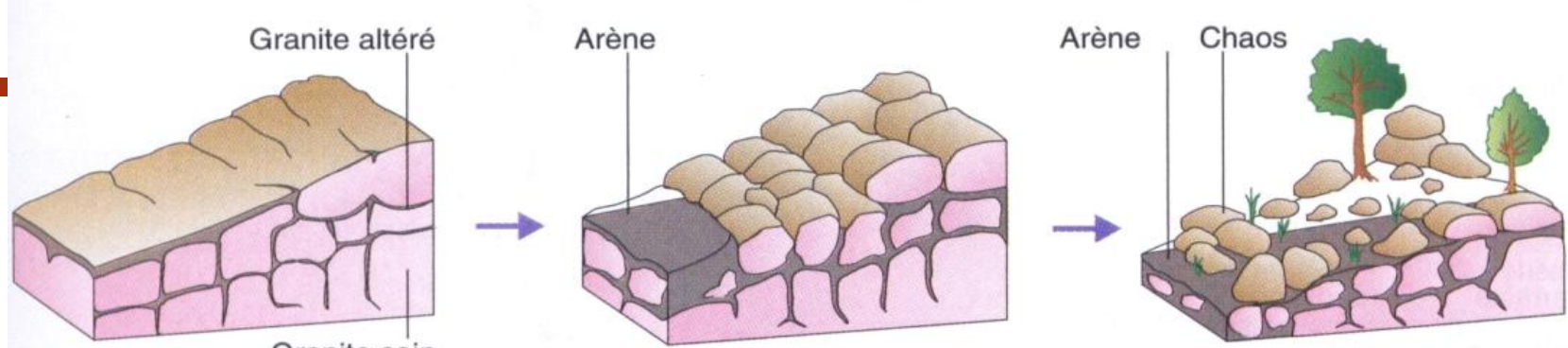
I. Observation d'un granite altéré

- **Pas affleurement direct** de roche saine (granite)
 - Roche surmontée d'un sol avec végétation
 - ✓ **sol** = formation superficielle constituée en proportion variable de matière organique (issue de la dégradation des êtres vivants), de particules minérales (issues de la dégradation de la roche saine sous-jacente) et de fluides (gazeux ou liquides) remplissant la porosité.
- **Altérite**: zone sans matière organique provenant de l'altération de la roche saine
 - Altération sous climat tempéré
 - ✓ **arène** (du latin *arena* : sable) formée de minéraux inaltérés (en général quartz)
 - ✓ arènes très répandues sur les **massifs anciens** dans les régions des **latitudes moyennes**

Ex: Massif central, Massif armoricain (Ploumanac'h) mais aussi Pyrénées



Granite de Flamanville (S. Dalaine)

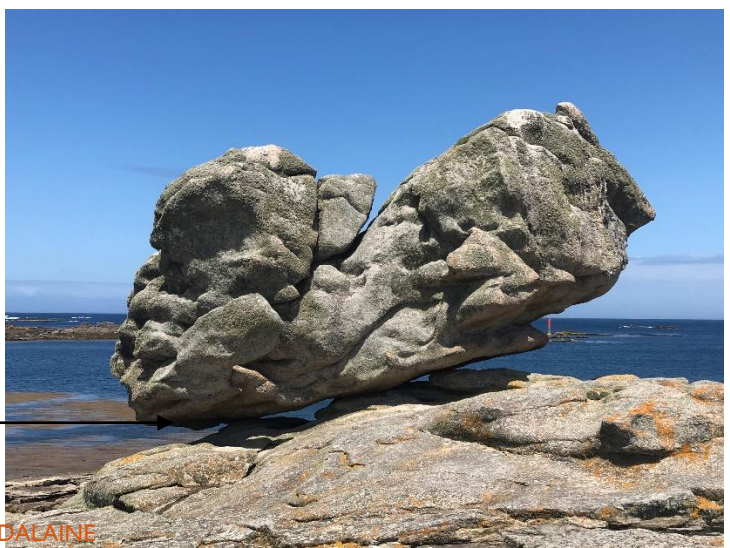


Du granite sain au chaos

Chaos = ensemble enchevêtré de boules de granite altéré

arène granitique (emportée par le vent et l'action mécanique des promeneurs)

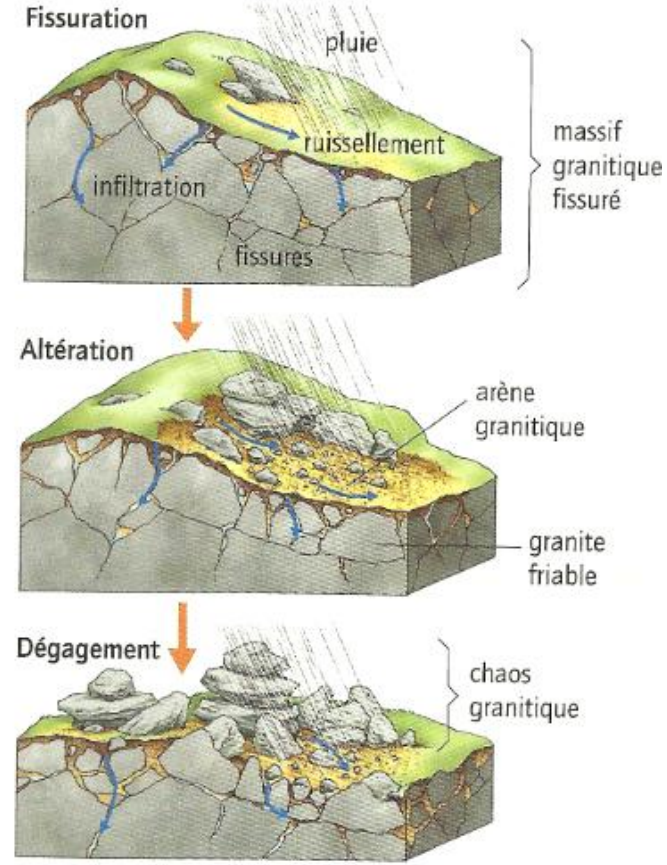
Chaos (ensemble de blocs ou boules) granitique à Plougasnou (gauche) et sur l'île de Sein (S. Dalaine)



Absence d'arène granitique (emportée par la mer)

1. **Désagrégation mécanique** de la roche mère : diaclase
2. Infiltration d'eau **altération chimique** du granite par hydrolyse
3. Granite altéré avec auréoles de rouille, fd ternes, altération de biotite arène
- 3'. Boule de granite sain au sein du chaos

Altération mécanique
Altération chimique



→ eau

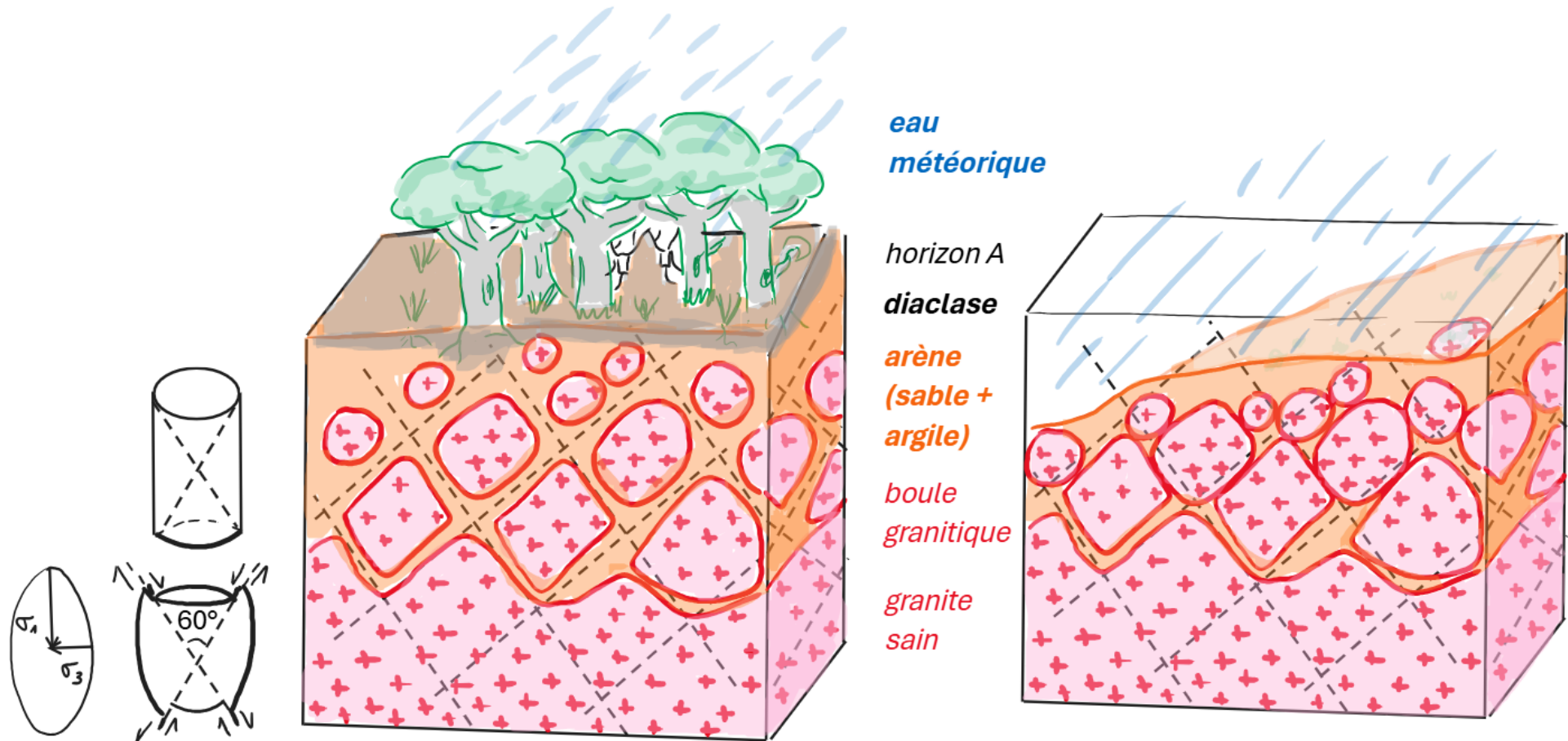
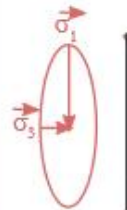
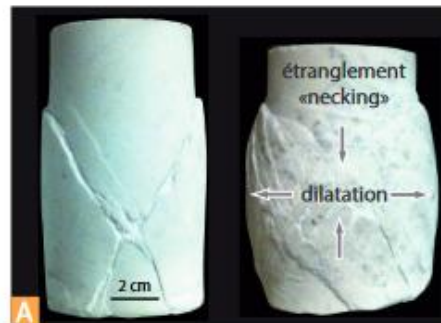
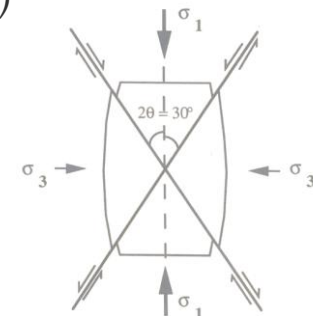


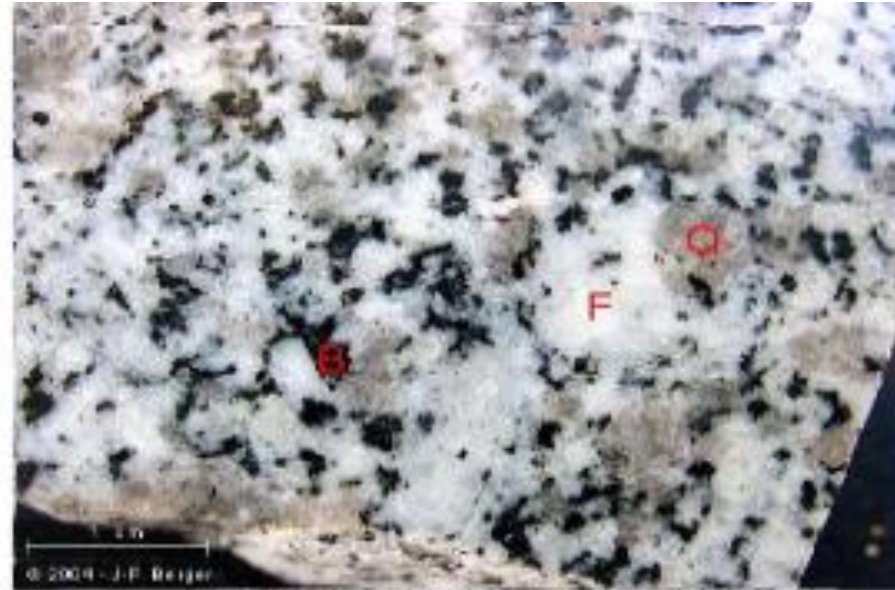
Schéma bilan des étapes de la mise en place d'un chaos granitique en climat tempéré (S. Dalaine)



Résultats d'expériences de presse uniaxiale (dans Renard et al, Paul Nougier ellipses)



Compression



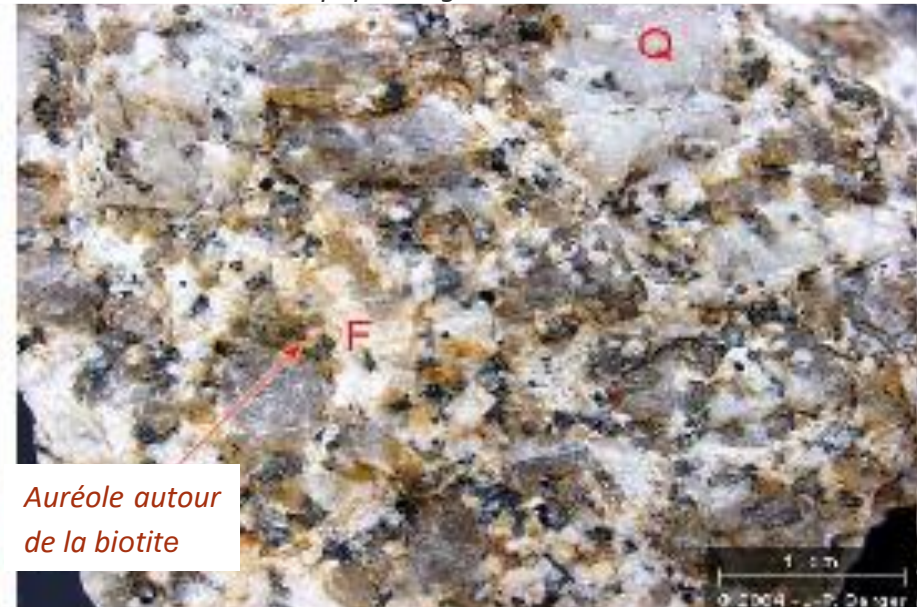
Quartz

Mica (Biotite)

Feldspath

Granite très altéré avec formation d'arène granitique

Vue macroscopique du granite en début d'altération



Des auréoles de couleur
rouille entourent les
cristaux de biotite

Feldspaths ternes

Quartz

Auréole autour
de la biotite

PLAN: CHAPITRE ST-E-I : MODELÉS DES PAYSAGES ET TRANSFERTS DE MATÉRIAUX EN SURFACE I

- I. Facteurs à l'origine du modelé des paysages : altération physique et chimique**
- A. Etude d'un exemple, le paysage de cuesta à l'Est du Bassin parisien**
- B. Observation de la diversité de modelé des paysages**
 - 1. Observation d'un granite altéré
 - 2. Observation d'un karst
- C. les 3 facteurs à l'origine du modelé du paysage**
- D. L'altération physique des roches, les agents de la désagrégation mécanique des roches**
 - 1. Effets de la température : thermoclastie et cryoclastie
 - 2. Mécanismes dépendant de la gravité
 - 3. L'action de l'eau à l'état solide : exemple des glaciers
 - 4. autres agents de désagrégation mécanique
 - 5. Les conséquences de ces facteurs d'altération varient selon ...
- E. L'altération chimique des roches**
- F. La dissolution des carbonates**
 - 1. L'altération des roches silicatées, exemple du granite, une altération par hydrolyse
 - 2. L'hydrolyse des silicates par l'eau
- II. De l'érosion au transport des particules/solutés**
- A. Diversité des modes et agents de transports**
 - 1. Transport sous forme dissoute
 - 2. Transport en suspension
 - 3. Transport en masse
- B. Cas du transport des solutés : importance du substrat des bassins versants**
- C. Cas du transport des particules**

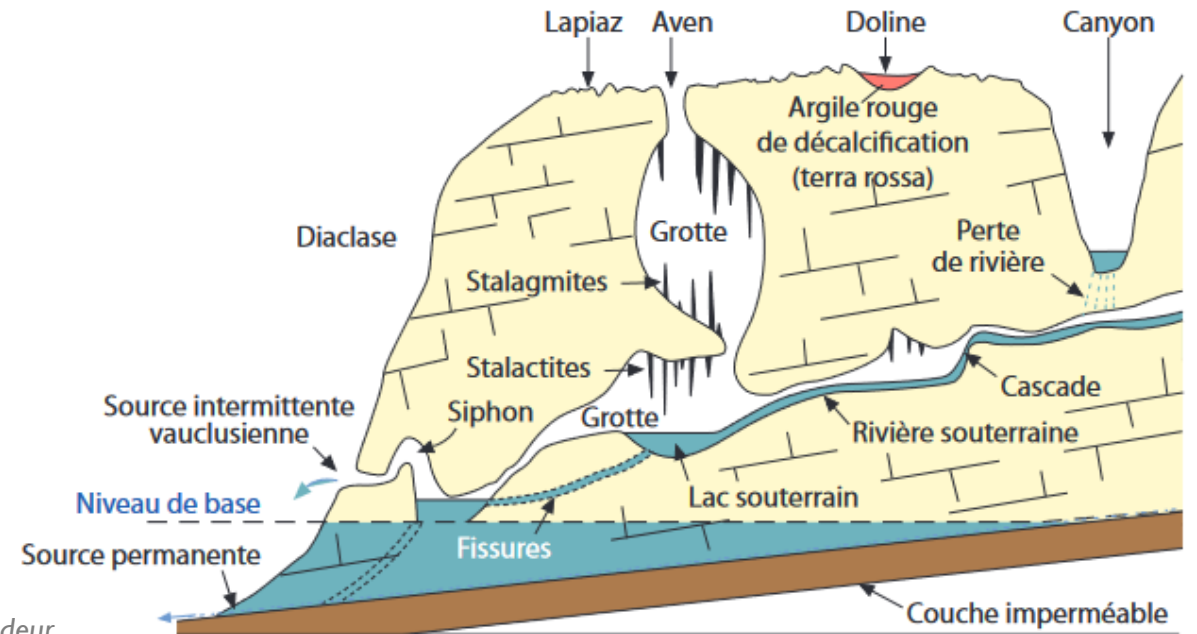
B. OBSERVATION DE LA DIVERSITE DE MODELE DES PAYSAGES

2. Observation d'un karst



■ Karst: formes d'érosion résultant de l'activité des **eaux souterraines** → **dissolution des carbonates de calcium**

- ✓ Carso (*karst en allemand*): Trieste
- **Réseaux souterrains d'eaux (galeries) installés grâce aux failles**
 - ✓ Points d'absorption vs **résurgences**
 - ✓ Source intermittente vauclusienne (liée à un réservoir aquifère karstique)
- **Très faible réseau hydrographique superficiel**
 - ✓ Pentes rares: relief de succession de plateaux entaillés
 - ✓ Modelé sous forme de ciselures : *lapiés = lapiaz*
 - ✓ Plateaux entaillés par gorges (*canyons: vallée à flancs raides*)
- **Dépressions fermées:**
 - ✓ **Dolines**: Dépression de forme ovale, de quelques mètres à 200 m de profondeur.
 - ✓ **Poljés**: plaines fermées larges de plrs km, résidus argileux au fond des dépressions → terres fertiles
 - ✓ **Aven**: entonnoir s'ouvrant à la surface du plateau (*gouffre de Padirac dans les causses du Quercy car ouverture avec verticalité élevée*)
 - ✓ **Grotte**: cavité souterraine comportant une partie horizontale accessible



Morphologie karstique (dans Renard, 2018)

B. OBSERVATION DE LA DIVERSITE DE MODELE DES PAYSAGES

2. Observation d'un karst



Lapiés d'Innerbergli, Suisse (Wikipédia)



Poljé sur le causse de Sauveterre, Ispagnac, Lozère (Wikipédia)



Gouffre de Padirac, Lot (Wikipédia)



Gorge (canyon), Saint Guilhem le désert, Hérault (S. Dalaine)



Diaclase dans les calcaires et dolomies, Saint Guilhem le désert, Hérault (S. Dalaine)



Grotte de Clamouse, Hérault (S. Dalaine)

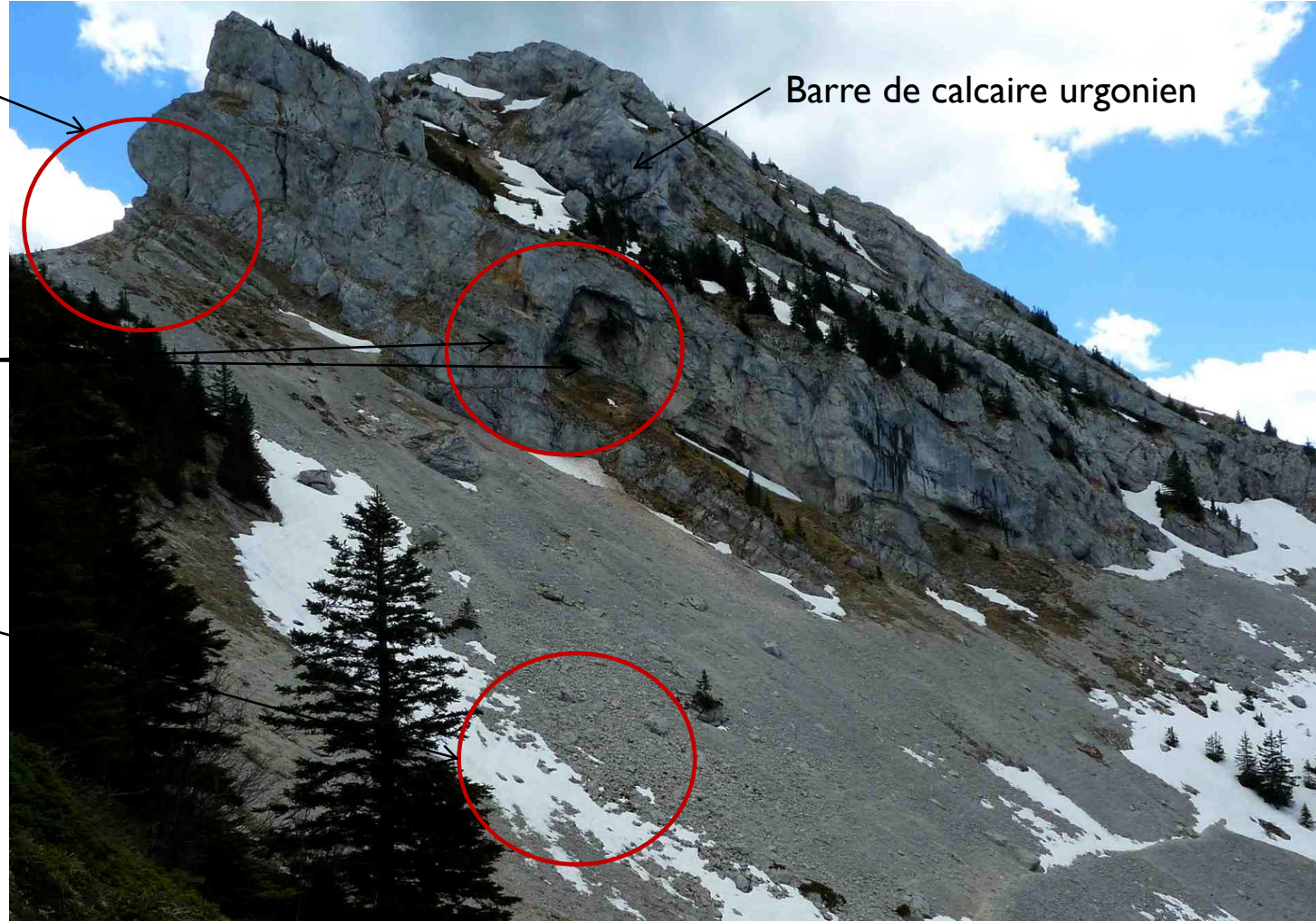


Résurgence du Lison, Jura (Wikipédia)

**Alternance
marno-calcaire :
érosion
différentielle**

Ancienne grotte :
2 conduits

éboulis

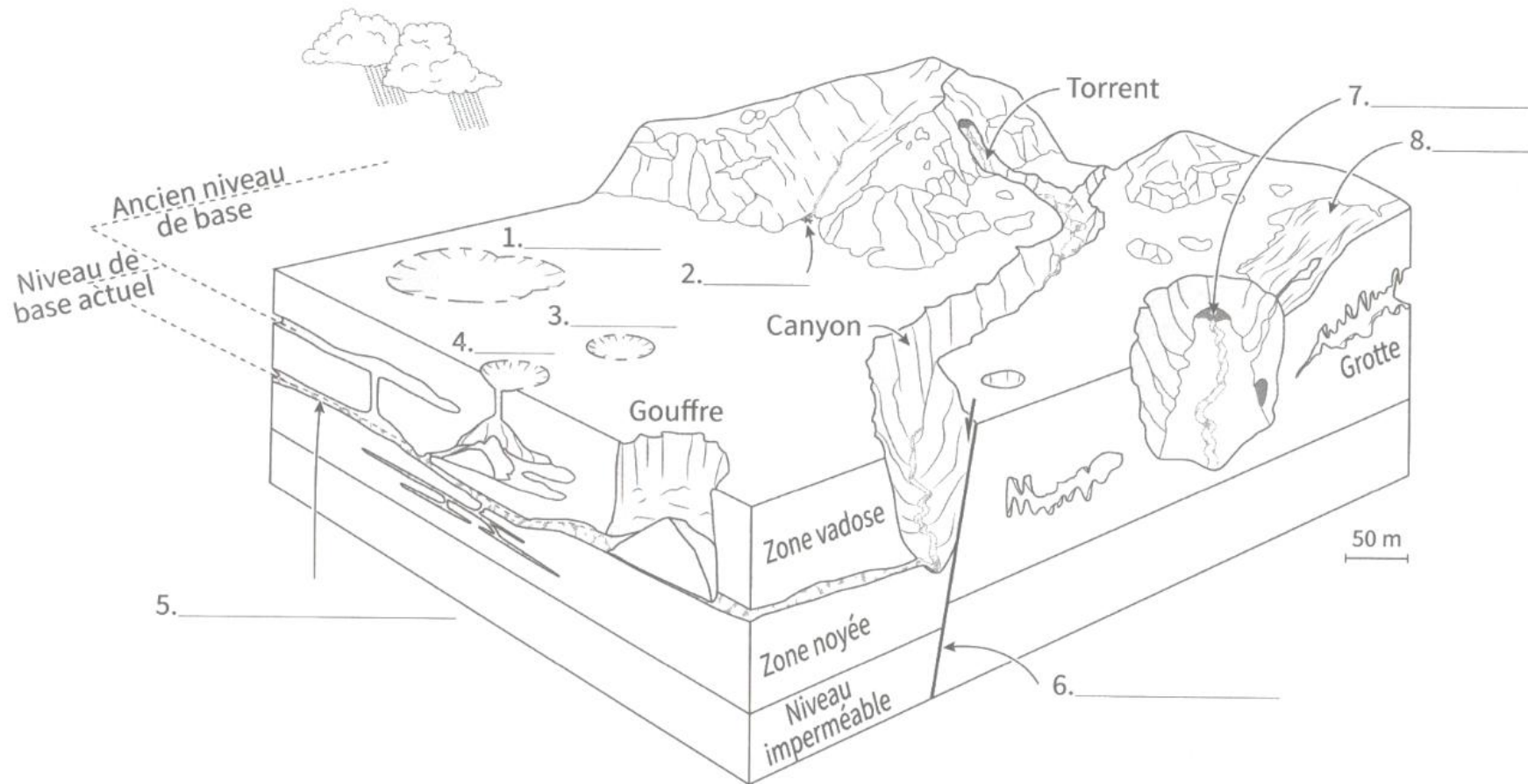


Barre de calcaire urgonien

Col de l'Arc, crête orientale du Vercors (Céline Mémeteau)

B. OBSERVATION DE LA DIVERSITE DE MODELE DES PAYSAGES

2. Observation d'un karst



1. Poljé (fond argileux → terres fertiles)
2. Vallée sèche
3. Doline
4. Aven
5. Rivière souterraine
6. Faille normale
7. Résurgence
8. Lapiés

B. OBSERVATION DE LA DIVERSITE DE MODELE DES PAYSAGES

2. Observation d'un karst



Saint Guilhem le désert, Hérault (S. Dalaine)



Barre urgonienne du Vercors (S. Dalaine)



*Karst à tourelle de la baie d'Along, Vietnam
(Wikipédia)*

- grande diversité des karsts selon le climat (succession de plateaux calcaires érodés par l'eau)
- $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$
 - Si climat très humide
⇒ dissolution forte
 - Si \nearrow pression partielle de CO_2
⇒ dissolution forte
 - Si \searrow température $\Rightarrow \nearrow$ solubilité du CO_2
⇒ dissolution forte

PLAN: CHAPITRE ST-E-I : MODELÉS DES PAYSAGES ET TRANSFERTS DE MATÉRIAUX EN SURFACE I

- I. Facteurs à l'origine du modelé des paysages : altération physique et chimique**
- A. Etude d'un exemple, le paysage de cuesta à l'Est du Bassin parisien**
- B. Observation de la diversité de modelé des paysages**
 - 1. Observation d'un granite altéré
 - 2. Observation d'un karst
- C. les 3 facteurs à l'origine du modelé du paysage**
- D. L'altération physique des roches, les agents de la désagrégation mécanique des roches**
 - 1. Effets de la température : thermoclastie et cryoclastie
 - 2. Mécanismes dépendant de la gravité
 - 3. L'action de l'eau à l'état solide : exemple des glaciers
 - 4. autres agents de désagrégation mécanique
 - 5. Les conséquences de ces facteurs d'altération varient selon ...
- E. L'altération chimique des roches**
- F. La dissolution des carbonates**
 - 1. L'altération des roches silicatées, exemple du granite, une altération par hydrolyse
 - 2. L'hydrolyse des silicates par l'eau
- II. De l'érosion au transport des particules/solutés**
- A. Diversité des modes et agents de transports**
 - 1. Transport sous forme dissoute
 - 2. Transport en suspension
 - 3. Transport en masse
- B. Cas du transport des solutés : importance du substrat des bassins versants**
- C. Cas du transport des particules**



C. LES 3 FACTEURS A L'ORIGINE DU MODELE DU PAYSAGE

- Nature des roches (lithologie)
- Structures géologiques (diaclyse, plis, failles, chevauchements)
- Climat = $f(T^{\circ}\text{C}, \text{pluie}, \text{altitude})$



Érosion
différentielle



Hoodoos, Bryce Canyon, Utah (S. Dalaine) 41

PLAN: CHAPITRE ST-E-I : MODELÉS DES PAYSAGES ET TRANSFERTS DE MATÉRIAUX EN SURFACE I

- I. Facteurs à l'origine du modelé des paysages : altération physique et chimique**
- A. Etude d'un exemple, le paysage de cuesta à l'Est du Bassin parisien**
- B. Observation de la diversité de modelé des paysages**
 - 1. Observation d'un granite altéré
 - 2. Observation d'un karst
- C. les 3 facteurs à l'origine du modelé du paysage**
- D. L'altération physique des roches, les agents de la désagrégation mécanique des roches**
 - 1. Effets de la température : thermoclastie et cryoclastie
 - 2. Mécanismes dépendant de la gravité
 - 3. L'action de l'eau à l'état solide : exemple des glaciers
 - 4. autres agents de désagrégation mécanique
 - 5. Les conséquences de ces facteurs d'altération varient selon ...
- E. L'altération chimique des roches**
- F. La dissolution des carbonates**
 - 1. L'altération des roches silicatées, exemple du granite, une altération par hydrolyse
 - 2. L'hydrolyse des silicates par l'eau
- II. De l'érosion au transport des particules/solutés**
- A. Diversité des modes et agents de transports**
 - 1. Transport sous forme dissoute
 - 2. Transport en suspension
 - 3. Transport en masse
- B. Cas du transport des solutés : importance du substrat des bassins versants**
- C. Cas du transport des particules**

D. L'ALTERATION PHYSIQUE DES ROCHES, LES AGENTS DE LA DESAGREGATION MECANIQUE DES ROCHES

I. Effets de la température : thermoclastie et cryoclastie



- Falaise de grès du canyon Bryce (Utah)
 - Pendant 8 mois de l'année:
 - ✓ T°C moyenne nuit < 0 °C
 - ✓ T°C moyenne jour > 0 °C le jour
 - ⇒ désagrégation mécanique = **thermoclastie**



2 778 mètres d'altitude

Hoodoos, Bryce Canyon, Utah (S. Dalaine)

D. L'ALTERATION PHYSIQUE DES ROCHES, LES AGENTS DE LA DESAGREGATION MECANIQUE DES ROCHES

I. Effets de la température : thermoclastie et cryoclastie

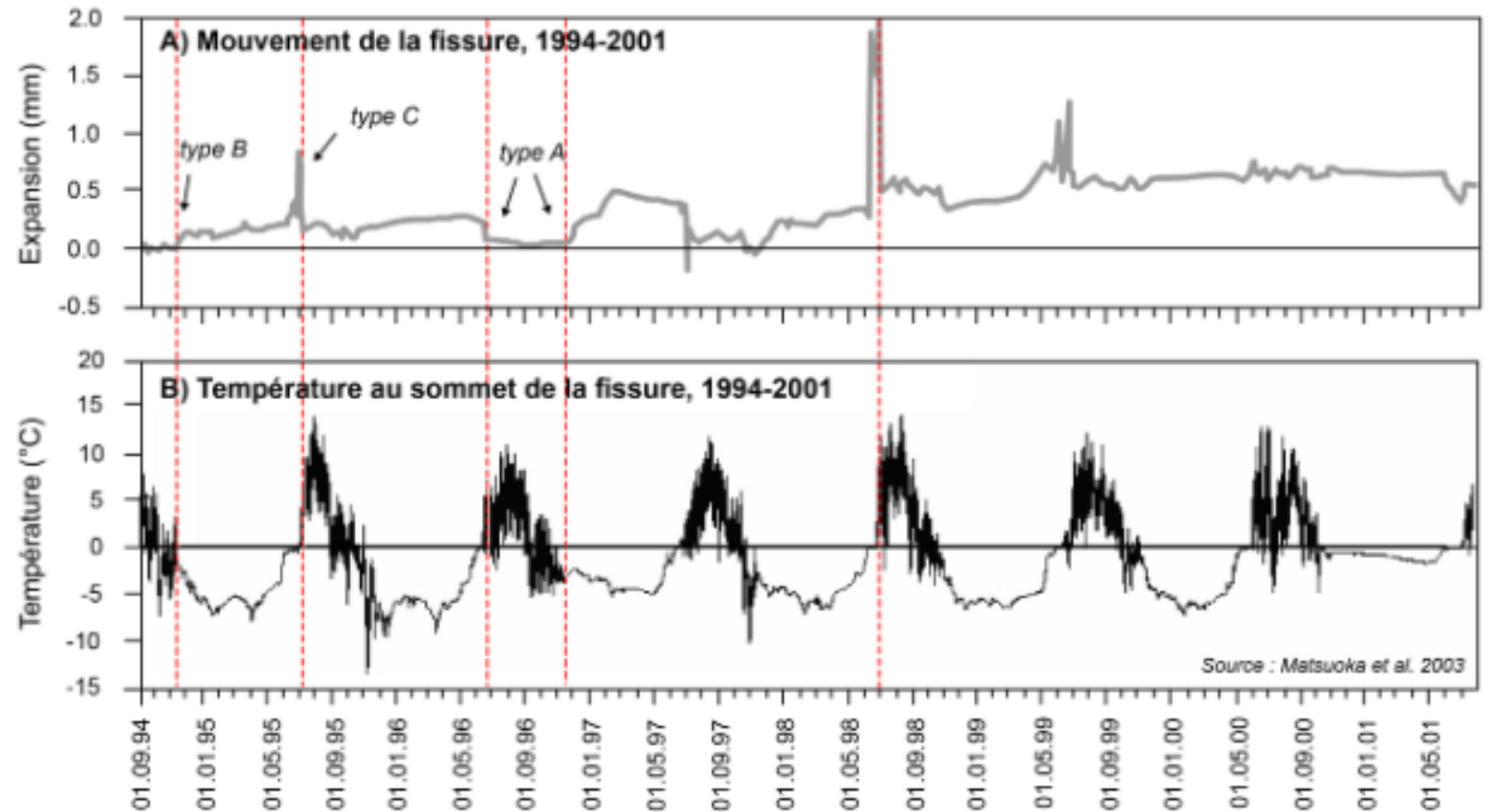


Trois types d'ouverture de fissures A: cycle journalier gel-dégel B: début du gel hivernal C: regel des eaux de fonte au printemps

- En montagne, désagrégation mécanique due à la **cryoclastie** (geler à pierre fendre):

- Cycles diurnes de gel-dégel (A)
- Gel saisonnier du début hiver (B)
- Regel des eaux de fonte de la neige (C)

✓ *apport de beaucoup d'eau permet la formation d'une grande quantité de glace ⇒ Ouverture importante de la fissure*



Ouverture de petites fissures dans une paroi rocheuse du Mürtel (Engadine, GR).

D. L'ALTERATION PHYSIQUE DES ROCHES, LES AGENTS DE LA DESAGREGATION MECANIQUE DES ROCHES

I. Effets de la température : thermoclastie et cryoclastie



■ Thermoclastie : canyon

- variations de $T^{\circ}\text{C}$ (diurne-nocturne = 50°C dans les déserts)
⇒ dilatation / contraction différentielle des minéraux = thermoclastie.
- Remarque : ce mécanisme est utilisé par les paléontologues pour extraire les fossiles des roches.



Canyon de Chelly, Arizona (S. Dalaine)



Mont Tenibre, 3031 m, Mercantour (S. Dalaine)

■ Cryoclastie : montagne

- Passage de l'état liquide à l'état solide ⇒ \nearrow Volume de l'eau $\sim 10\%$.
- Alternances gel-dégel ⇒ dissociation de la roche en phases de plus en plus petites = **cryoclastie**

✓ Geler à pierre fendre

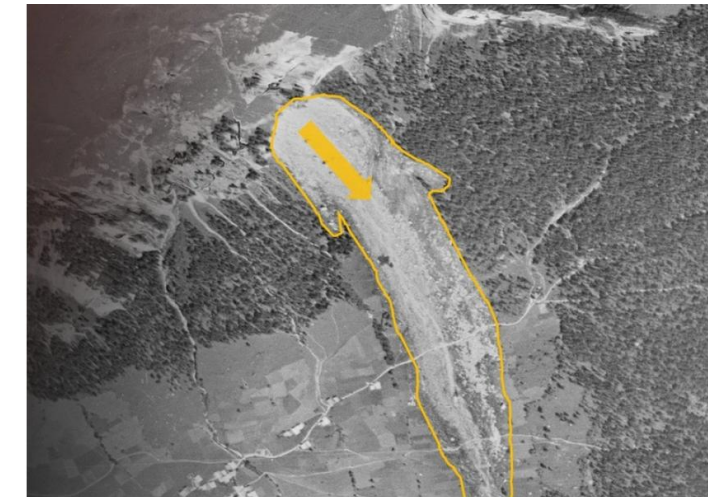
PLAN: CHAPITRE ST-E-I : MODELÉS DES PAYSAGES ET TRANSFERTS DE MATÉRIAUX EN SURFACE I

- I. Facteurs à l'origine du modelé des paysages : altération physique et chimique**
- A. Etude d'un exemple, le paysage de cuesta à l'Est du Bassin parisien**
- B. Observation de la diversité de modelé des paysages**
 - 1. Observation d'un granite altéré
 - 2. Observation d'un karst
- C. les 3 facteurs à l'origine du modelé du paysage**
- D. L'altération physique des roches, les agents de la désagrégation mécanique des roches**
 - 1. Effets de la température : thermoclastie et cryoclastie
 - 2. Mécanismes dépendant de la gravité
 - 3. L'action de l'eau à l'état solide : exemple des glaciers
 - 4. autres agents de désagrégation mécanique
 - 5. Les conséquences de ces facteurs d'altération varient selon ...
- E. L'altération chimique des roches**
- F. La dissolution des carbonates**
 - 1. L'altération des roches silicatées, exemple du granite, une altération par hydrolyse
 - 2. L'hydrolyse des silicates par l'eau
- II. De l'érosion au transport des particules/solutés**
- A. Diversité des modes et agents de transports**
 - 1. Transport sous forme dissoute
 - 2. Transport en suspension
 - 3. Transport en masse
- B. Cas du transport des solutés : importance du substrat des bassins versants**
- C. Cas du transport des particules**

D. L'ALTERATION PHYSIQUE DES ROCHES, LES AGENTS DE LA DESAGREGATION MECANIQUE DES ROCHES

2. Mécanismes dépendant de la gravité

- **éboulis** : résultent de dissociations suivies de déplacements désordonnés par simple gravité de blocs rocheux métriques
- **Eroulements en masse ou éboulement**
 1. existence d'un surplomb
 2. élargissement de diaclases ou de joints de stratification
 3. Détachement: glissement de terrain = solifluxion
 - éboulements parfois catastrophiques



Le glissement de terrain de Fidaz (Suisse), 10 avril 1939

D. L'ALTERATION PHYSIQUE DES ROCHES, LES AGENTS DE LA DESAGREGATION MECANIQUE DES ROCHES

2. Mécanismes dépendant de la gravité

- Le glacier du Birch sous surveillance en 1993 à la suite d'une avalanche.
- Avancement de la langue de Birch d'env 50 m depuis 5 ans
 - poids des matériaux qui y tombent fréquemment
 - Accélération par fonte du pergélisol

Modélisation en 3D de l'effondrement du glacier du Birch, vu par le satellite Sentinel-2.



*Glacier de Birch, 9 jours avant son effondrement
May 19, 2025, 3:16 p.m. Wikipédia*

PLAN: CHAPITRE ST-E-I : MODELÉS DES PAYSAGES ET TRANSFERTS DE MATÉRIAUX EN SURFACE I

- I. Facteurs à l'origine du modelé des paysages : altération physique et chimique**
 - A. Etude d'un exemple, le paysage de cuesta à l'Est du Bassin parisien**
 - B. Observation de la diversité de modelé des paysages**
 - 1. Observation d'un granite altéré
 - 2. Observation d'un karst
 - C. les 3 facteurs à l'origine du modelé du paysage**
 - D. L'altération physique des roches, les agents de la désagrégation mécanique des roches**
 - 1. Effets de la température : thermoclastie et cryoclastie
 - 2. Mécanismes dépendant de la gravité
 - 3. L'action de l'eau à l'état solide : exemple des glaciers
 - 4. autres agents de désagrégation mécanique
 - 5. Les conséquences de ces facteurs d'altération varient selon ...
 - E. L'altération chimique des roches**
 - F. La dissolution des carbonates**
 - 1. L'altération des roches silicatées, exemple du granite, une altération par hydrolyse
 - 2. L'hydrolyse des silicates par l'eau
- II. De l'érosion au transport des particules/solutés**
 - A. Diversité des modes et agents de transports**
 - 1. Transport sous forme dissoute
 - 2. Transport en suspension
 - 3. Transport en masse
 - B. Cas du transport des solutés : importance du substrat des bassins versants**
 - C. Cas du transport des particules**

D. L'ALTERATION PHYSIQUE DES ROCHES, LES AGENTS DE LA DESAGREGATION MECANIQUE DES ROCHES

3. L'action de l'eau à l'état solide: exemple des glaciers



- **Glace: solide visqueux** (donc résistance à déformation est fonction de la vitesse! Cf ST-D)= langue glaciaire
 - Déplacement selon sa masse
 - Déplacement selon topographie
 - Vitesse d'écoulement:
 - ✓ 30m/j (rapides)
 - ✓ 0m/j (zone centrale des inlandsis)
 - ✓ **Sérac**: dépassement du seuil de plasticité de glace dû forte pente → rupture: blocs de glace fracturés indices d'une rupture de pente
 - Désagrégation mécanique du substratum rocheux et déplacement = facteur d'érosion
 - ✓ **Cirque glaciaire, roches moutonnées, vallée en auge (en U), stries**
 - ✓ Résistance à l'érosion variable du substratum: **verrou (lac d'ombilic), épaulement**
 - ✓ Dépôts glaciaires: **moraines** (de fond, latérales, médiales, frontales)

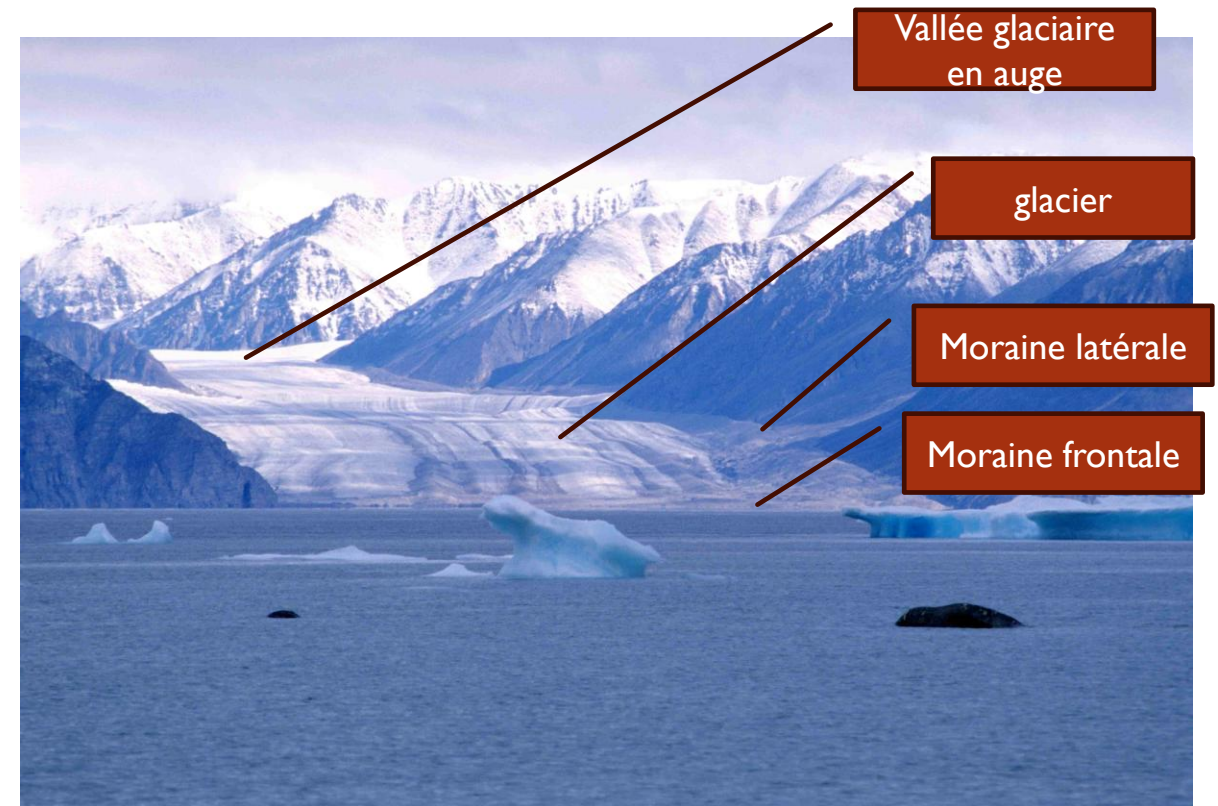


- 1: Cirque collecteur
- 2: Zone de séracs
- 3: Langue ou diffuseur
- 4: Moraine latérale
- 5: Zone d'ablation
- 6: Moraine frontale
- 7: Lac proglaciaire (vêlage de la langue glaciaire)
- 8: Torrent glaciaire
- 9: Plaine d'épandage proglaciaire

D. L'ALTERATION PHYSIQUE DES ROCHES, LES AGENTS DE LA DESAGREGATION MECANIQUE DES ROCHES

3. L'action de l'eau à l'état solide: exemple des glaciers

- **Modelé glaciaire** : formes du relief façonnées par le **creusement des glaciers** ou édifiées par des dépôts qui leur sont liés.
 - **Cirque glaciaire** : simple dépression ayant contenu un glacier suspendu (formé en hauteur, sur pente)
 - **Vallée glaciaire** : creusement de la vallée par la glace → forme en « U » = **auge glaciaire**
 - **Verrous glaciaires** : surélévations causées par la présence de roches plus résistantes, après la fonte des glaciers
 - ⇒ Barrent la vallée
 - ⇒ retiennent souvent les eaux d'un lac qui laisse une trace sous forme de plaine d'alluvions.
 - A noter : la marque du glacier est visible sur les roches de son substratum qui sont **moutonnées** (arrondies par le frottement) ou **cannelées** ou encore **striées** par les **cailloux entraînés par la glace**.



Kaparoqtaalik Glacier (southern coast of Bylot Island at Pond Inlet, Sirmilik National Park, Canada)(Wikipédia)

D. L'ALTERATION PHYSIQUE DES ROCHES, LES AGENTS DE LA DESAGREGATION MECANIQUE DES ROCHES

3. L'action de l'eau à l'état solide: exemple des glaciers

■ **Modelé glaciaire** : formes du relief façonnées par le **creusement des glaciers** ou édifiées par des dépôts qui leur sont liés.

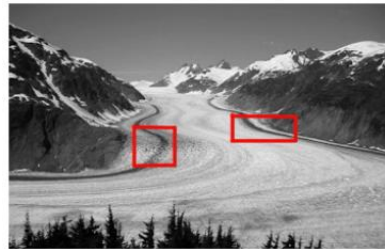
➤ **moraine**: amas de débris rocheux **érodé** et **transporté** par un glacier

✓ **Moraine latérale**: sur le bord de la vallée

✓ **Moraine de fond**: peuvent donner des collines allongées dans le sens d'écoulement de la glace: drumlins

✓ **Moraine frontale**: colline en croissant vers l'amont (vallum) marquant limite max d'un stade antérieur

✓ **Moraine médiane**: née de la fusion de deux glaciers (donc matériaux issus des deux moraines latérales)



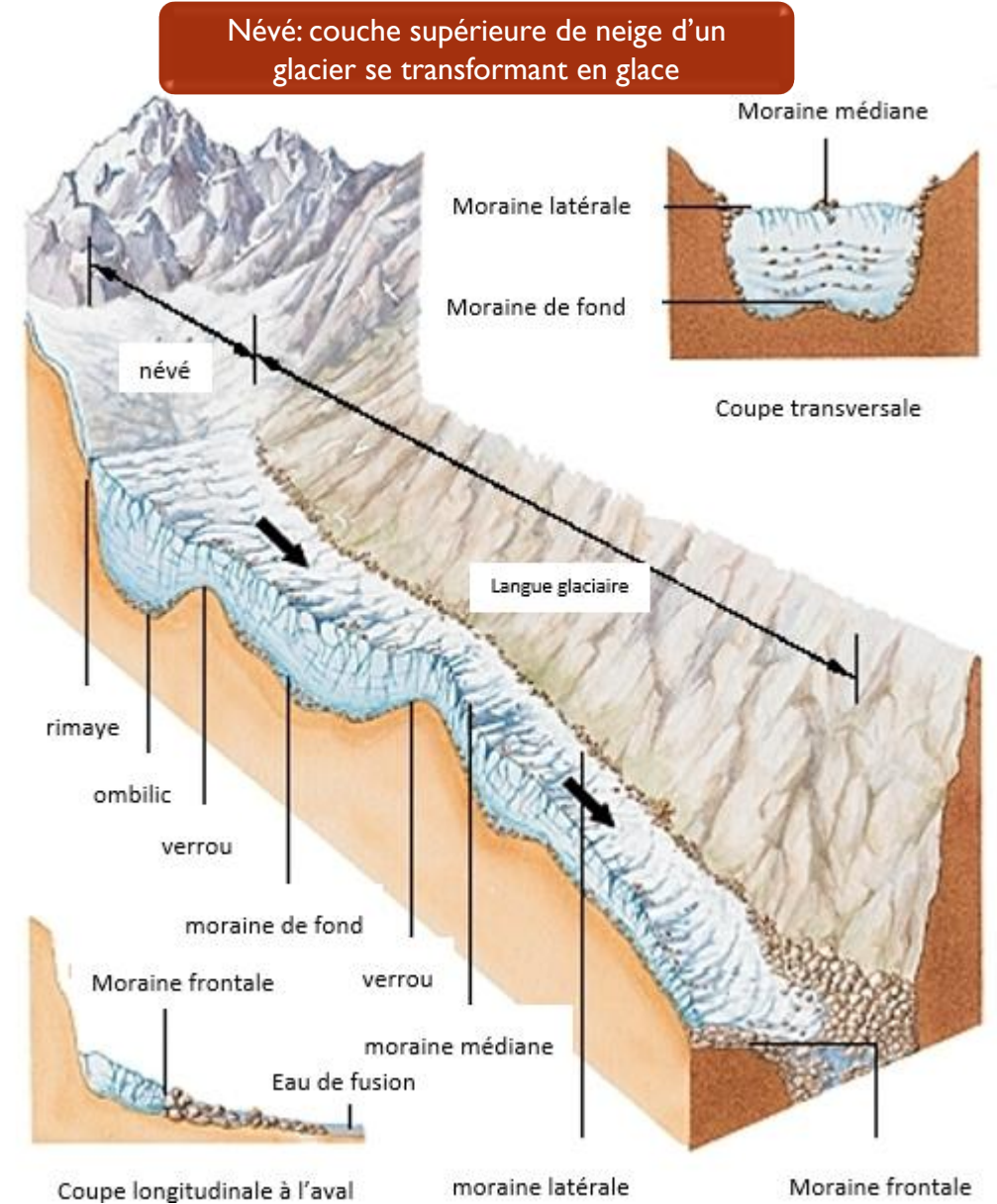
Moraines latérales



Moraine médiane



Moraine frontale



Coupes longitudinale et transversale d'un glacier de vallée.
Dessin Chantal Beaumont - Archives Larousse

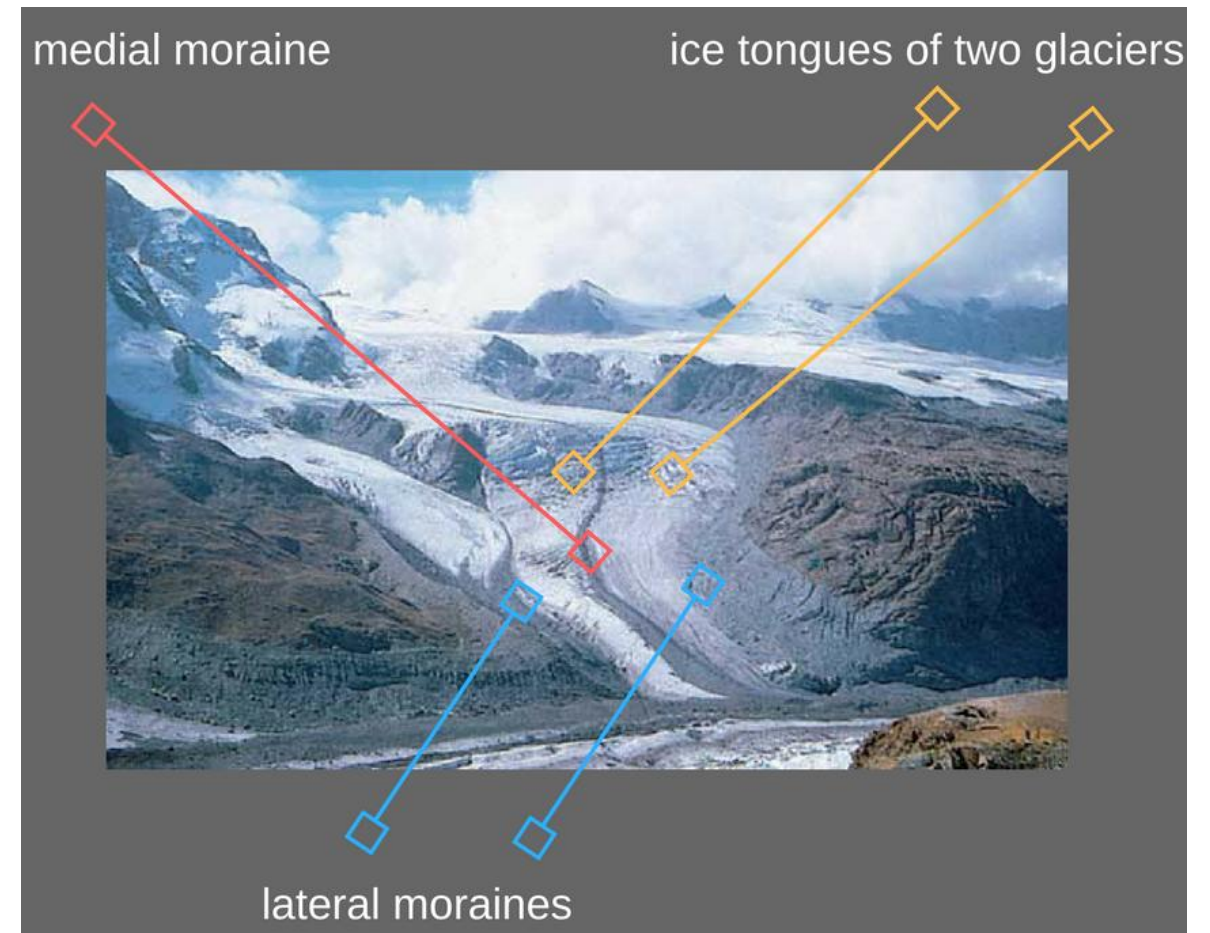
D. L'ALTERATION PHYSIQUE DES ROCHES, LES AGENTS DE LA DESAGREGATION MECANIQUE DES ROCHES

3. L'action de l'eau à l'état solide: exemple des glaciers

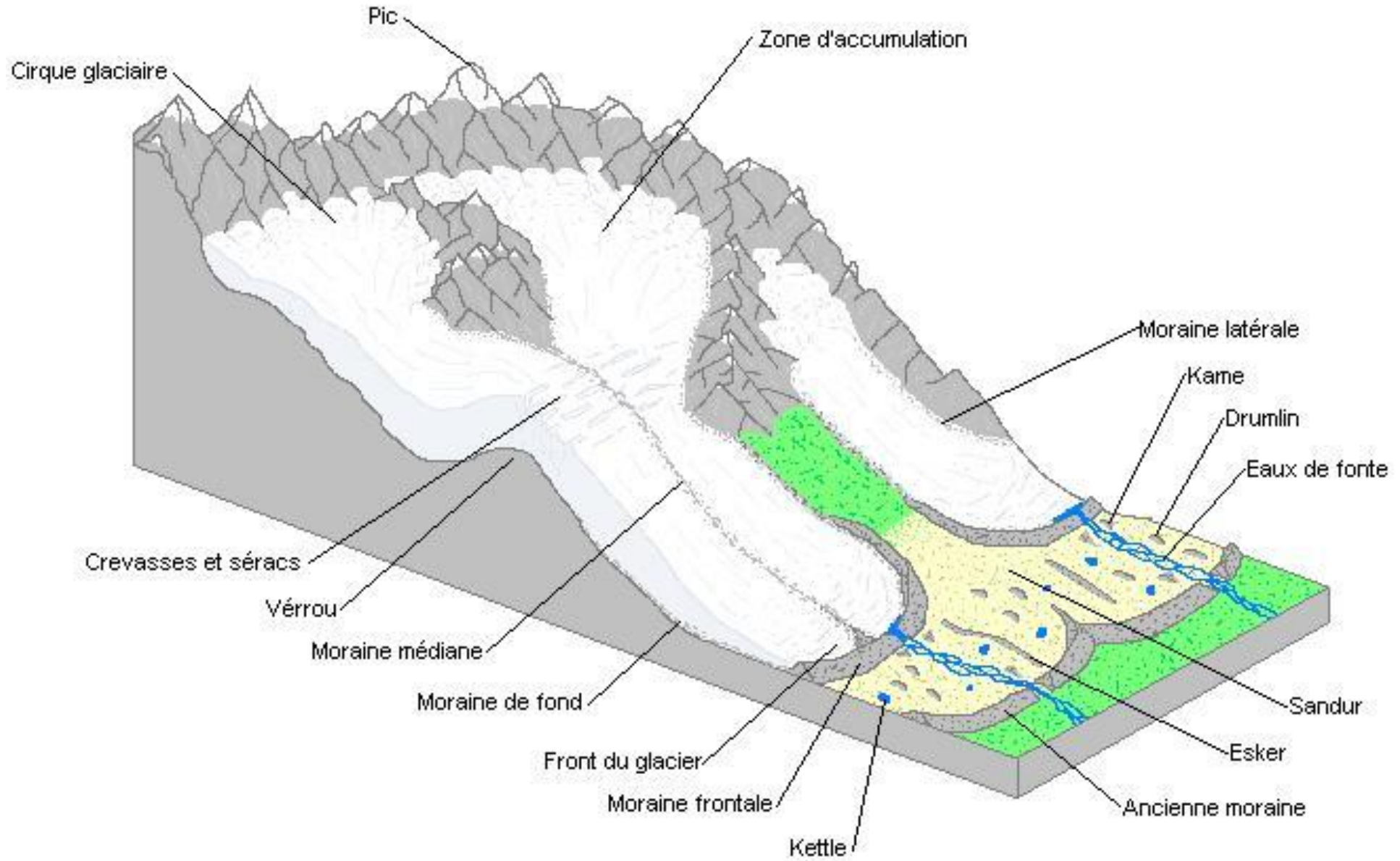
- **Modelé glaciaire** : formes du relief façonnées par le creusement des glaciers ou édifiées par des dépôts qui leur sont liés.

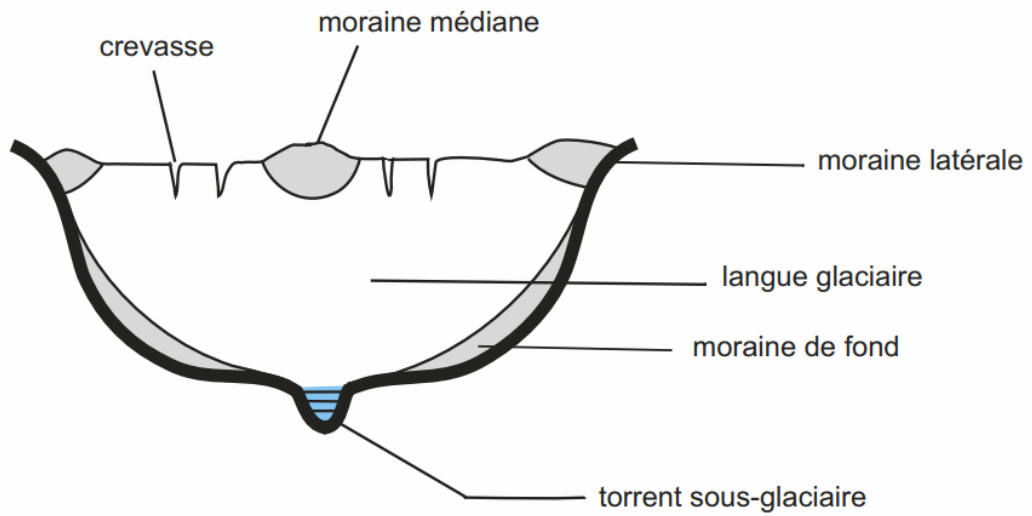
➤ **moraine**: amas de débris rocheux érodé et transporté par un glacier

- ✓ **Moraine latérale**: sur le bord de la vallée
- ✓ **Moraine de fond**: peuvent donner des collines allongées dans le sens d'écoulement de la glace: drumlins
- ✓ **Moraine frontale**: colline en croissant vers l'amont (vallum) marquant limite max d'un stade antérieur
- ✓ **Moraine médiane**: née de la fusion de deux glaciers (donc matériaux issus des deux moraines latérales)

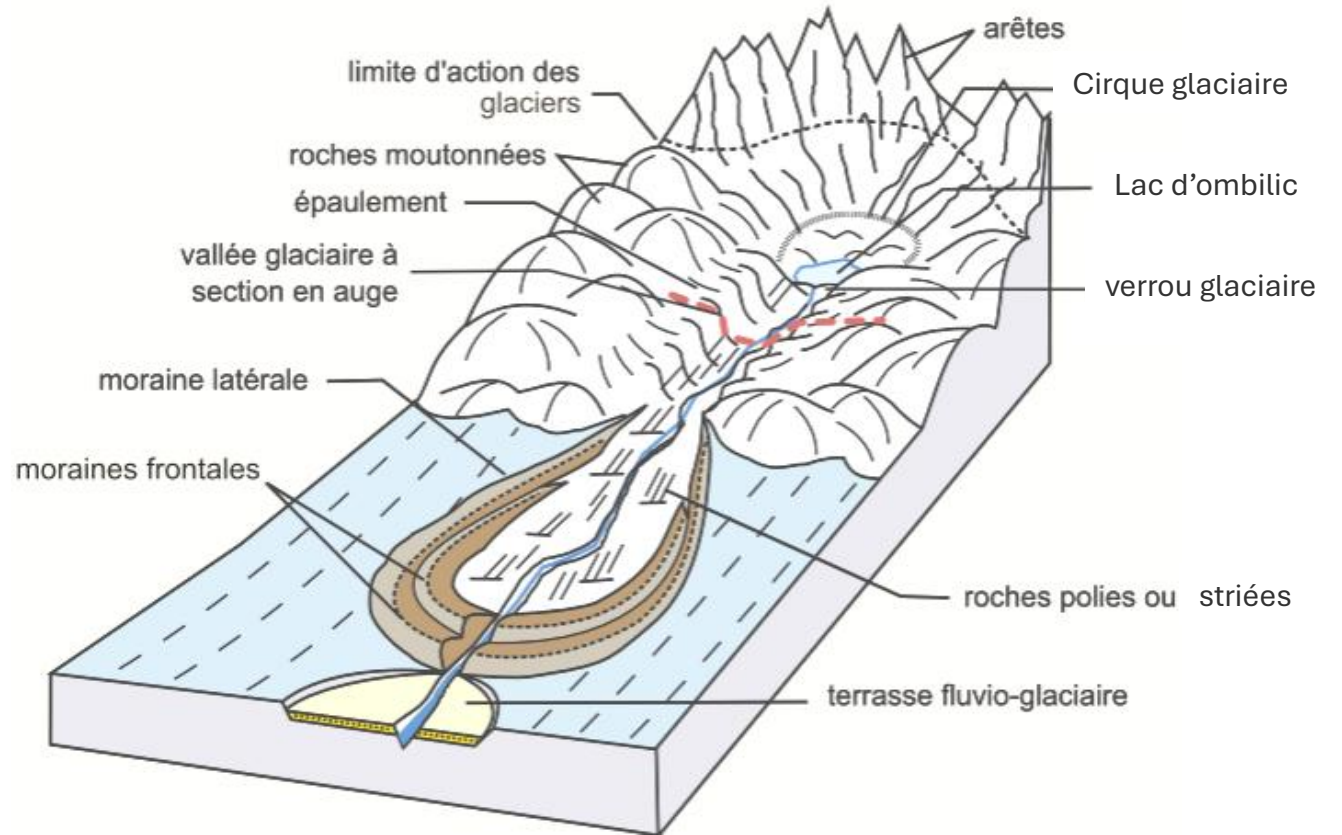


<https://polarpedia.eu/fr/la-moraine-mediale/>





Une vallée glaciaire en coupe

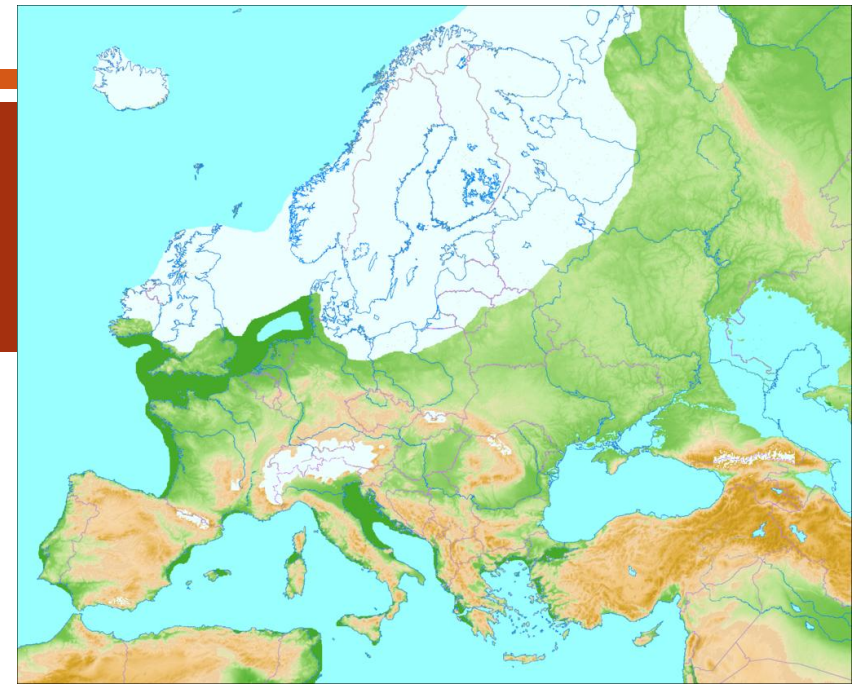


Modèle glaciaire

D. L'ALTERATION PHYSIQUE DES ROCHES, LES AGENTS DE LA DESAGREGATION MECANIQUE DES ROCHES

3. L'action de l'eau à l'état solide: exemple des glaciers

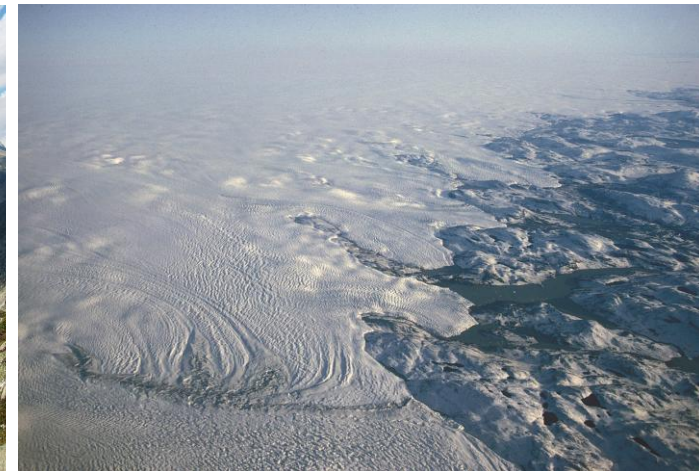
- Quaternaire (62,6 Ma-actuel): **succession de périodes glaciaires et interglaciaires**
 - ✓ Actuellement période interglaciaire
 - Quatre périodes glaciaires dans les Alpes (*noms de rivières Bavaroises*).
 - ✓ **Günz**: -760 000 à -530 000 ans
 - ✓ **Mindel**: -650 000 à -350 000 ans
 - ✓ **Riss**: -300 000 à -130 000 ans
 - ✓ **Würm**: -70 000 à -16 000 ans
- Différents types de glaciers :
 - **glaciers de type alpin** : < quelques dizaines de km de long (le plus long = glacier d'Hubbard en Alaska : 120km)
 - **inlandsis** : Groenland (calotte de 1 600 000 km²) et Antarctique. **Glacier** qui recouvre entièrement les reliefs et dont la glace est stratifiée (intéressant dans le cadre des forages : utilisation pour $\delta^{18}\text{O}$)



L'Europe au dernier maximum glaciaire, il y a environ **21 000 ans**. (Wikipédia)



Le glacier d'Aletsch (Suisse), le plus grand glacier des Alpes. (Wikipédia)



Vue aérienne de la bordure orientale de l'inlandsis du Groenland produisant des courants glaciaires se déversant dans des fjords (Wikipédia) 56

D. L'ALTERATION PHYSIQUE DES ROCHES, LES AGENTS DE LA DESAGREGATION MECANIQUE DES ROCHES

3. L'action de l'eau à l'état solide: exemple des glaciers

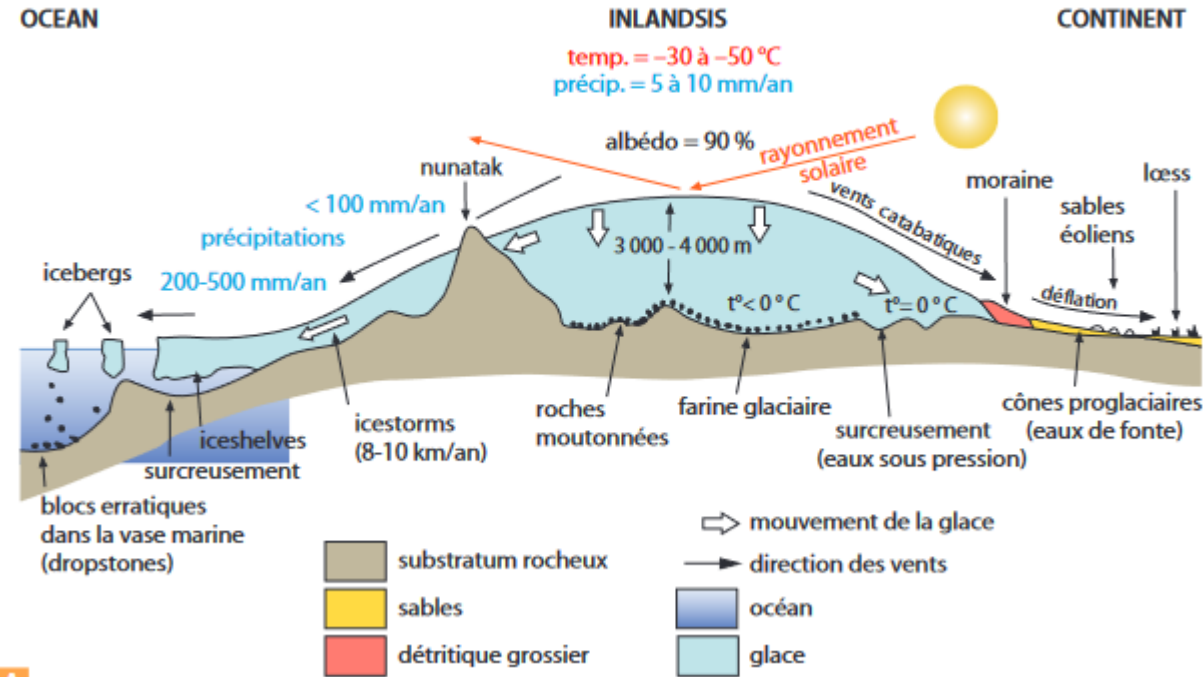
A. Schéma représentant la dynamique d'un **inlandsis**: son développement dépend de conditions climatiques particulières (continentalité, températures, précipitations, vents) qui imposent sa forme et son extension. Celles-ci, à leur tour, définissent les conditions d'écoulement de la glace, d'érosion du substratum et de transport de la charge détritique, qui sont très différentes lorsque les glaces se déplacent vers l'océan (à gauche) ou vers une bordure continentale (à droite).

*Albedo: pourcentage de lumière solaire réfléchi

*Vents catabatiques: vents à composante verticale descendante

* lœss: dépôt sédimentaire détritique très fin (limons: taille entre sable et argile ie entre 2 et 63 μm) issu de l'érosion éolienne

B. L'inlandsis de l'Antarctique: la topographie est presque totalement ennoyée sous la glace de la calotte Est Antarctique. On distingue cependant le réseau de profondes vallées servant à l'écoulement de la glace dont l'épaisseur peut atteindre 2 à 3 km (photo N. Le Moigne, Géosciences Montpellier)



A



B

PLAN: CHAPITRE ST-E-I : MODELÉS DES PAYSAGES ET TRANSFERTS DE MATÉRIAUX EN SURFACE I

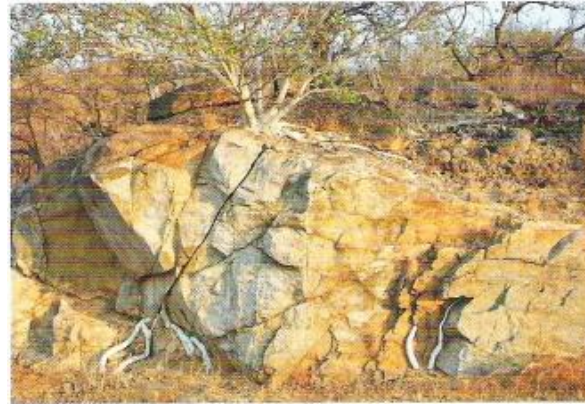
- I. Facteurs à l'origine du modelé des paysages : altération physique et chimique**
- A. Etude d'un exemple, le paysage de cuesta à l'Est du Bassin parisien**
- B. Observation de la diversité de modelé des paysages**
 - 1. Observation d'un granite altéré
 - 2. Observation d'un karst
- C. les 3 facteurs à l'origine du modelé du paysage**
- D. L'altération physique des roches, les agents de la désagrégation mécanique des roches**
 - 1. Effets de la température : thermoclastie et cryoclastie
 - 2. Mécanismes dépendant de la gravité
 - 3. L'action de l'eau à l'état solide : exemple des glaciers
 - 4. autres agents de désagrégation mécanique
 - 5. Les conséquences de ces facteurs d'altération varient selon ...
- E. L'altération chimique des roches**
- F. La dissolution des carbonates**
 - 1. L'altération des roches silicatées, exemple du granite, une altération par hydrolyse
 - 2. L'hydrolyse des silicates par l'eau
- II. De l'érosion au transport des particules/solutés**
- A. Diversité des modes et agents de transports**
 - 1. Transport sous forme dissoute
 - 2. Transport en suspension
 - 3. Transport en masse
- B. Cas du transport des solutés : importance du substrat des bassins versants**
- C. Cas du transport des particules**

D. L'ALTERATION PHYSIQUE DES ROCHES, LES AGENTS DE LA DESAGREGATION MECANIQUE DES ROCHES



4. Autres agents de désagrégation mécanique

- **Bioclastie:** racines des végétaux
- **Haloclastie** (cristallisation de sel dans fissures)
- Hydratation des minéraux
- Volcanisme explosif



Développement des racines agrandissement des fissures → désagrégation mécanique
Acidification de roche par racines (pompe à protons) → Altération chimique (bordas, TaleS, ed.2012, p212)



Mont Sibayak (Sumatra): désagrégation mécanique par éruptions volcaniques (S. Dalaine)



Lac Toba (Sumatra): éruption phréatomagmatique - 73 000 ans contact eau-lave → choc thermique → ↑ pression interne du volcan → explosivité forte (S. Dalaine)

haloclastie : la solution saline (eau salée) s'infiltré dans les fissures et s'évapore, déposant des cristaux de sel. Lorsque les roches sont ensuite chauffées, les cristaux se dilatent en exerçant une pression sur la roche environnante qui, avec le temps, éclatera la pierre en fragments.



PLAN: CHAPITRE ST-E-I : MODELÉS DES PAYSAGES ET TRANSFERTS DE MATÉRIAUX EN SURFACE I

- I. Facteurs à l'origine du modelé des paysages : altération physique et chimique**
- A. Etude d'un exemple, le paysage de cuesta à l'Est du Bassin parisien**
- B. Observation de la diversité de modelé des paysages**
 - 1. Observation d'un granite altéré
 - 2. Observation d'un karst
- C. les 3 facteurs à l'origine du modelé du paysage**
- D. L'altération physique des roches, les agents de la désagrégation mécanique des roches**
 - 1. Effets de la température : thermoclastie et cryoclastie
 - 2. Mécanismes dépendant de la gravité
 - 3. L'action de l'eau à l'état solide : exemple des glaciers
 - 4. autres agents de désagrégation mécanique
 - 5. Les conséquences de ces facteurs d'altération varient selon ...
- E. L'altération chimique des roches**
- F. La dissolution des carbonates**
 - 1. L'altération des roches silicatées, exemple du granite, une altération par hydrolyse
 - 2. L'hydrolyse des silicates par l'eau
- II. De l'érosion au transport des particules/solutés**
- A. Diversité des modes et agents de transports**
 - 1. Transport sous forme dissoute
 - 2. Transport en suspension
 - 3. Transport en masse
- B. Cas du transport des solutés : importance du substrat des bassins versants**
- C. Cas du transport des particules**

D. L'ALTERATION PHYSIQUE DES ROCHES, LES AGENTS DE LA DESAGREGATION MECANIQUE DES ROCHES

5. Les conséquences de ces facteurs d'altération varient selon ...

5.1. ... la lithologie

- Toute roche à l'**affleurement** = en **déséquilibre physico-chimique** par rapport à son milieu de formation

⇒ Déséquilibre d'autant plus grand que les conditions de surface éloignées de celle de sa genèse



Neck basaltique au pied du lac du Salagou (S. Dalaine)



Basalte (pléistocène)
bouclier résistant à l'érosion

Neck basaltique (cheminée)

Grès (ruffe) et argiles rouges du permien (latérite)

Panorama du lac du Salagou, Hérault (<https://erasmusplace.com/escapade-insolite-au-lac-du-salagou/>)

- Grès rouge du permien issu de l'érosion de la chaîne hercynienne (rouge oxyde de fer obtenu par altération chimique; latérite)
- Coulée basaltique dans une dépression (pléistocène)
- Erosion affecte plus fortement terrains permien que coulée basaltique
- Basalte en relief sur grès érodés → **inversion de relief**, liée à l'érosion différentielle des terrains grés-argileux et du basalte.

D. L'ALTERATION PHYSIQUE DES ROCHES, LES AGENTS DE LA DESAGREGATION MECANIQUE DES ROCHES

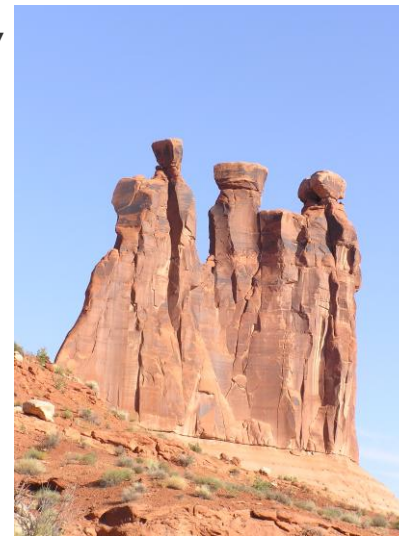
5. Les conséquences de ces facteurs d'altération varient selon ...

5.2. ... l'existence de plans de fragilité

- Relief tabulaire de Monument Valley (Canyon de Chelly): rebord d'une cuesta permo-triasique parcourue de mesa (et buttes témoins): alternance de grès-argiles
 - Érosion des argiles peu résistantes → pentes "douces"
 - **Erosion des grès résistants → falaises verticales**
- Verticalité des falaises de Monument Valley et Canyon de Chelly
 - Grès résistants
 - **Diaclases:** préfacturation → éboulements



Canyonland, verticalité des falaises diaclasées, Utah (diaclases)(S. Dalaine)



Three sisters à Arches Park, Utah (diaclases)(S. Dalaine)



Mesa grès rouge à Monument Valley, Utah (diaclases)(S. Dalaine)



Chaîne hercynienne (comparable en longueur et largeur à Alpes + Himalaya actuels!)

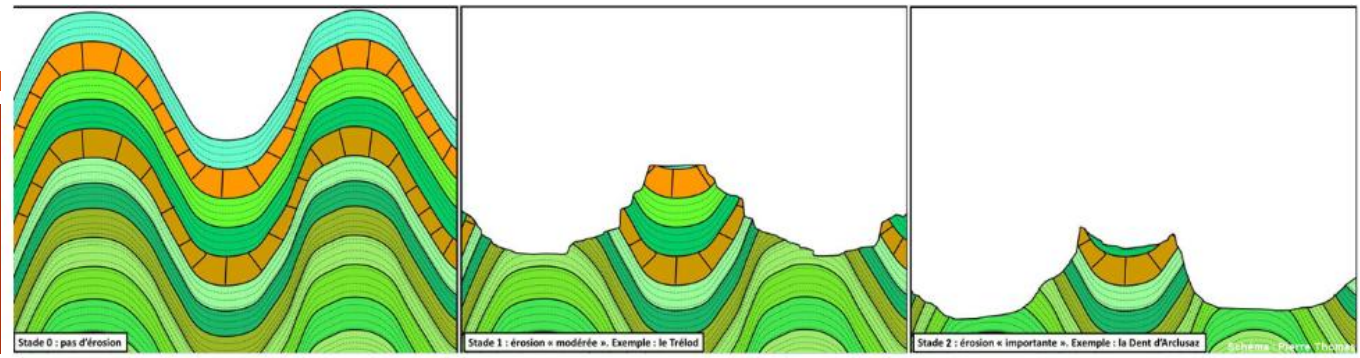
D. L'ALTERATION PHYSIQUE DES ROCHES, LES AGENTS DE LA DESAGREGATION MECANIQUE DES ROCHES

5. Les conséquences de ces facteurs d'altération varient selon ...

5.3. ... le contexte géologique

- En région sédimentaire: disposition des couches
→ paysages

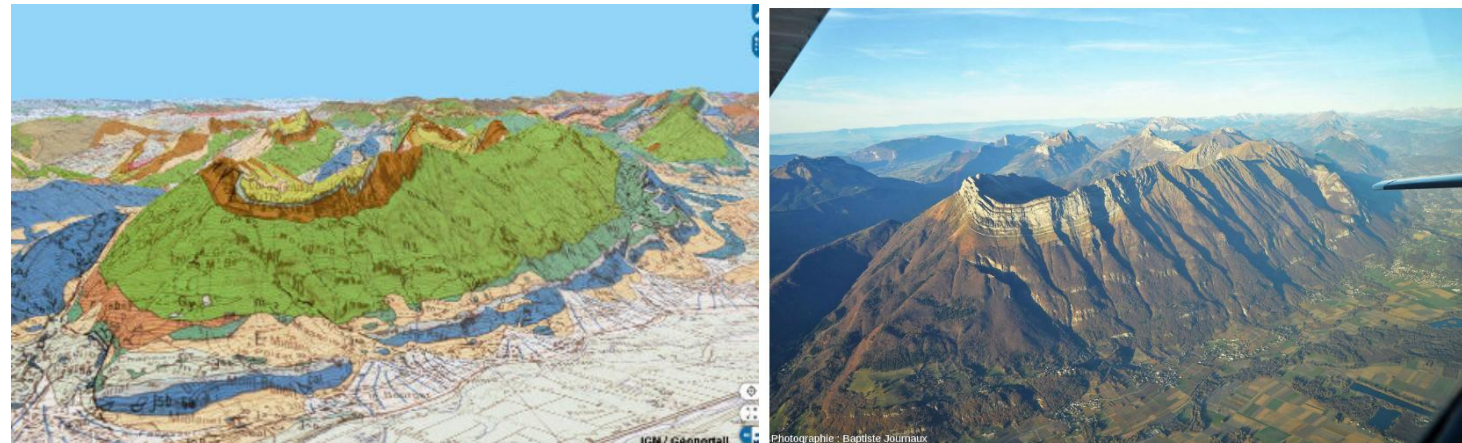
- Régions **tabulaires** (mesa, buttes témoins)
- Régions **monoclinales** (cuestas et des buttes témoins au niveau des strates plus résistantes à l'altération)
- Paysages **plissés** :
 - ✓ **reliefs conformes** : anticlinaux forment des monts et les synclinaux des vaux (cas du relief jurassien)
 - ✓ **reliefs inverses**: synclinaux perchés séparés par des anticlinaux profondément entaillés (cas du relief subalpin)



Au stade 0, on a supposé que la région était constituée d'un empilement de séries marneuses (représenté en vert et bleu) comprenant 2 barres calcaires (marron et orange, avec un figuré en moellon). La série a subi un plissement (supposé non accompagné d'érosion, ce qui est un cas très théorique) générant 2 anticlinaux encadrant un synclinal.

Au stade 1, l'érosion a "attaqué" les reliefs que constituaient les anticlinaux et a transformé les monts anticlinaux en vallées. Au centre du schéma, le synclinal, non érodé, se trouve mis en relief : c'est un synclinal perché. Dans ce schéma, nous avons supposé que les deux barres calcaires avaient été épargnées par l'érosion au niveau du synclinal. Le Trélod correspond à peu près à ce stade 1.

Synclinal perché: pli synclinal porté en altitude par l'érosion différentiel et conduisant à une inversion de relief (Pierre Thomas, ENS-Lyon)



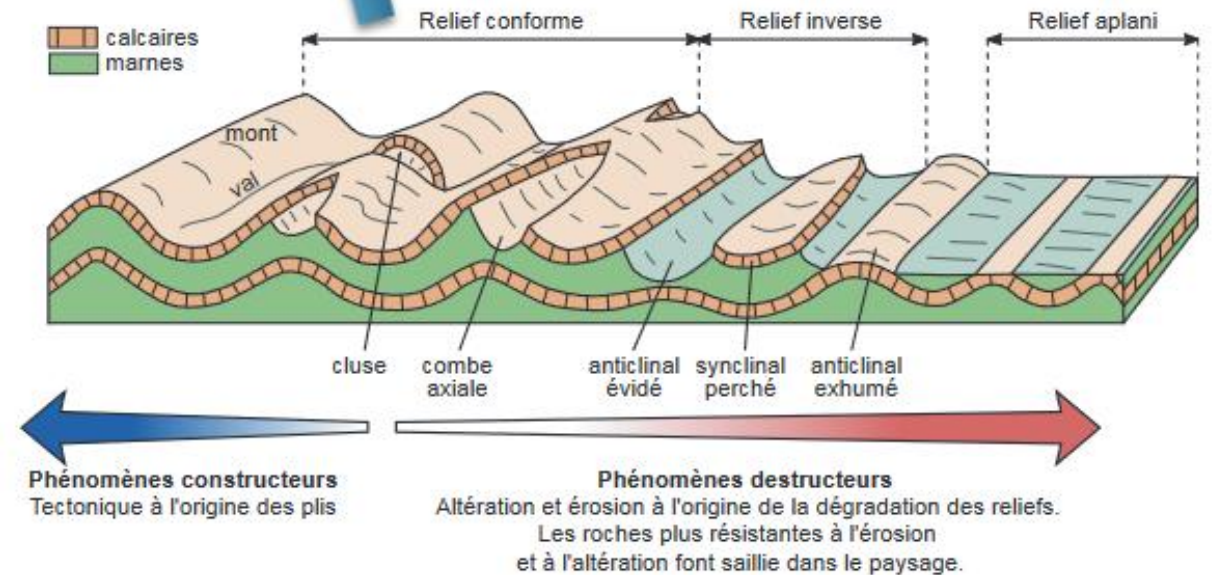
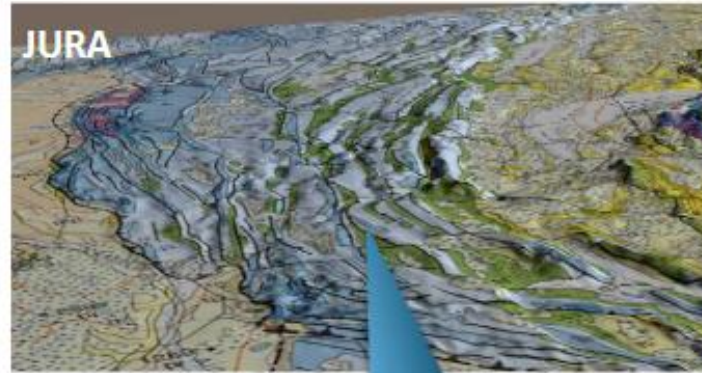
*La Dent d'Arclusaz, 2041 m (Savoie), un parfait exemple de synclinal perché (cf ST-D)
(planet-terre.ens-lyon.fr/)*

D. L'ALTERATION PHYSIQUE DES ROCHES, LES AGENTS DE LA DESAGREGATION MECANIQUE DES ROCHES

5. Les conséquences de ces facteurs d'altération varient selon ...

5.3. ... le contexte géologique

- En région sédimentaire: disposition des couches
→ paysages
 - Régions **tabulaires** (mesa, buttes témoins)
 - Régions **monoclinales** (cuestas et des buttes témoins au niveau des strates plus résistantes à l'altération)
 - Paysages **plissés** :
 - ✓ **reliefs conformes** : anticlinaux forment des monts et les synclinaux des vaux (cas du relief jurassien)
 - ✓ **reliefs inverses**: synclinaux perchés séparés par des anticlinaux profondément entaillés (cas du relief subalpin)



Jura: des reliefs conformes

D. L'ALTERATION PHYSIQUE DES ROCHES, LES AGENTS DE LA DESAGREGATION MECANIQUE DES ROCHES

5. Les conséquences de ces facteurs d'altération varient selon ...

5.4. ... le climat

- dans les zones **sans eau liquide** (déserts chauds, glaciaires ou hautes montagnes)
 - ⇒ **thermoclastie**
- dans les **zones avec eau liquide**:
 - ⇒ désagrégation mécanique
 - ⇒ ↗ surface d'attaque par l'eau
 - ⇒ ↗ l'altération chimique
- En absence d'un couvert végétal protecteur
 - ⇒ Roche mère subit une désagrégation mécanique (variations de T°C)
 - ⇒ ↗ surface d'attaque par l'eau liquide = altération chimique.



Haut Atlas marocain: thermoclastie (S. Dalaine)



Forêt équatoriale Bukit Lawang, Sumatra : rôle majeur de l'eau et du couvert végétal dans l'altération physique et chimique des roches (S. Dalaine)

PLAN: CHAPITRE ST-E-I : MODELÉS DES PAYSAGES ET TRANSFERTS DE MATÉRIAUX EN SURFACE I

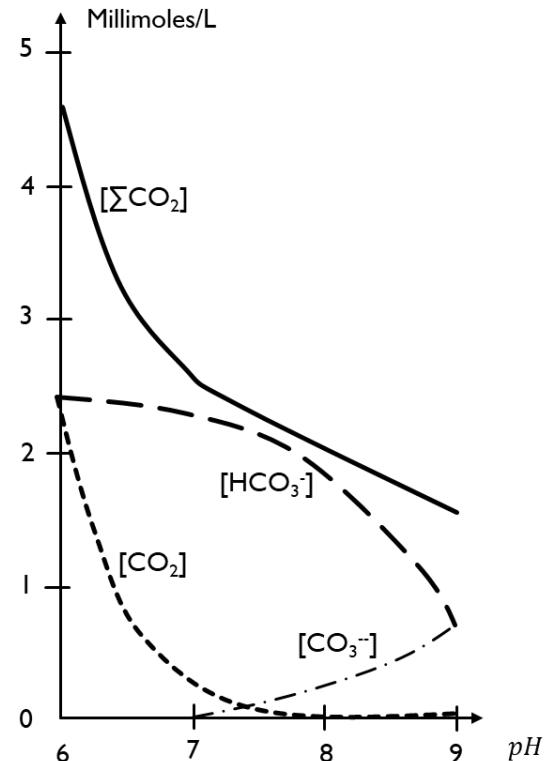
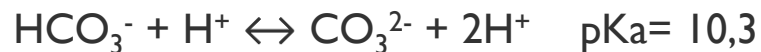
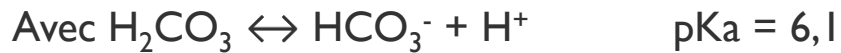
- I. Facteurs à l'origine du modelé des paysages : altération physique et chimique**
 - A. Etude d'un exemple, le paysage de cuesta à l'Est du Bassin parisien**
 - B. Observation de la diversité de modelé des paysages**
 - 1. Observation d'un granite altéré
 - 2. Observation d'un karst
 - C. les 3 facteurs à l'origine du modelé du paysage**
 - D. L'altération physique des roches, les agents de la désagrégation mécanique des roches**
 - 1. Effets de la température : thermoclastie et cryoclastie
 - 2. Mécanismes dépendant de la gravité
 - 3. L'action de l'eau à l'état solide : exemple des glaciers
 - 4. autres agents de désagrégation mécanique
 - 5. Les conséquences de ces facteurs d'altération varient selon ...
 - E. L'altération chimique des roches**
 - 1. La dissolution des carbonates
 - 2. L'altération des roches silicatées, exemple du granite, une altération par hydrolyse
 - 3. L'hydrolyse des silicates par l'eau
- II. De l'érosion au transport des particules/solutés**
 - A. Diversité des modes et agents de transports**
 - 1. Transport sous forme dissoute
 - 2. Transport en suspension
 - 3. Transport en masse
 - B. Cas du transport des solutés : importance du substrat des bassins versants**
 - C. Cas du transport des particules**

E. L'ALTERATION CHIMIQUE DES ROCHES

I. La dissolution des carbonates



- **Dissolution** : phénomène aboutissant à la **décomposition totale d'un minéral en ses ions constitutifs** (dissolution de la calcite ou de l'aragonite)
- CO₂ pas inerte et réagit avec l'eau pour donner l'acide carbonique H₂CO₃
- Equation de dissolution du CO₂ :



- Forme majoritaire à pH acide :



- Forme majoritaire à pH basique :



- Forme majoritaire dans les océans (pH ~ 8) :



Variations des teneurs des différentes formes du CO₂ (gaz carbonique libre, bicarbonates, carbonates et gaz carbonique total) en fonction du pH, à 20°C et à la pression atmosphérique, dans une eau de mer de chlorinité 19‰ (d'après Sverdrup et al. 1993)

E. L'ALTERATION CHIMIQUE DES ROCHES

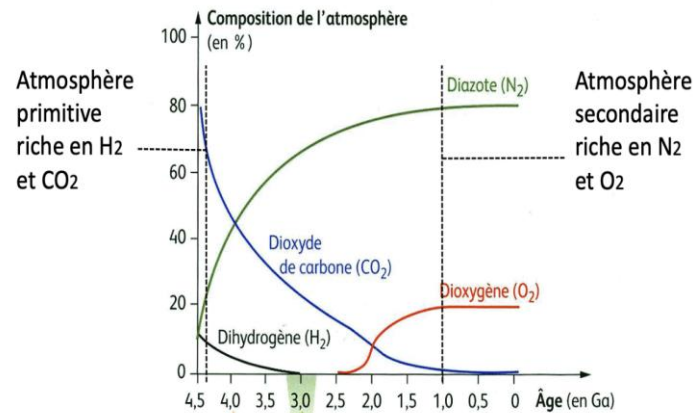
I. La dissolution des carbonates



Cf BG-C

Effet du CO₂ sur les calcaires?

- Espèce majoritaire dans océan: HCO₃⁻
- $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$
- ⇒ dissolution des calcaires pompe du CO₂
- ⇒ formation des calcaires produit du CO₂ → cf cours de spé sur les climats

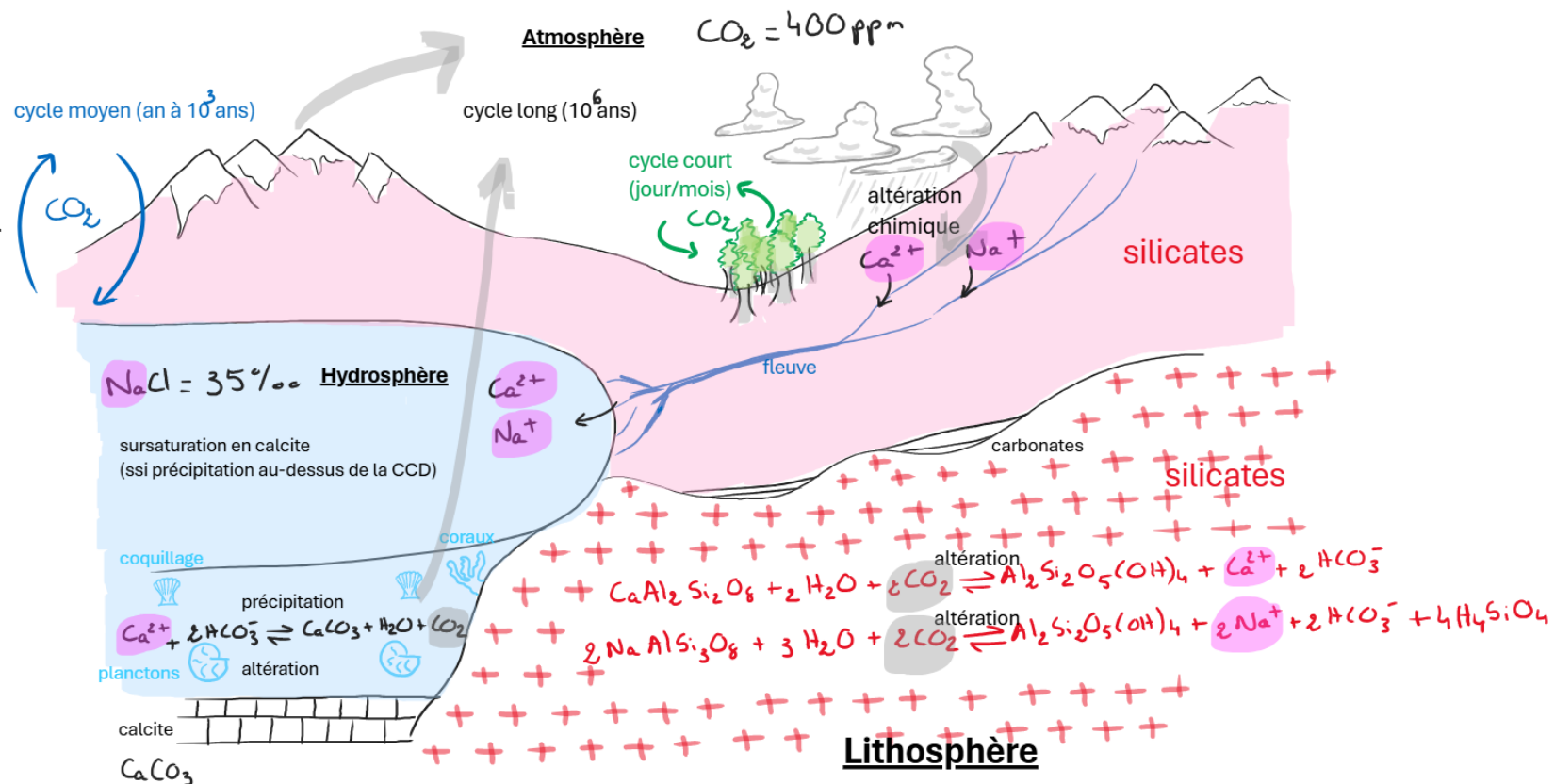


<https://www.ocm-svt.fr/GCM/public-affichage.php?niveau=Archives&id=184>

Traces de vie les plus anciennes
Traces des premiers êtres vivants photosynthétiques

Evolution de la composition de l'atmosphère terrestre.

ENCPB- BCPST1 - STÉPHANIE DALAINE



Le piégeage du CO₂ par l'altération des roches silicatées et la précipitation des carbonates : cycle long du carbone (S. Dalaine d'après J. Gaillardet)

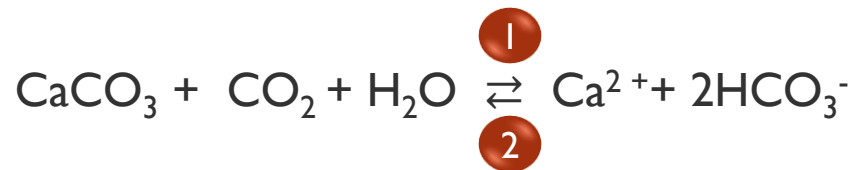
E. L'ALTERATION CHIMIQUE DES ROCHES

I. La dissolution des carbonates



Effet de la \searrow température sur la dissolution des calcaires

- $\searrow T^{\circ}\text{C}$ favorise la dissolution puisque le CO_2 est plus soluble à froid (rincer sa baignoire à l'eau froide!!!)



- ⇒ Sens $\textcircled{1}$ favorisé (si $\searrow T^{\circ}\text{C}$)
- ⇒ \nearrow dissolution des calcaires
- ⇒ $\nearrow \text{HCO}_3^-$



Lapiés d'Innerbergli : quand le végétal s'accroche au minéral. Présence de sillons de dissolution dont le fond est colmaté par des argiles de décarbonatation qui, en retenant l'eau, ont favorisé la colonisation de végétation dans les rigoles (Habkern, Berne, Suisse). Le CO_2 dissous dans l'eau est l'agent principal de la dissolution des carbonates, même si d'autres acides interviennent (Wikipédia).

E. L'ALTERATION CHIMIQUE DES ROCHES

I. La dissolution des carbonates

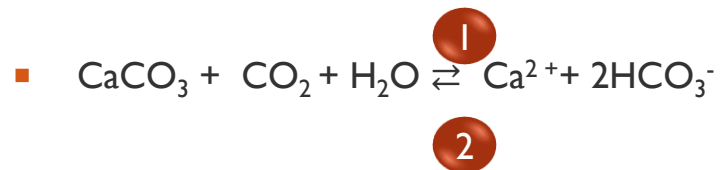


Effet de la photosynthèse sur la précipitation des calcaires

- Photosynthèse: \searrow CO_2

⇒ Favorise sens 2

⇒ \nearrow formation des calcaires



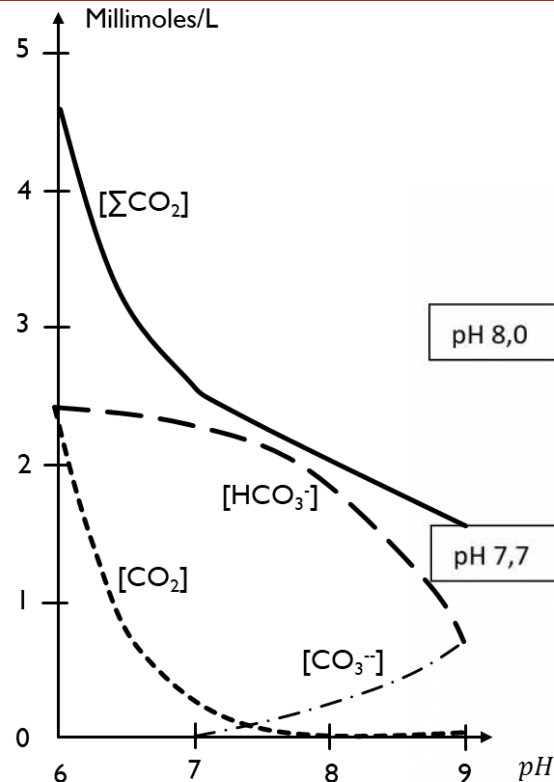
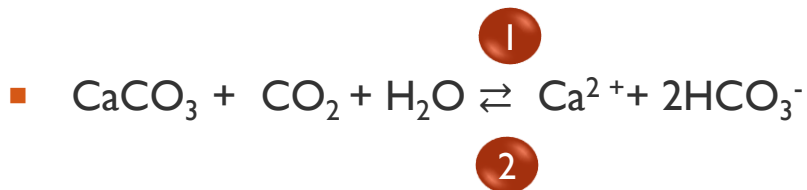
Lapiés d'Innerbergli : quand le végétal s'accroche au minéral. Présence de sillons de dissolution dont le fond est colmaté par des argiles de décarbonatation qui, en retenant l'eau, ont favorisé la colonisation de végétation dans les rigoles (Habkern, Berne, Suisse). Le CO_2 dissous dans l'eau est l'agent principal de la dissolution des carbonates, même si d'autres acides interviennent (Wikipédia),⁷¹

E. L'ALTERATION CHIMIQUE DES ROCHES

I. La dissolution des carbonates

Effet du pH sur la dissolution des calcaires

- Si \searrow pH
 - ⇒ \nearrow CO₂
 - ⇒ Favorise sens 1
 - ⇒ \nearrow dissolution des calcaires



variations des teneurs des différentes formes du CO₂ (gaz carbonique libre, bicarbonates, carbonates et gaz carbonique total) en fonction du pH, à 20°C et à la pression atmosphérique, dans une eau de mer de chlorinité 19‰ (d'après Sverdrup et al. 1993)



Calcaire dolomitique Barrachin, Hautes-Alpes, France - 21/09/1998 - Jacques Janin

Dolomie plus résistante à l'érosion
CaMg(CO₃)₂

Calcaire moins résistant à l'érosion
CaCO₃

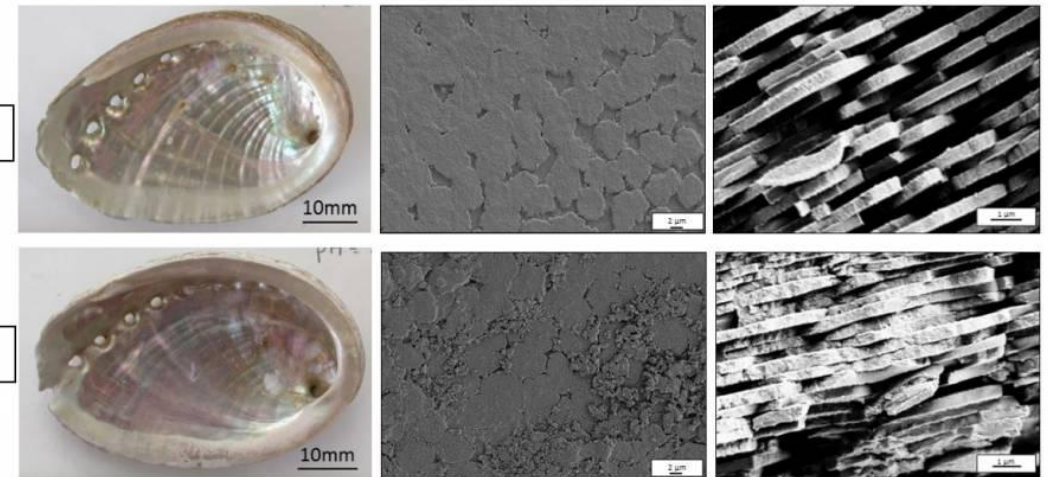


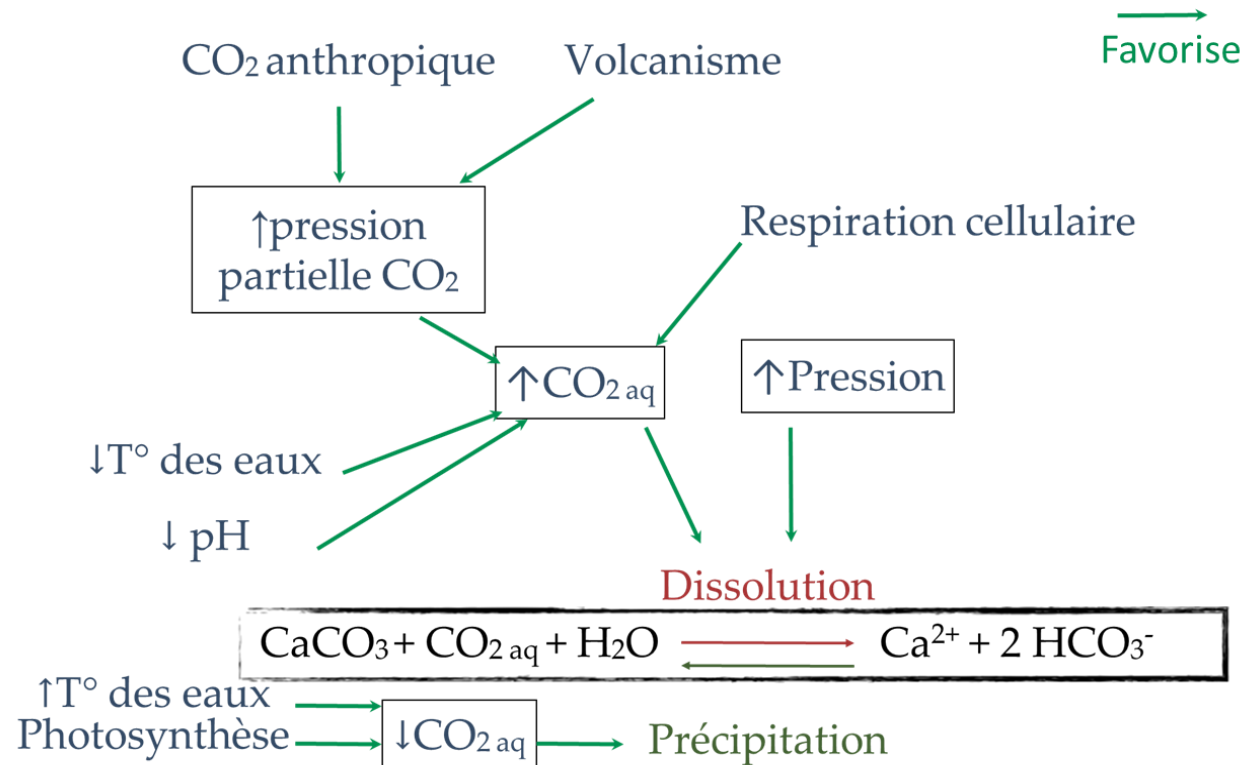
Figure 2 : Effets d'une diminution de 0,3 unité pH sur la coquille de l'ormeau *H. tuberculata* : dissolution partielle de la couche interne nacrée et dégradation des tablettes d'aragonite. (Crédit photographique S. Bordenave, MNHN, 2017)

Je vais faire comment pour former ma coquille?



E. L'ALTERATION CHIMIQUE DES ROCHES

I. La dissolution des carbonates



L'équation de précipitation / dissolution des carbonates ainsi que les paramètres environnementaux contrôlant cet équilibre (Thibault Lorin)

E. L'ALTERATION CHIMIQUE DES ROCHES

I. La dissolution des carbonates



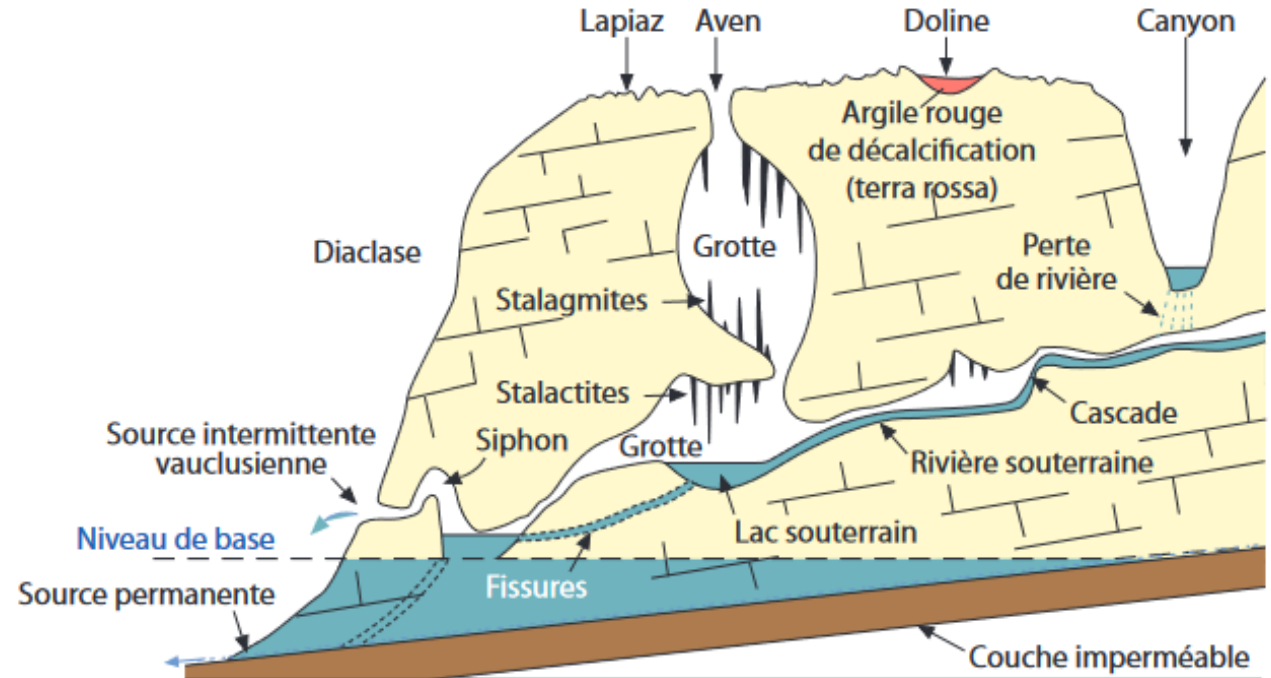
Application aux paysages karstiques

■ Roches carbonatées:

- Calcaire (minéral: calcite, et plus rarement aragonite)
- Dolomie (minéral: dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)
- Marbre (calcaire métamorphisé)
- Carbonatites (roches magmatiques)
- Carbonara (roches « pathétiques »)

■ Modelé karstique :

- Plateau calcaire avec rôle majeur de l'eau souterraine
- Plateaux troués de galeries souterraines creusées | eaux
- Précipitation locale de CaCO_3 (stalagmites/stalactites)
- Processus rapide: qqs dizaines de milliers d'années



Morphologie karstique (dans Renard, 2018)

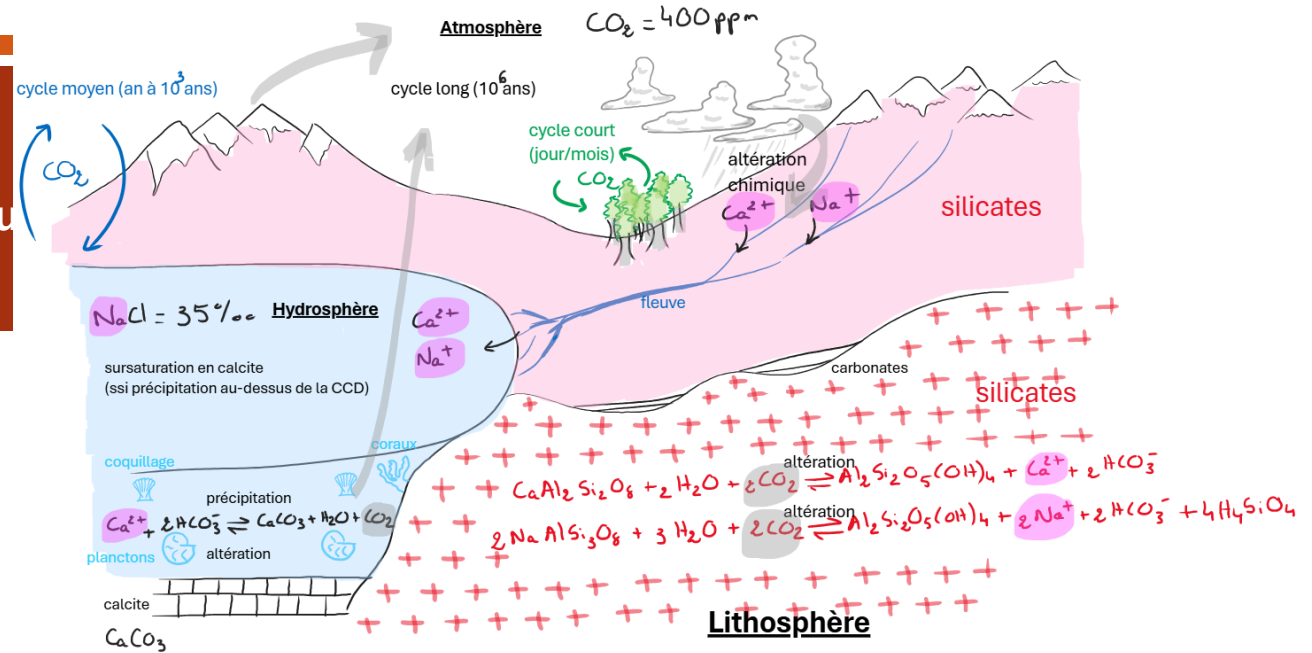
PLAN: CHAPITRE ST-E-I : MODELÉS DES PAYSAGES ET TRANSFERTS DE MATÉRIAUX EN SURFACE I

- I. Facteurs à l'origine du modelé des paysages : altération physique et chimique**
 - A. Etude d'un exemple, le paysage de cuesta à l'Est du Bassin parisien**
 - B. Observation de la diversité de modelé des paysages**
 - 1. Observation d'un granite altéré
 - 2. Observation d'un karst
 - C. les 3 facteurs à l'origine du modelé du paysage**
 - D. L'altération physique des roches, les agents de la désagrégation mécanique des roches**
 - 1. Effets de la température : thermoclastie et cryoclastie
 - 2. Mécanismes dépendant de la gravité
 - 3. L'action de l'eau à l'état solide : exemple des glaciers
 - 4. autres agents de désagrégation mécanique
 - 5. Les conséquences de ces facteurs d'altération varient selon ...
 - E. L'altération chimique des roches**
 - 1. La dissolution des carbonates
 - 2. L'altération des roches silicatées, exemple du granite, une altération par hydrolyse
 - 3. L'hydrolyse des silicates par l'eau
- II. De l'érosion au transport des particules/solutés**
 - A. Diversité des modes et agents de transports**
 - 1. Transport sous forme dissoute
 - 2. Transport en suspension
 - 3. Transport en masse
 - B. Cas du transport des solutés : importance du substrat des bassins versants**
 - C. Cas du transport des particules**

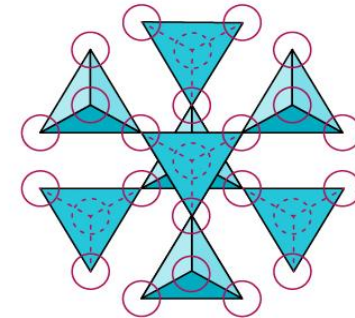
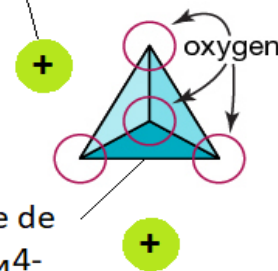
E. L'ALTERATION CHIMIQUE DES ROCHES

2. L'altération des roches silicatées, exemple du granite, une altération par hydrolyse

- Roches mères **silicatées** = **majorité** des roches terrestres.
- **Silicates** : minéraux composés d'un polyèdre de coordination en tétraèdre ou octaèdre à cœur de Si^{4+} (parfois Al^{3+}) entourés d'anions O^{2-} « coordonnés ».
- Charge du tétraèdre neutralisée par :
 - cations externes : ex **Olivine** $(\text{Fe,Mg})_2\text{SiO}_4$, orthose **KAlSi_3O_8**
 - mise en commun d'un ou plusieurs O^{2-} par deux tétraèdres : quartz SiO_2
- Granite parfaitement sain → pas altérable
 - souvent **fissures, diaclases** ⇨ **altération**.
- Granites ~ **1/5** des terres émergées
 - **faciès d'altération** suivant climat
 - deux types principaux d'altération



Cation compensant les charges négatives de la silice : Fe^{2+} , Mg^{2+} ...



TECTOSILICATES : tétraèdres reliés dans les trois directions de l'espace. Chaque oxygène est relié à deux siliciums, la formule générale des tectosilicates est SiO_2 .
Ex : quartz, feldspaths

Chez feldspaths : substitution Si^{4+} par Al^{3+} .
Perte de charge compensée par cations compensateurs : K^+ Na^+ Ca^{2+}

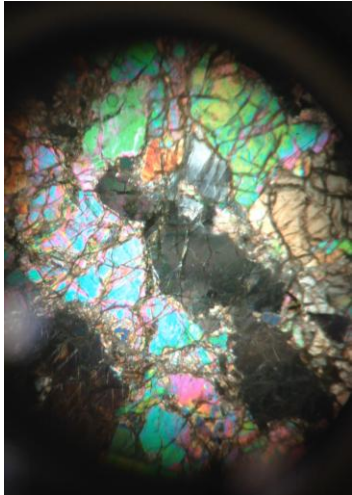


NÉOSILICATES: TÉTRAÈDRES ISOLÉS

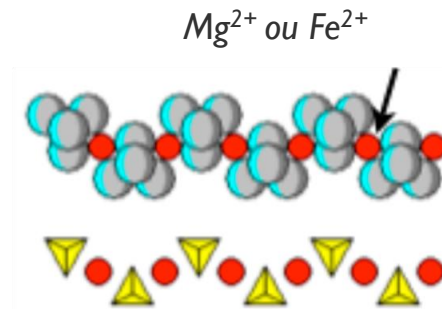
(néso= île)



Minéral granuleux
vert olive

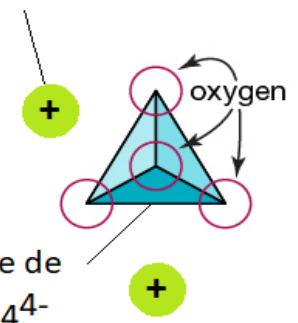


- **NESOSILICATES** : tétraèdres isolés, ex. l'olivine.
- Formule de base: SiO_4^{4-}
- Neutralisation électronique par Mg^{2+} et/ou Fe^{2+}
- $[\text{SiO}_4](\text{Fe},\text{Mg})_2$
- L'olivine ferreuse est la fayalite (Fe_2SiO_4), l'olivine magnésienne est la forstérite (Mg_2SiO_4).

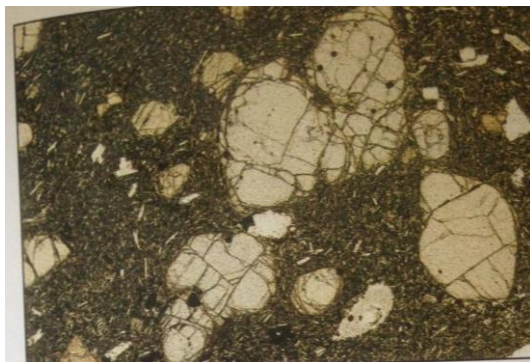


Olivine

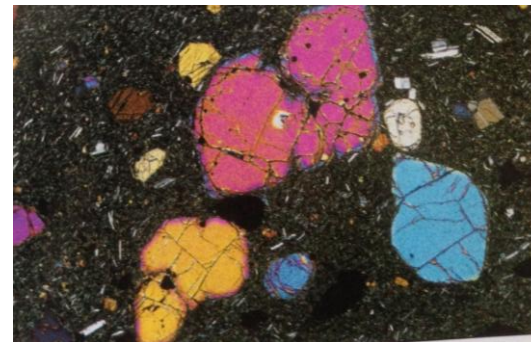
Cation compensant les charges négatives de la silice : Fe^{2+} , Mg^{2+} ...



Cristaux d'olivine, dans une enclave de péridotite



Phénocristaux d'olivine (LPNA)



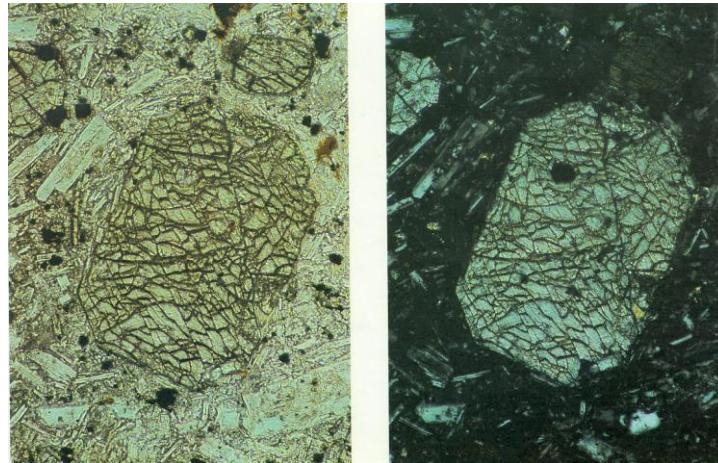
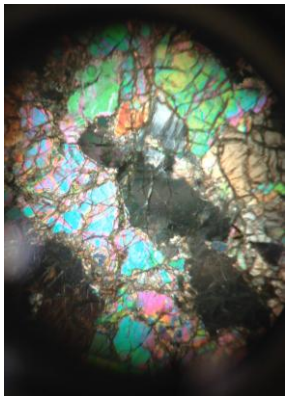
Phénocristaux d'olivine (LPA)

INOSILICATES

« CHAÎNES » inos = fibres



- **INOSILICATES** : tétraèdres formant des **chaines simples** (pyroxènes) ou doubles (amphiboles). Formule de base: $(\text{Si}_2\text{O}_6)^{4-}$
- Neutralisation électronique par Mg^{2+} et/ou Fe^{2+}
- $[\text{Si}_2\text{O}_6](\text{Fe},\text{Mg})_2$
- Les charges négatives restantes des tétraèdres sont compensées par des cations (Fe, Mg, Ca Na), on parle de cations compensateurs. On distingue les **clinopyroxènes**, riches en calcium et les **orthopyroxènes**, pauvres en calcium.
- Ex: Augite (pyroxène): $\text{CaMg}(\text{SiO}_3)_2$





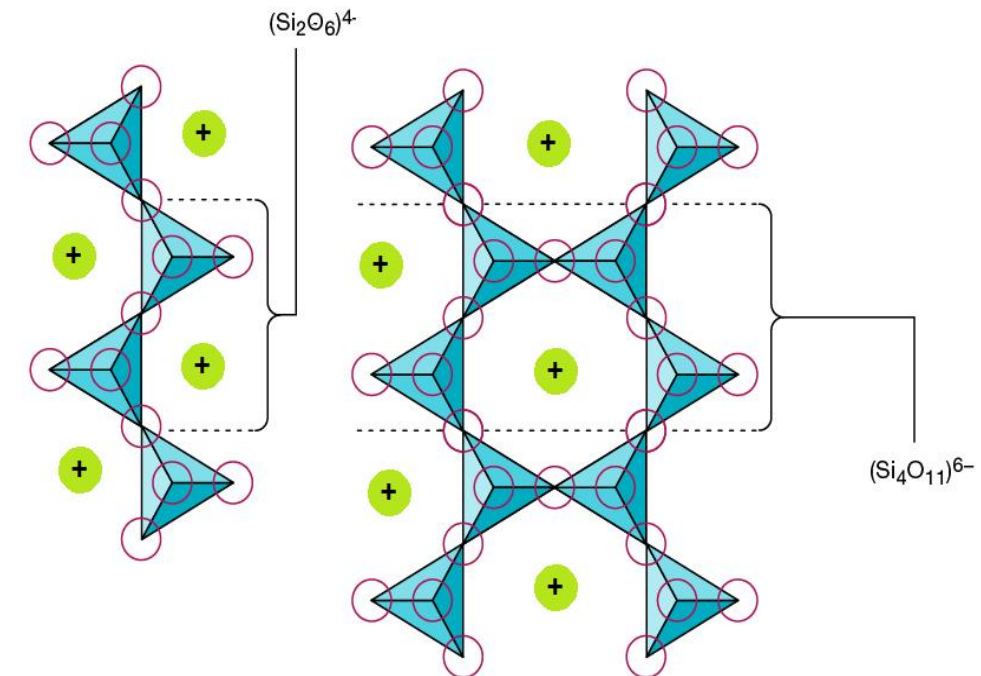
Pyroxène (LPNA vs LPA) aux plans de clivage à $\sim 90^\circ$



Phénocrystal
d'orthopyroxène

Pyroxène

Augite	Jadéite
Minéral sombre de couleur brune, surfaces planes à reflets métalliques.	Minéral sombre de couleur verdâtre (vert jade)
	



TECTOSILICATES (tecto: charpente)

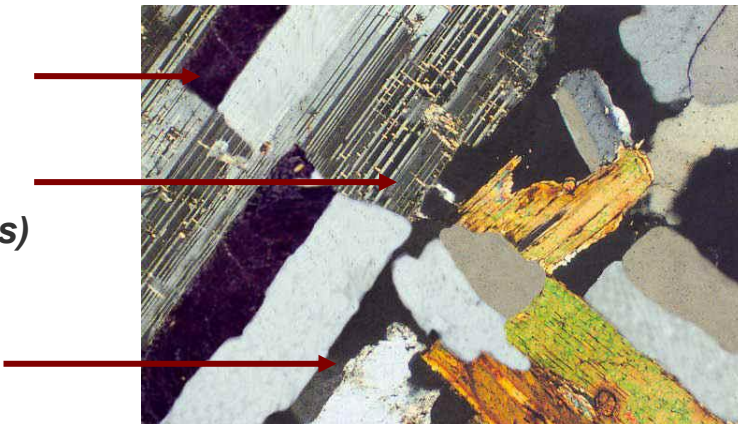


- tétraèdres reliés dans les trois directions de l'espace.
- Chaque oxygène est relié à deux siliciums → formule générale SiO_2 (=silice).
- Ex: quartz, feldspath
- feldspaths : substitution de Si^{4+} par Al^{3+} ions → compensateurs Na^+ , K^+ , Ca^{2+}

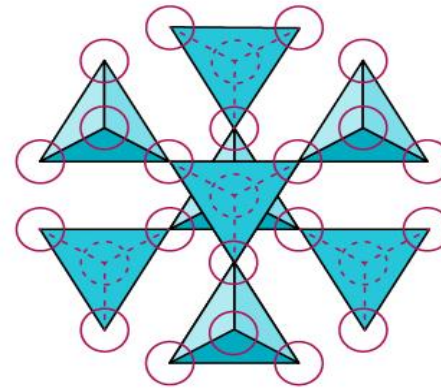
Feldspaths
(alcalins)

Feldspaths
(plagioclases)

Quartz

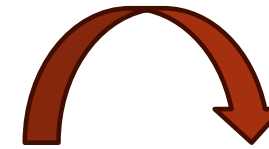


Lame mince de granite au MO LPA



TECTOSILICATES : tétraèdres reliés dans les trois directions de l'espace. Chaque oxygène est relié à deux siliciums, la formule générale des tectosilicates est SiO_2 .
Ex : quartz, feldspaths

Quartz	Feldspath	
	Orthose	Plagioclase
Minéral à l'aspect de gros sel. Incolore à gris.	Minéral blanc rosé, et souvent sub-rectangulaires	Minéral blanc, mat, souvent sub-rectangulaires.



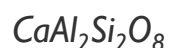
Chez feldspaths : substitution Si^{4+} par Al^{3+} .
Perte de charge compensée par cations compensateurs : K^+ Na^+ Ca^{2+}

Orthose
(fd alcalin)

Albite

Anorthite

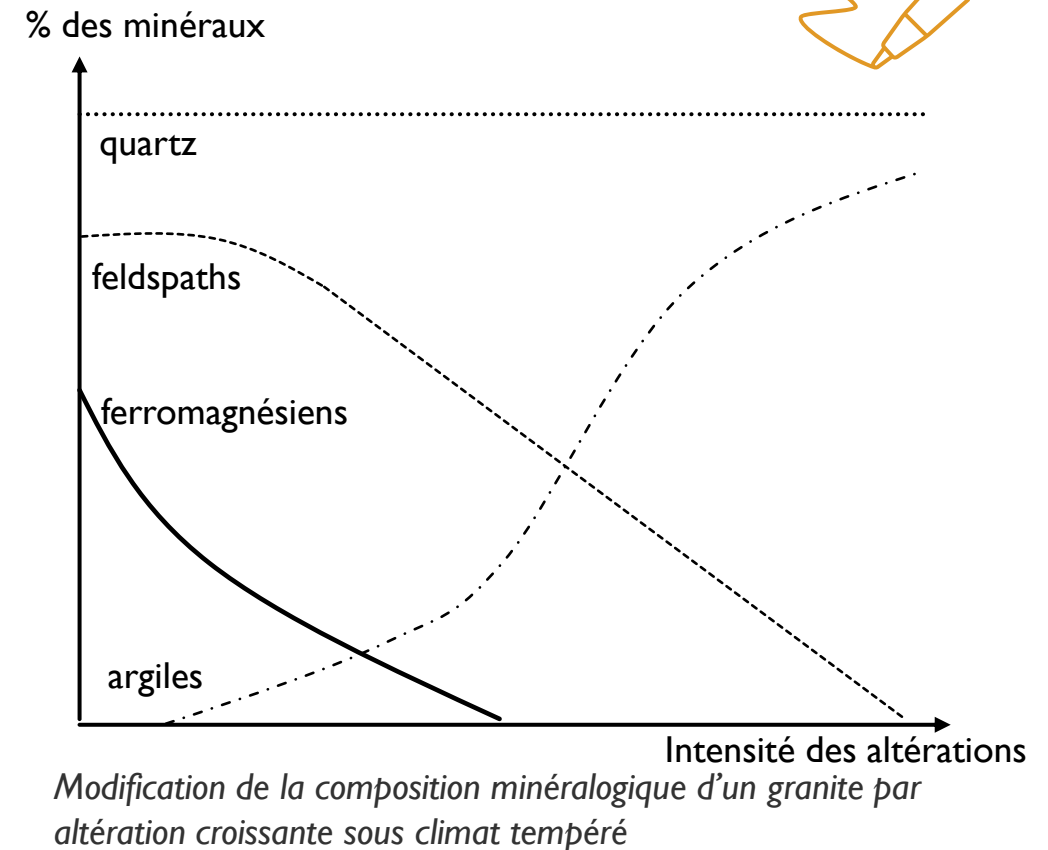
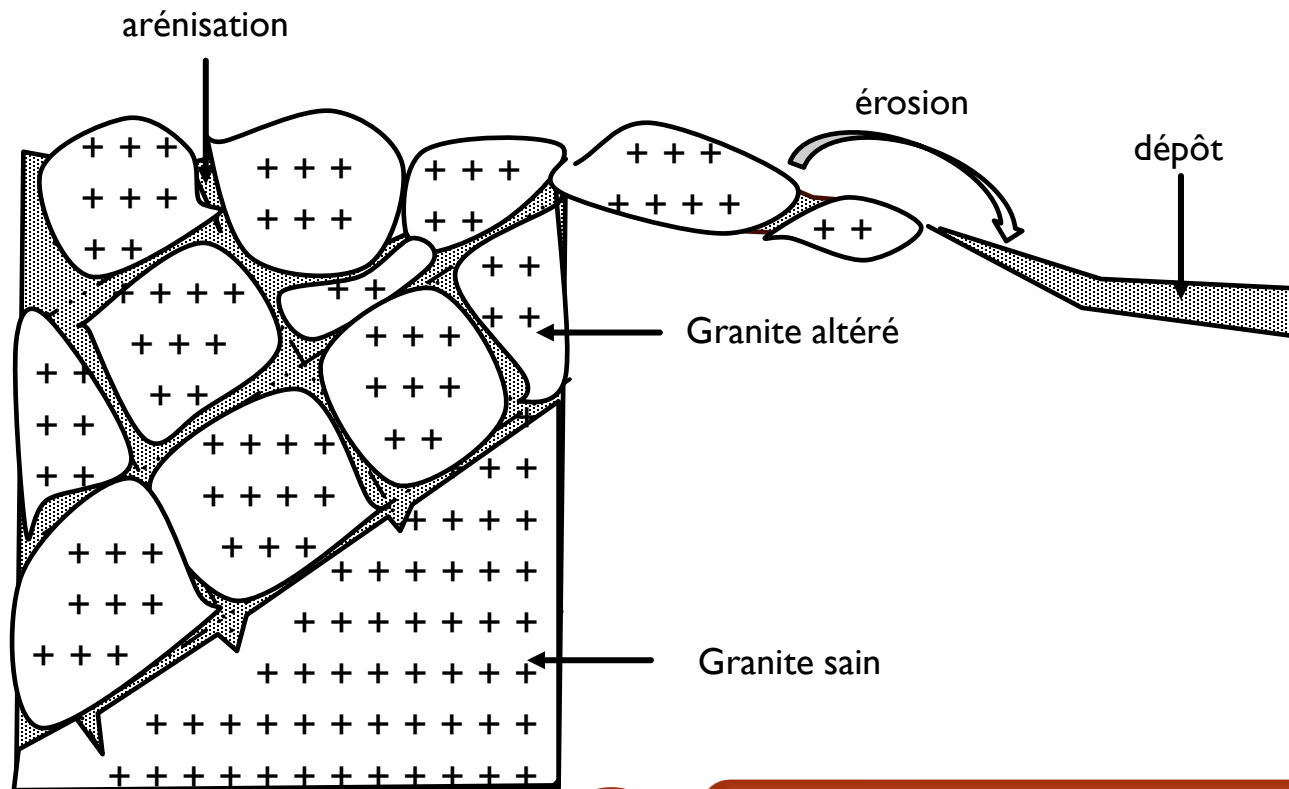
Fd plagioclases



E. L'ALTERATION CHIMIQUE DES ROCHES

2. L'altération des roches silicatées, exemple du granite, une altération par hydrolyse

2.1. L'arénisation en zones tempérées



Les ferromagnésiens, puis les feldspaths disparaissent alors que les argiles s'accumulent; le quartz n'est pas modifié.

⇒ Quartz et argiles constituent l'arène granitique



E. L'ALTERATION CHIMIQUE DES ROCHES

2. L'altération des roches silicatées, exemple du granite, une altération par hydrolyse



2.1. L'arénisation en zones tempérées

- Rappel: minéraux constitutifs du granite: ... **quartz** **feldspaths** **micas**
- Profil d'altération: échelle métrique (du bas vers le haut)
 - désagrégation mécanique croissante de la roche
 - ✓ roche saine le plus souvent fracturée par des diaclases (= fractures sans mouvement relatif des deux compartiments)
 - ✓ roche altérée : blocs initiaux de + en + **émoussés** : **altération en boule**
 - ✓ Entre les blocs et au-dessus : roche meuble (\neq cohérente) : **arène** constituée de particules allant du **cm au μm** ;

Minéraux hérités du granite : quartz

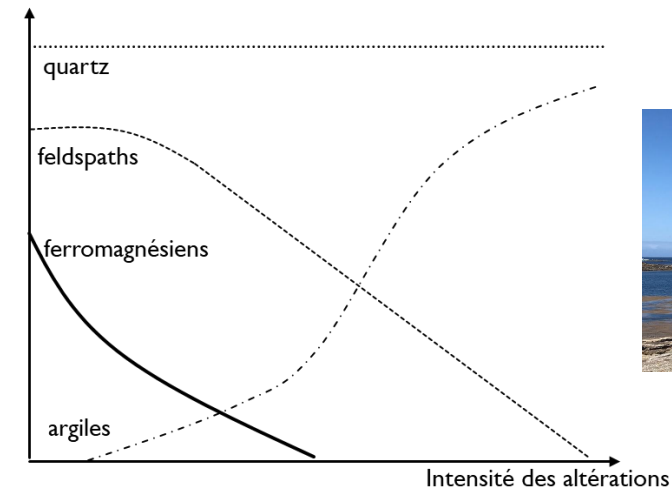
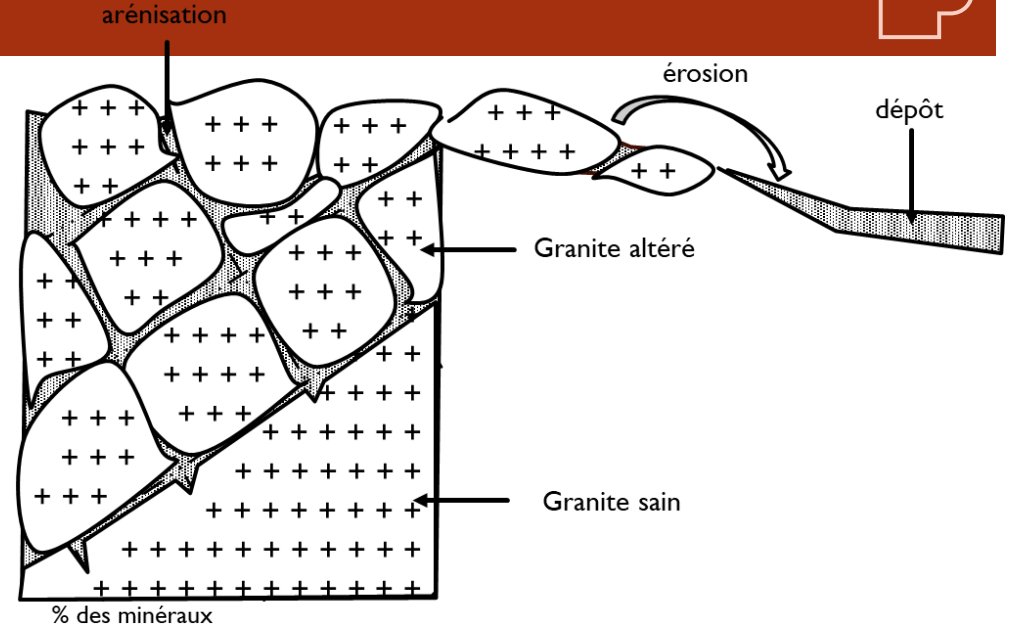
Minéraux altérés : biotite rouillée, feldspaths plus rares, plagioclases qui disparaissent parfois totalement

Minéraux néoformés : argile TOT illite

Composition chimique : Mg^{2+} lessivé et en moindre concentration dans l'arène
 Fe^{3+} , Al^{3+} plus concentrés (enrichissement relatif)

\Rightarrow altération = tri géochimique

- Quand l'arène érodée \rightarrow uniquement blocs de granite = **chaos granitique**



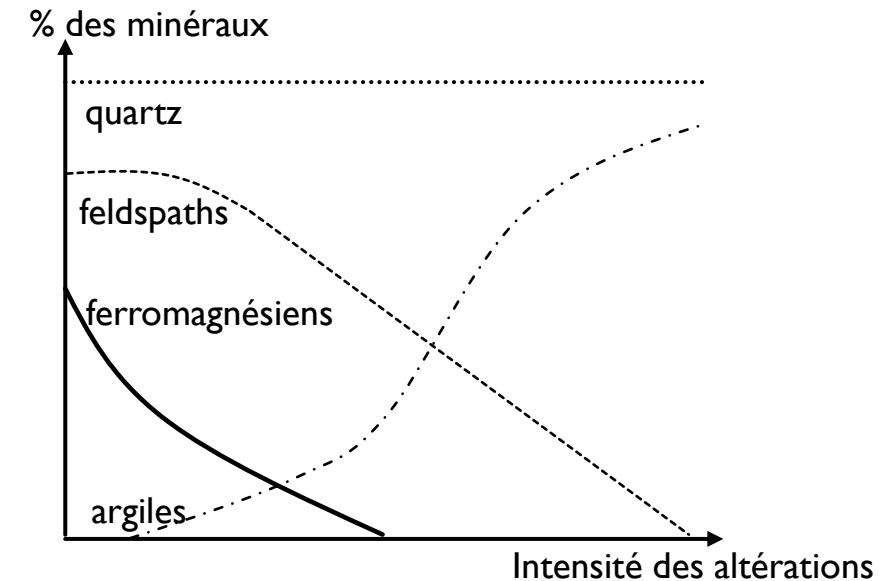
E. L'ALTERATION CHIMIQUE DES ROCHES

2. L'altération des roches silicatées, exemple du granite, une altération par hydrolyse



2.1. L'arénisation en zones tempérées

- Evolution minéralogique à l'échelle du profil de la base vers le sommet
 - **Diminution importante** des **plagioclases** ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ et $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), des **micas** (surtout la biotite= mica noir riche en Fe, Mg)
 - **Diminution modérée** de l'orthose (KAlSi_3O_8)
 - **Apparition de nouvelles phases** : **argiles** type TOT et **oxydes** de fer (goethite : $\text{FeO}(\text{OH})$).
 - ⇒ Quantité d'ions solubilisés et exportés augmente de la base vers le sommet.
- **Bilan** : l'altération chimique croît de la base vers le sommet du profil, affecte préférentiellement certains minéraux et est à l'origine de nouvelles phases qualifiées de résiduelles.
- L'évolution géochimique (en pourcentage par rapport aux valeurs de la roche saine):
 - ↘ de l'ordre de 50 %, de la base vers le sommet, du pourcentage de certains cations comme Na^+ , Ca^{2+} et K^+ provenant ici essentiellement de l'altération les feldspaths
 - ↘ faible % de silice
 - ↘ % d'oxydes d'aluminium et de fer essentiellement au sommet du profil. Les oxydes d'aluminium présentent même un enrichissement local au niveau de la **zone d'accumulation**.
 - ↘ des proportions de certaines espèces chimiques s'expliquent par leur **forte solubilité**. Elles sont mises en solution et évacuées du système par l'eau.



Modification de la composition minéralogique d'un granite par altération croissante sous climat tempéré

- **Bilan 2** : l'altération chimique n'affecte pas de la même manière les différents types d'ions.

E. L'ALTERATION CHIMIQUE DES ROCHES

2. L'altération des roches silicatées, exemple du granite, une altération par hydrolyse

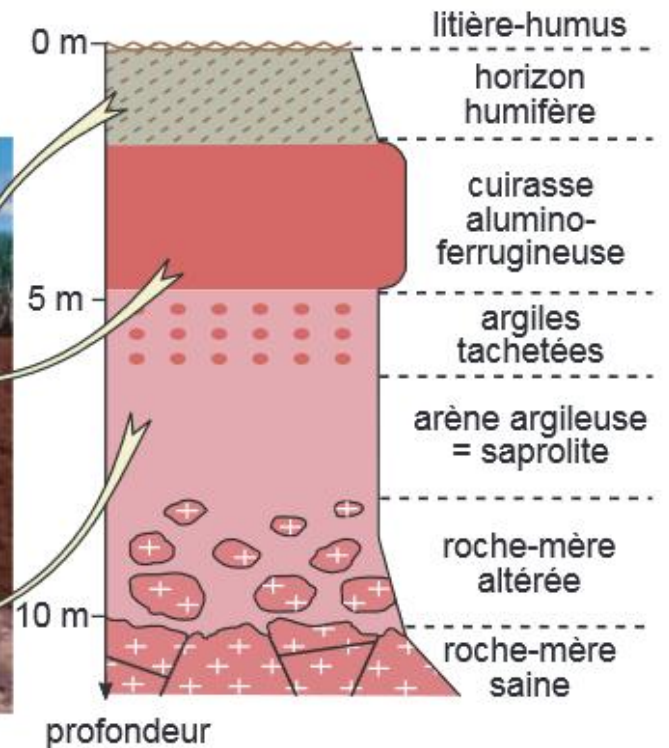


2.2. La latéralisation sous climat tropical, une décomposition totale

- On constate: beaucoup de rouge!
 - ⇒ Accumulation **d'oxydes de fer** dans des horizons superficiels
- Deux horizons typiques au-dessus de l'arène, riches en oxydes et en argiles
 - ⇒ altération poussée
 - Cuirasse latéritique très rouge
 - Horizon riche en kaolinite (argile TO) blanche
 - Arénisation moins poussée
- **Désagrégation mécanique faible** mais **altération chimique élevée**

(b) Altération en milieu tropical humide

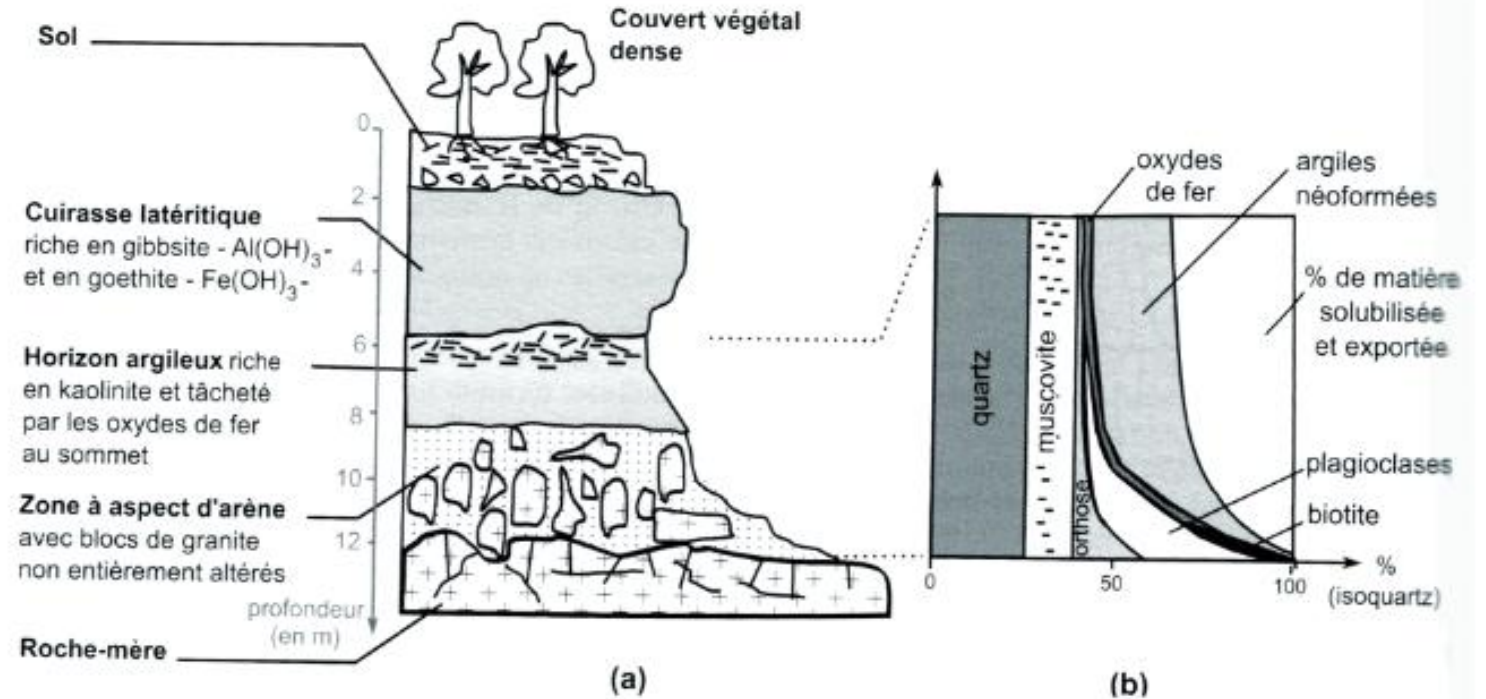
Température moyenne annuelle $T = 27^{\circ}\text{C}$,
Précipitations $P = 2500$ à 4500 mm/an



Organisation schématique d'un sol issu de l'altération d'un granite sous climat tropical humide (b) (Dunod, ed 2021)

2.2. La latéralisation sous climat tropical, une décomposition totale

- **Altération chimique intense** avec de la base au sommet:
 - **granite sain** diaclasé
 - **granite dissocié** avec **arène** sur quelques dizaines de centimètres
 - **Horizon argileux (plus de 10m)**
 - ✓ **argile TO = kaolinite**
 - ✓ Tachetée par oxydes de fer au sommet reste $FeO(OH)$ (goethite) rouge
 - **cuirasse latéritique (5 à 10 m) :**
 - ✓ Riche en gibbsite $Al(OH)_3$ (minerai d'aluminium = bauxite) blanc
 - ✓ Riche en Goethite $FeO(OH)$, Hématite (Fe_2O_3): cuirasse rouge (**ferrallitisation**= enrichissement en fer) rouge
 - ✓ **absence totale de tous les ions solubles** (Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ , Si^{4+})
 - ✓ Dans cette cuirasse, l'**hydrolyse totale** \Rightarrow il ne reste plus de silicate.

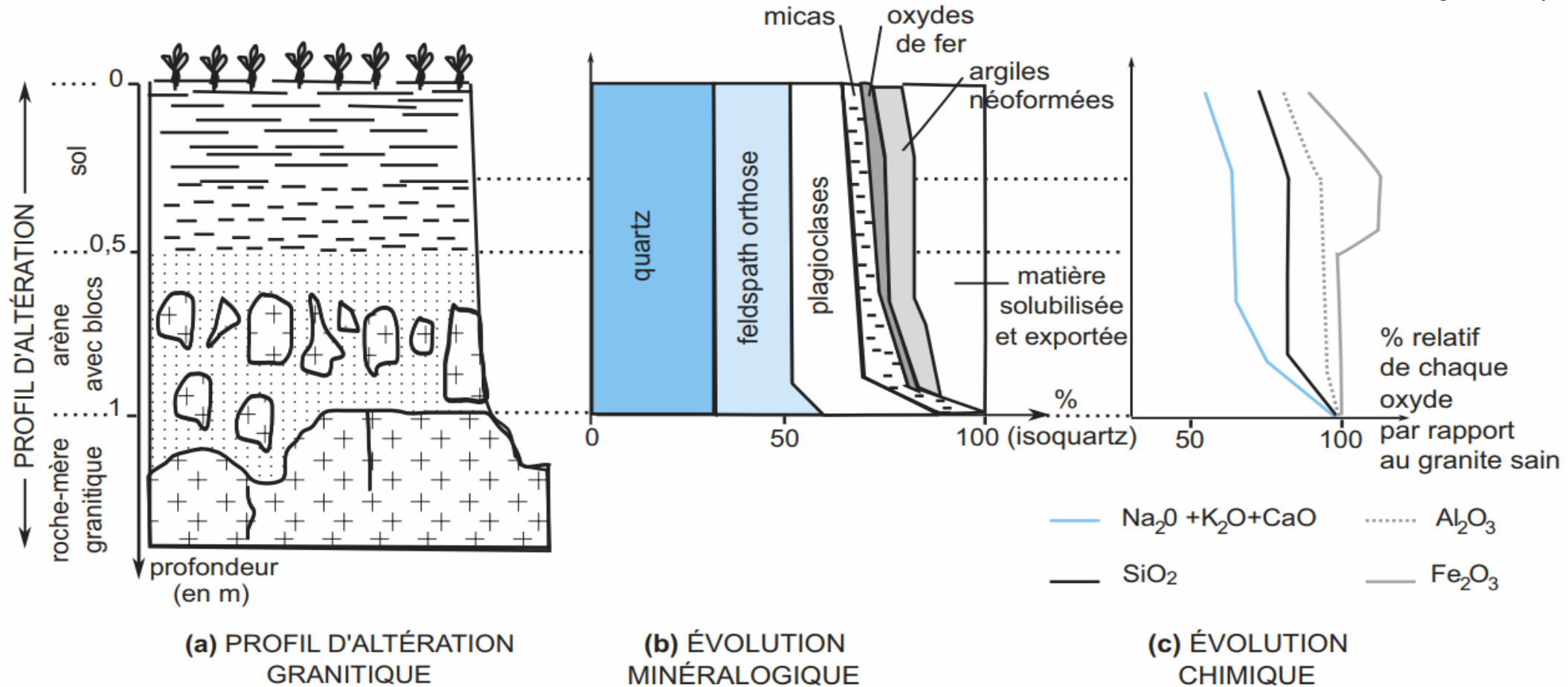


Bilan de l'altération du granite en climat tropical (chaud, humide et drainant)
(source : Dunod)

Cette altération est très poussée en milieu équatorial car il y a beaucoup d'eau liquide et la température est élevée, ce qui favorise la réaction d'hydrolyse.

2.2. La latéralisation sous climat tropical, une décomposition totale

La teneur dans les différents éléments est indiquée en oxydes. Na_2O signifie « oxyde de sodium », donc témoigne de la présence de Na^+



- **Evolution minéralogique** calculée en **pourcentage dit isoquartz**
 - quartz considéré comme étant non altéré de la base de l'arène au sommet du profil.
 - ⇒ Son pourcentage mesuré dans chaque horizon est **corrigé pour être constant**.
- Profil d'altération **décamétrique** (métrique en région tempérée) avec **quatre zones distinctes** au-dessus de la roche saine.

2.2. La latéralisation sous climat tropical, une décomposition totale

- France, les bauxites formées du **Jurassique sup** au **Crétacé inf**
- Souvent sous forme de poches.
 - ✓ Ariège (Lavelanet, le mas d'Azil), Hérault (Bédarieux), les bouches du Rhône et le Var.

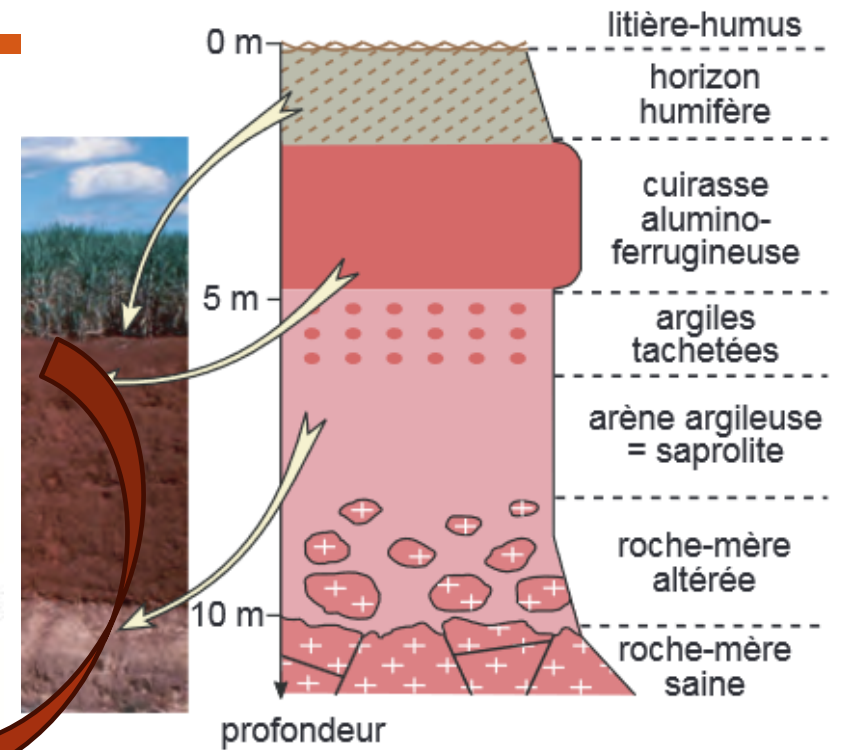


Les Baux-de-Provence dans les bouches du Rhône



Concretions rouges riches en hématite (Fe_2O_3)

Matrice blanche riche en gibbsite ($\text{Al}(\text{OH})_3$)



Photographie d'une bauxite des Baux de Provence (Bouches-du-Rhône) (Ellipses)

PLAN: CHAPITRE ST-E-I : MODELÉS DES PAYSAGES ET TRANSFERTS DE MATÉRIAUX EN SURFACE I

- I. Facteurs à l'origine du modelé des paysages : altération physique et chimique**
 - A. Etude d'un exemple, le paysage de cuesta à l'Est du Bassin parisien**
 - B. Observation de la diversité de modelé des paysages**
 - 1. Observation d'un granite altéré
 - 2. Observation d'un karst
 - C. les 3 facteurs à l'origine du modelé du paysage**
 - D. L'altération physique des roches, les agents de la désagrégation mécanique des roches**
 - 1. Effets de la température : thermoclastie et cryoclastie
 - 2. Mécanismes dépendant de la gravité
 - 3. L'action de l'eau à l'état solide : exemple des glaciers
 - 4. autres agents de désagrégation mécanique
 - 5. Les conséquences de ces facteurs d'altération varient selon ...
 - E. L'altération chimique des roches**
 - 1. La dissolution des carbonates
 - 2. L'altération des roches silicatées, exemple du granite, une altération par hydrolyse
 - 3. L'hydrolyse des silicates par l'eau
- II. De l'érosion au transport des particules/solutés**
 - A. Diversité des modes et agents de transports**
 - 1. Transport sous forme dissoute
 - 2. Transport en suspension
 - 3. Transport en masse
 - B. Cas du transport des solutés : importance du substrat des bassins versants**
 - C. Cas du transport des particules**

E. L'ALTERATION CHIMIQUE DES ROCHES

3. L'hydrolyse des silicates par l'eau

3.1. Le comportement des ions dans l'eau

- Hydrolyse → reste phase insoluble (= minéral résiduel) après la mise en solution des ions.
- Dans les fissures et anfractuosités de la roche → eau au contact de multiples facettes cristallines
 - ⇒ Très grandes surfaces de contact eau-roche
- Diagramme de Goldschmidt = comportement des ions vis-à-vis de l'eau, expliqué par leur potentiel ionique $Q=z/r$, avec z : la charge électrique de l'ion et r le rayon de l'ion
 - $r=f(z)$, le potentiel Q représente l'inverse de la pente.
 - Trois champs :
 - ✓ **champ des cations solubles à $z/r < 3$** : charge faible et rayon ionique important ⇒ répartisent leur faible charge sur une grande surface ⇒ développent un champ électrostatique faible, ils attirent faiblement H_2O migrent dans l'eau à l'état solvaté. Dans ce champ, plus z augmente plus le cation est soluble ($K^+ < Na^+ < Ca^{2+} < Fe^{2+} < Mg^{2+}$)
 - ✓ **champ des hydrolysats : $3 < z/r < 10$** , ils développent à leur surface un champ moyen, attirent H_2O ce qui a tendance à rompre le dipôle en H^+ et OH^- ⇒ ils forment dans l'eau des hydrolysats insolubles qui précipitent comme $Al(OH)_3$ ou $FeO(OH)$
 - ✓ **champ des complexes anioniques solubles : $z/r > 10$** : attraction tellement forte sur dipôle H_2O ⇒ libère les $2H^+$ dans l'eau et O^{2-} est annexé par le cation ⇒ oxyanions très solubles dans l'eau

*Hydrolyse : Processus par lequel un cation d'un minéral est remplacé par le H^+ d'une solution acide. Cette réaction a pour conséquence de détruire le minéral (mise en solution complète) ou de le convertir en une nouvelle espèce.

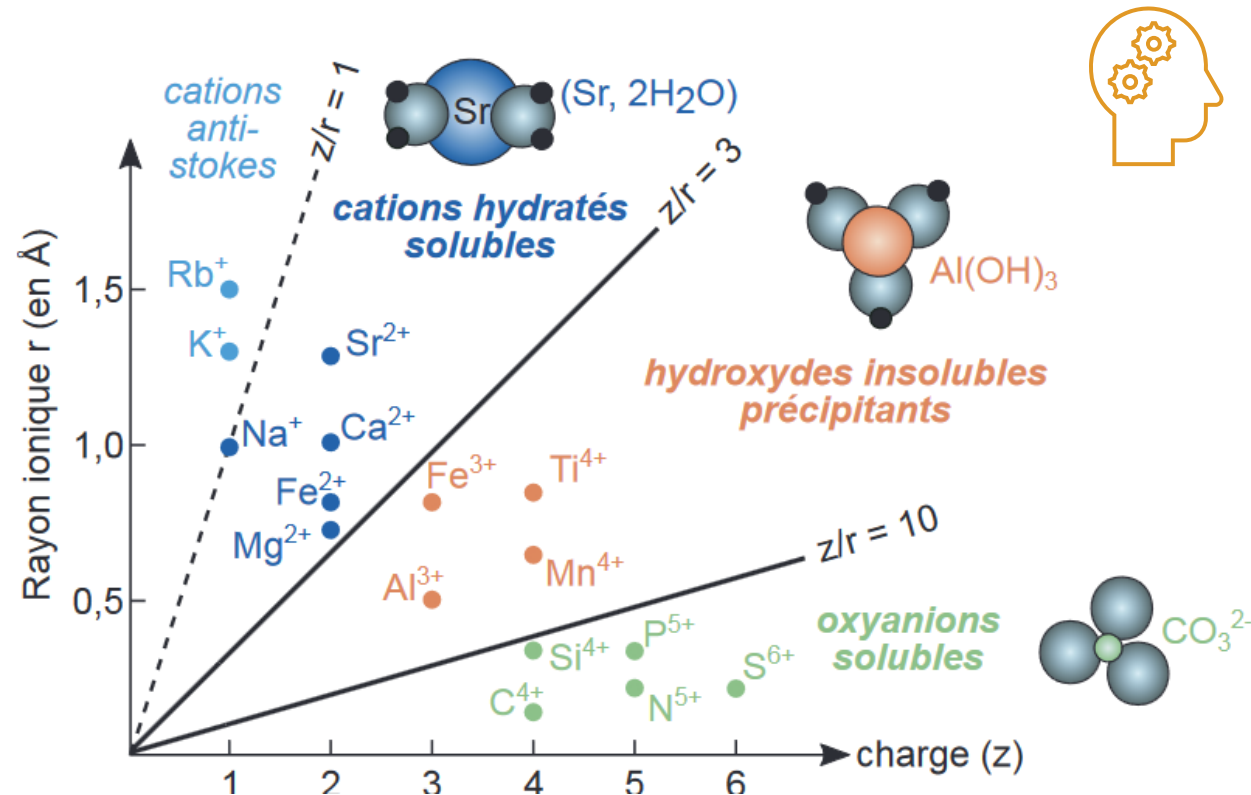


Diagramme de Goldschmidt (1937) (source : Dunod, ed. 2021)
Solubilité dans l'eau des cations en fonction de leur charge (en abscisses) et de leur rayon (en ordonnée) définissant le potentiel ionique (z/r) précisant ainsi le devenir des éléments chimiques suite à l'hydrolyse des minéraux.

E. L'ALTERATION CHIMIQUE DES ROCHES

3. L'hydrolyse des silicates par l'eau

3.1. Le comportement des ions dans l'eau

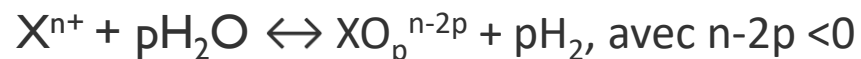
- **champ des cations solubles à $z/r < 3$** : charge faible et rayon ionique important



- **champ des hydrolysats : $3 < z/r < 10$** : rupture d' $H_2O \Rightarrow$ hydrolysats insolubles



- **champ des complexes anioniques solubles : $z/r > 10$** : attraction tellement forte sur dipôle $H_2O \Rightarrow O^{2-}$ est annexé par le cation \Rightarrow oxyanions très solubles dans l'eau



***Hydrolyse** : Processus par lequel un cation d'un minéral est remplacé par le H^+ d'une solution acide. Cette réaction a pour conséquence de détruire le minéral (mise en solution complète) ou de le convertir en une nouvelle espèce.

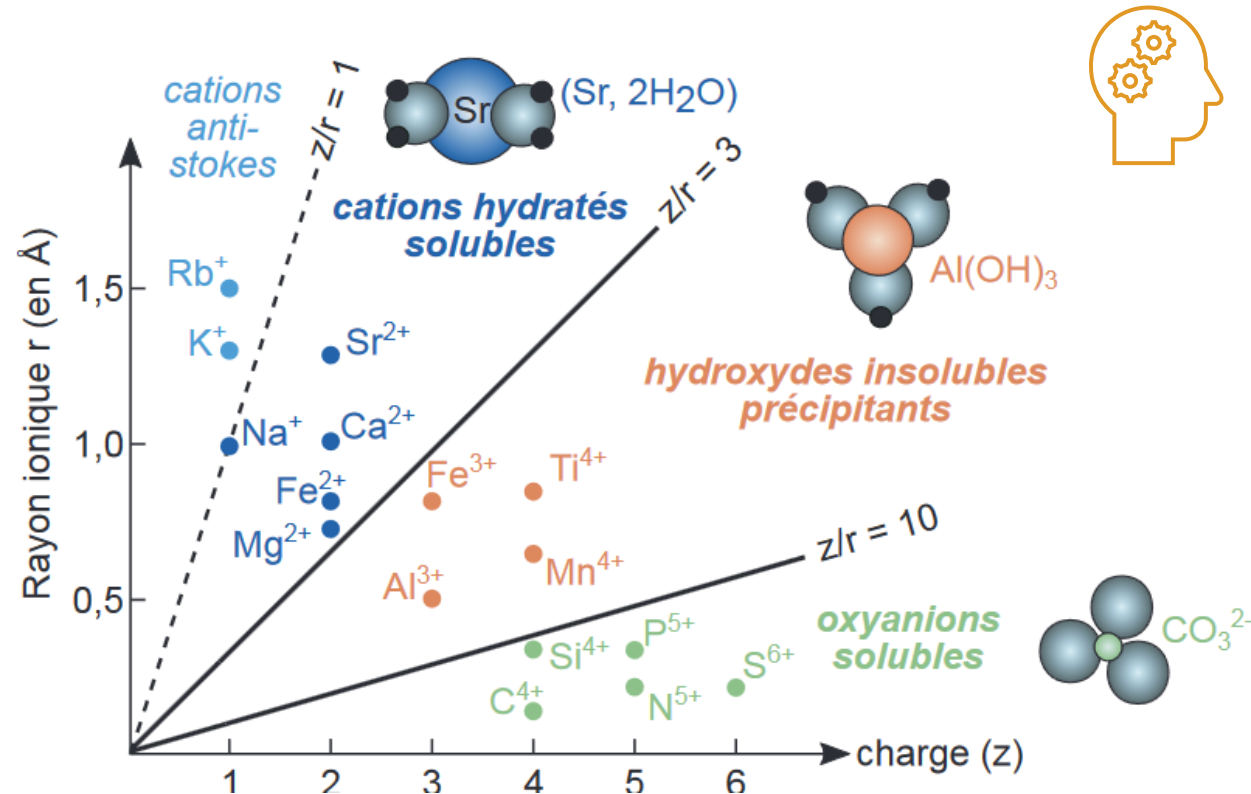


Diagramme de Goldschmidt (1937) (source : Dunod, ed. 2021)
Solubilité dans l'eau des cations en fonction de leur charge (en abscisses) et de leur rayon (en ordonnée) définissant le potentiel ionique (z/r) précisant ainsi le devenir des éléments chimiques suite à l'hydrolyse des minéraux.

E. L'ALTERATION CHIMIQUE DES ROCHES

3. L'hydrolyse des silicates par l'eau

3.1. Le comportement des ions dans l'eau

■ Altération → tri géochimique :

➤ **Silicates les plus altérables** (hydrolysés) riches en cations les plus solubles: **biotite > plagio > orthose**

✓ cations évacués par les eaux de lessivage

➤ **Quartz inaltérable** car sans cations externes

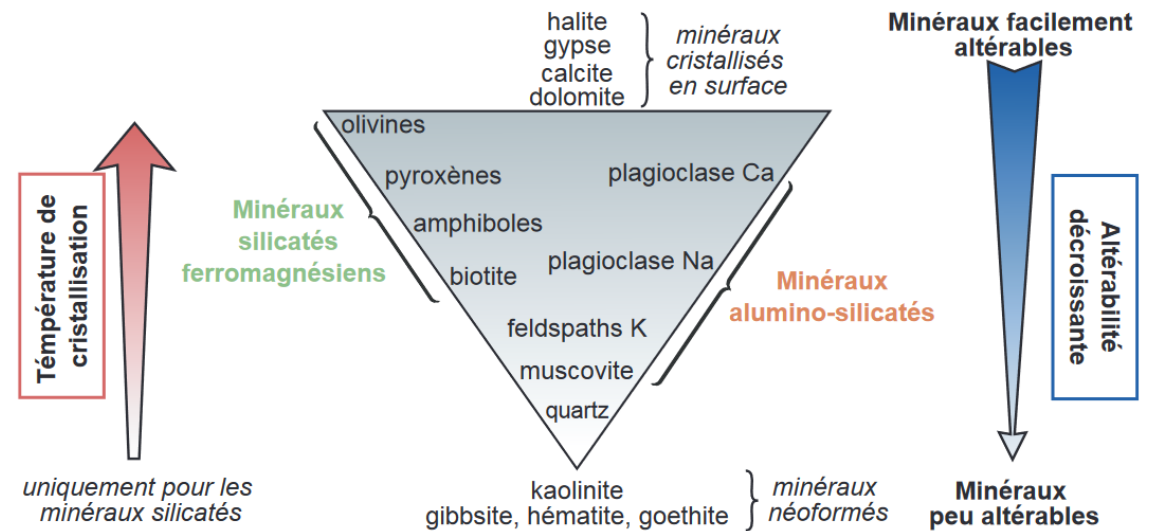
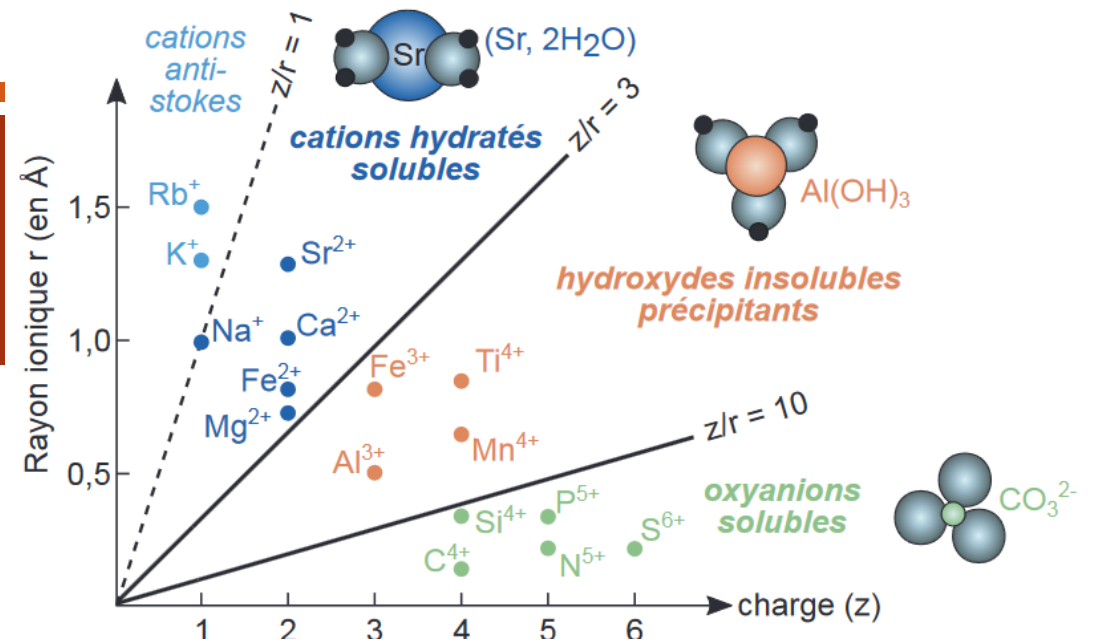
■ **Ordre d'altération inverse de l'ordre de cristallisation** des minéraux lors du refroidissement d'un magma (série de Bowen cours BCPST2)

■ minéraux formés à HT sont, en surface dans des conditions très éloignées de leur genèse

⇒ olivine et plagio calciques faciles à altérer

⇒ orthose et surtout quartz difficile

■ Cations insolubles Fe^{3+} et Al^{3+} précipitent sur place sous forme d'hydrolysats : $FeO(OH)$ goethite, et $Al(OH)_3$ gibbsite.



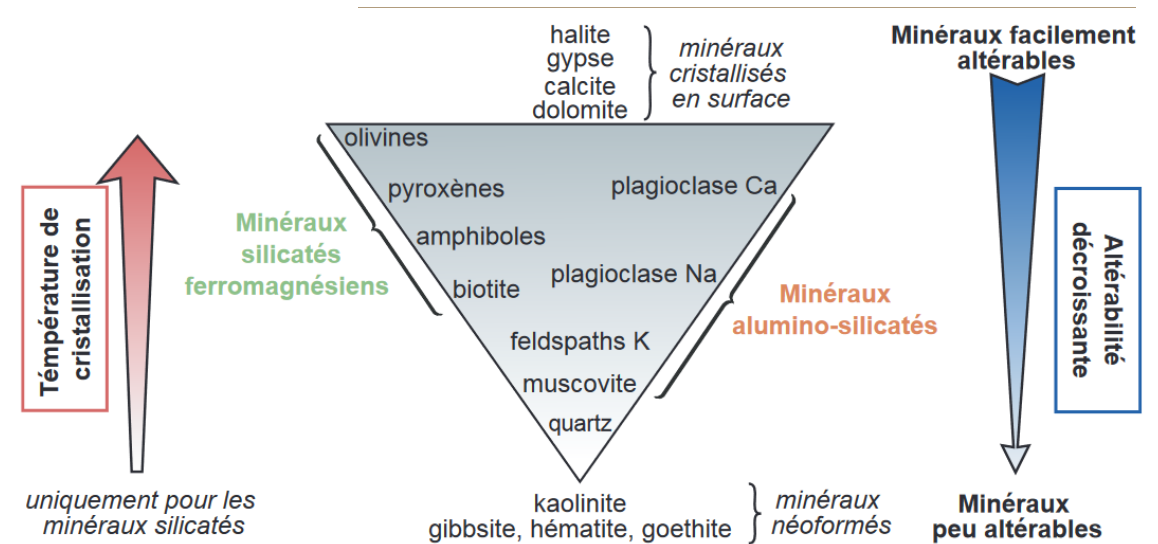
Séquence d'altérabilité des principaux minéraux des roches à l'affleurement. (Modifié d'après Goldich – 1938)(Source Dunod, ed. 2021)

E. L'ALTERATION CHIMIQUE DES ROCHES

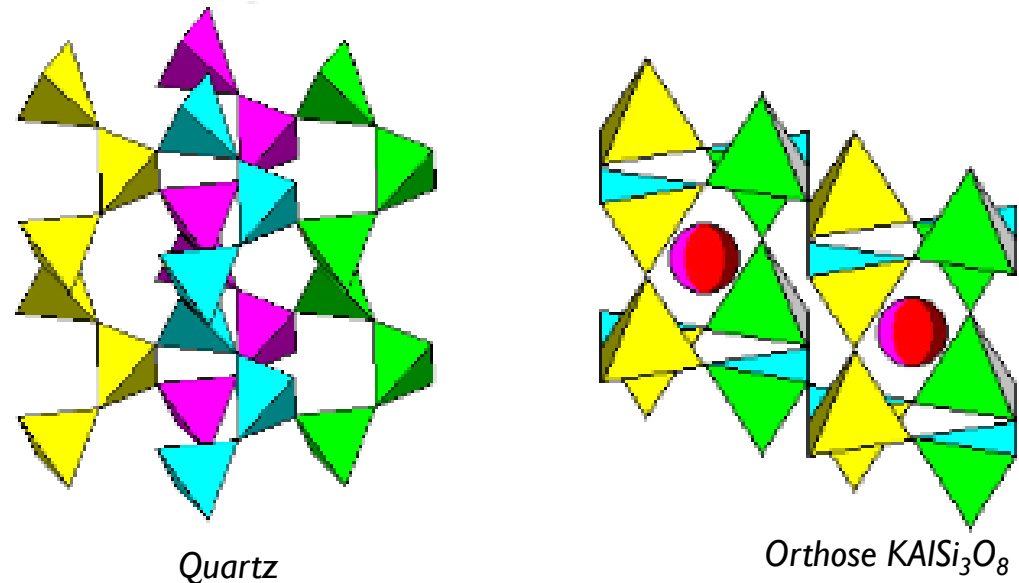
3. L'hydrolyse des silicates par l'eau

3.1. Le comportement des ions dans l'eau

- Comparaison de l'altération chimique du **quartz vs feldspaths** = silicates
- **Quartz et feldspaths: tétraèdres liés par leurs 4 sommets**
 - **tectosilicates**
- Quartz:
 - ✓ Neutralisation complètement assurée par la polymérisation
 - ✓ **Pas de cations compensateurs**
- Feldspath (ici orthose):
 - ✓ Certains tétraèdres voient leur Si substitué par Al
 - ⇒ charge + manquante
 - ⇒ **Compensation par K⁺**
 - ⇒ ↗ Altérabilité chimique par l'eau



Séquence d'altérabilité des principaux minéraux des roches à l'affleurement. (Modifié d'après Goldich – 1938)(Source Dunod. ed. 2021)



E. L'ALTERATION CHIMIQUE DES ROCHES

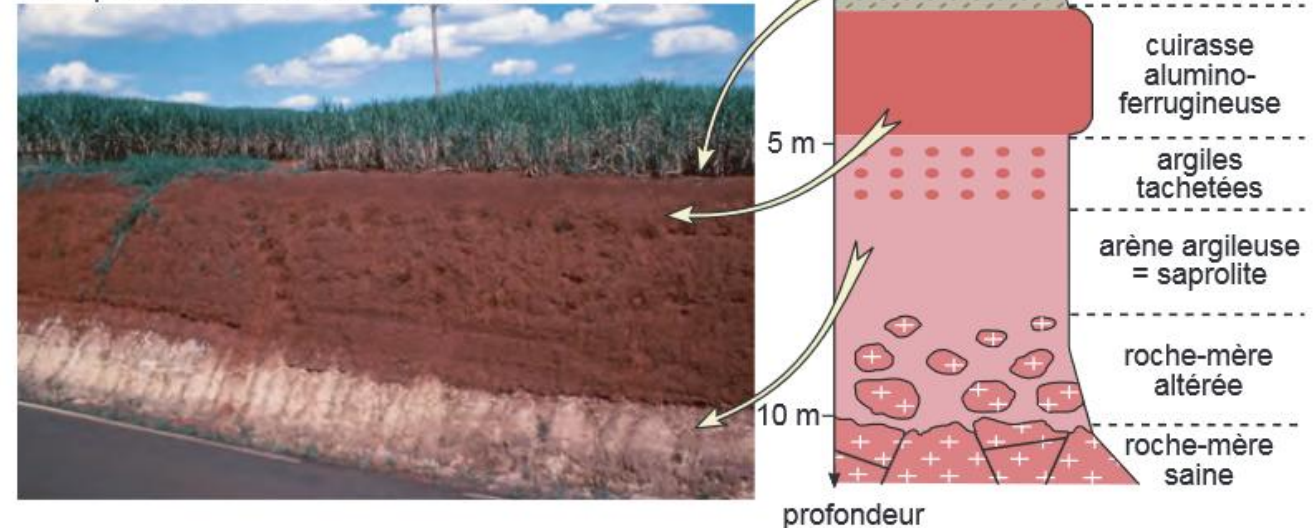
3. L'hydrolyse des silicates par l'eau



3.1. Le comportement des ions dans l'eau

- **Bilan** : à partir d'un stock d'éléments chimiques d'une roche, l'altération conduit donc à une **ségrégation ionique** :
 - cations et les **oxyanions** solubles évacués par les circulations d'eau (= **phase migratrice**)
 - **hydrolysats insolubles** restent sur place (= **phase résiduelle**).
- Dans les conditions naturelles (pH compris entre 5 et 7,5):
 - silice évacuée
 - Phase résiduelle: gibbsite $\text{Al}(\text{OH})_3$, goéthite $\text{FeO}(\text{OH})$
 - ⇒ processus de **latéritisation** (later = brique)

(b) Altération en milieu tropical humide
Température moyenne annuelle $T = 27^\circ\text{C}$,
Précipitations $P = 2500$ à 4500 mm/an



E. L'ALTERATION CHIMIQUE DES ROCHES

3. L'hydrolyse des silicates par l'eau

3.2. Altération chimique des minéraux silicatés

■ Bilan sur l'altérabilité des minéraux :

➤ **quartz** = **tectosilicate** = tétraèdres polymérisés dans les 3 dimensions. La formule structurale contient le motif $[\text{SiO}_2]$. Le **quartz sans cations extérieurs est le moins altérable**.

✓ *neutralisation complètement assurée par la polymérisation → pas de cations compensateurs.*

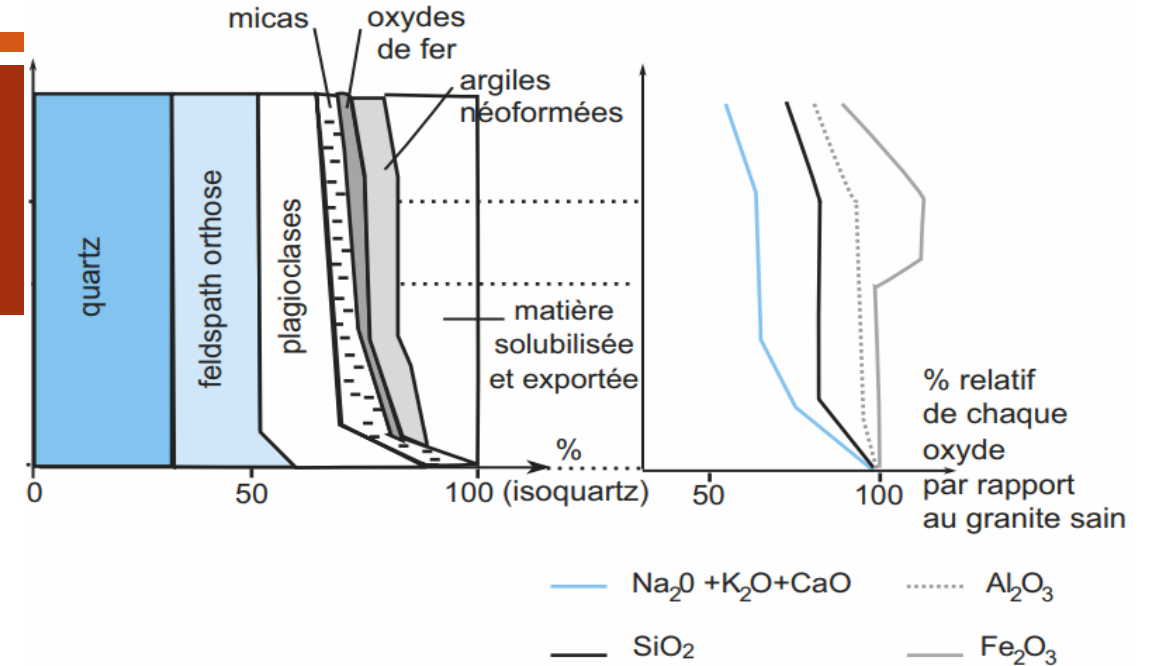
➤ Fd = tectosilicate mais certains Si^{4+} sont remplacés par Al^{3+} (orthose = KAlSi_3O_8).

➤ **pyroxène** = **inosilicate** en chaîne simple

✓ *neutralisation des $[\text{Si}_2\text{O}_6]^{4-}$ assurée par la polymérisation et par des cations { orthopyroxène : $(\text{Fe},\text{Mg})\text{SiO}_3$, clinopyroxène $\text{Ca}(\text{Fe},\text{Mg})\text{Si}_2\text{O}_6$ }*

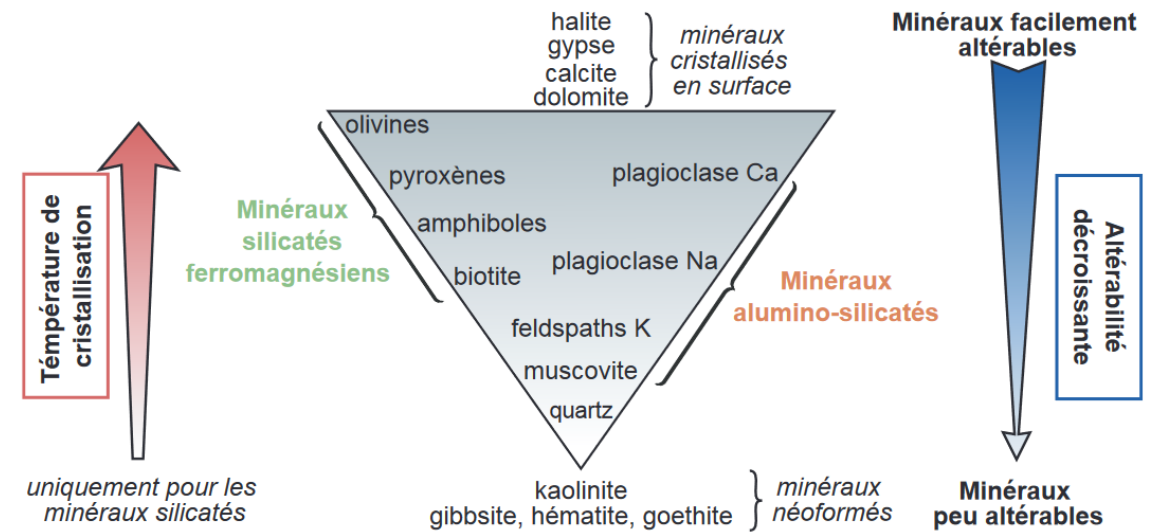
➤ **olivines** $[(\text{Fe},\text{Mg})_2\text{SiO}_4]$ = **néosilicates** tétraèdres isolés possèdent 2 cations pour 1 tétraèdre : ils sont plus altérables que les pyroxènes (1 cation pour 1 tétraèdre).

➤ **amphibole** = **inosilicate** en chaîne double, d'où présence de cations pour assurer la neutralisation (en + de la polymérisation) : ex de l'hornblende : $[\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2\text{Na}_2\text{Mg}_3\text{Al}_2]$.



(b) ÉVOLUTION MINÉRALOGIQUE

(c) ÉVOLUTION CHIMIQUE

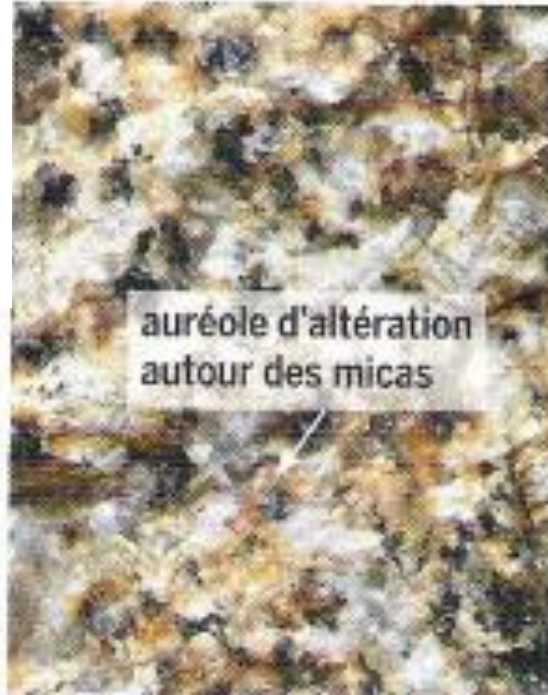
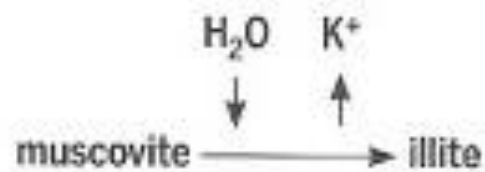


E. L'ALTERATION CHIMIQUE DES ROCHES

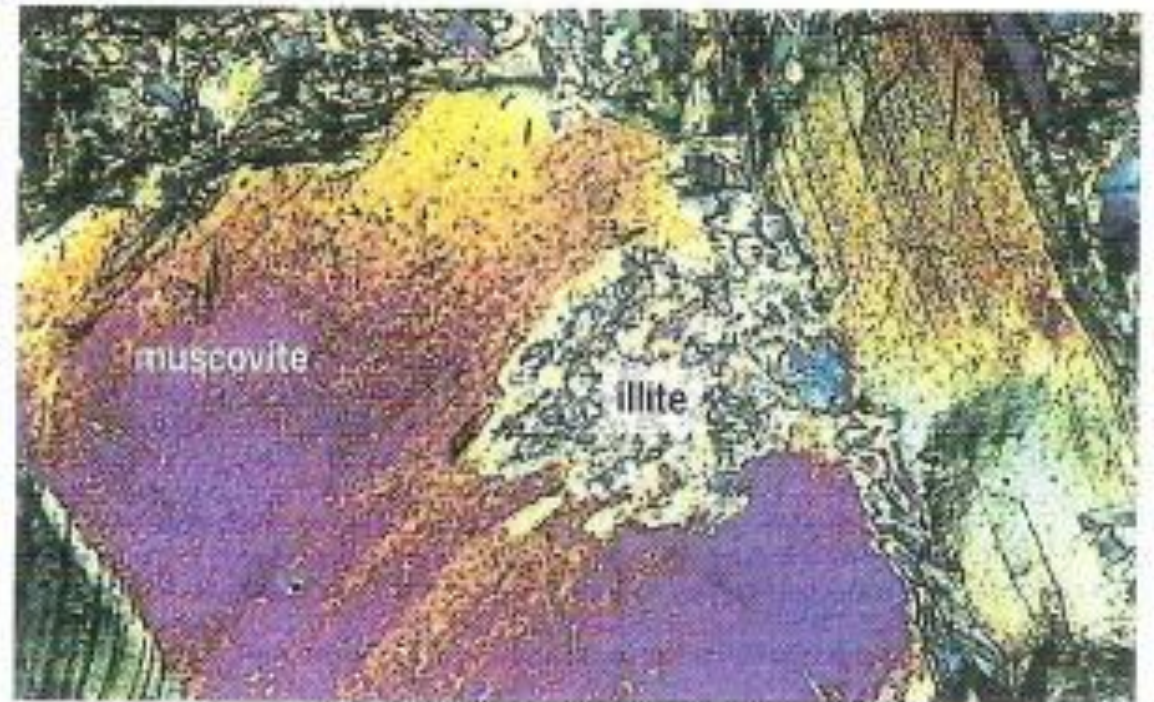
3. L'hydrolyse des silicates par l'eau

3.2. Altération chimique des minéraux silicatés

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



Granite altéré observé à l'œil nu

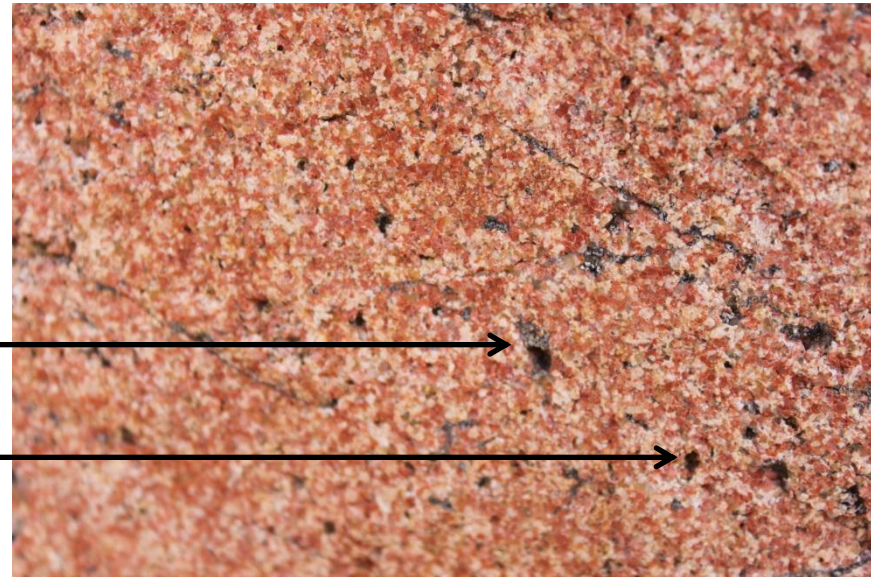


Lame mince d'un granite altéré observée au microscope en lumière polarisée analysée

MISE EN ÉVIDENCE D'UNE ÉROSION DIFFÉRENTIELLE SUR LE GRANITE ROSE DE BRÉHAT



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

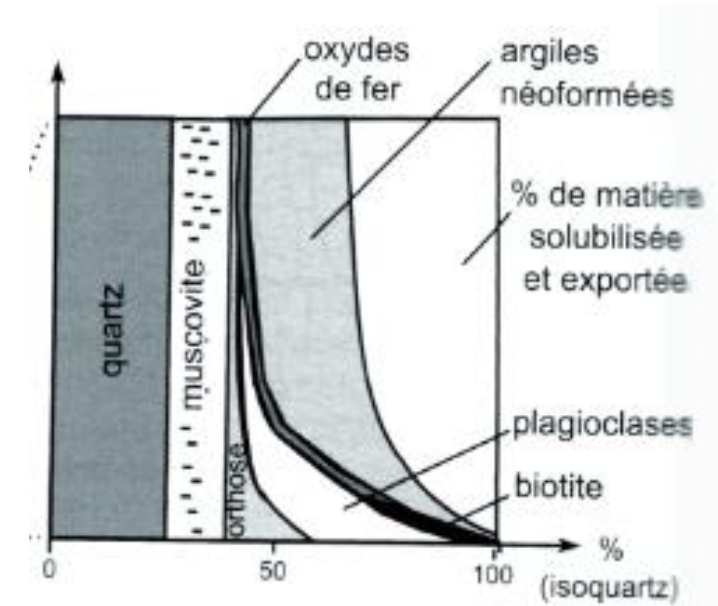
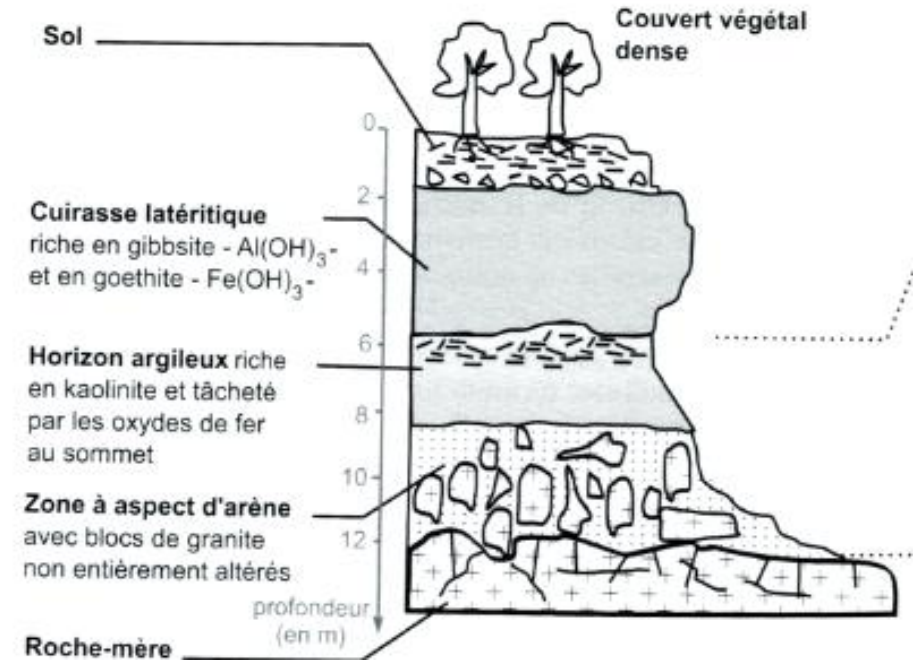


E. L'ALTERATION CHIMIQUE DES ROCHES

3. L'hydrolyse des silicates par l'eau

3.3. Altération de l'orthose selon le climat

- Altération des granites: disparition des feldspaths // apparition des argiles → **argilisation**.
- Orthose (KAlSi_3O_8) en surface → conditions physico-chimiques très différentes de son milieu de formation
- Orthose: minéral le plus abondant dans roches magmatiques et métamorphiques
 - ⇒ attraction électrostatique des cations
 - ⇒ cations déchaussés de la charpente silicatée
 - ⇒ entrent en solution si solubles
 - ⇒ remplacés par H^+ provenant de l'eau, plus petit
 - ⇒ charpente silicatée déstabilisée
 - ⇒ minéral détruit
 - ⇒ Minéral transformé en argile

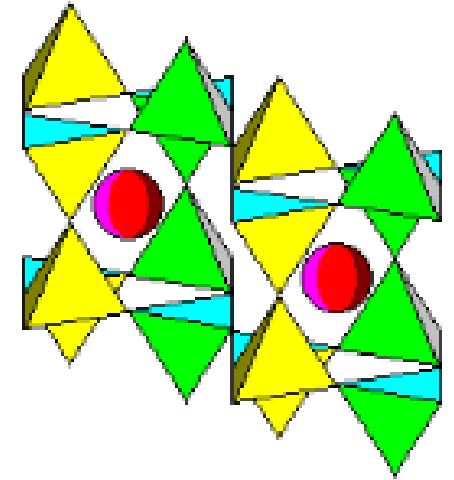


E. L'ALTERATION CHIMIQUE DES ROCHES

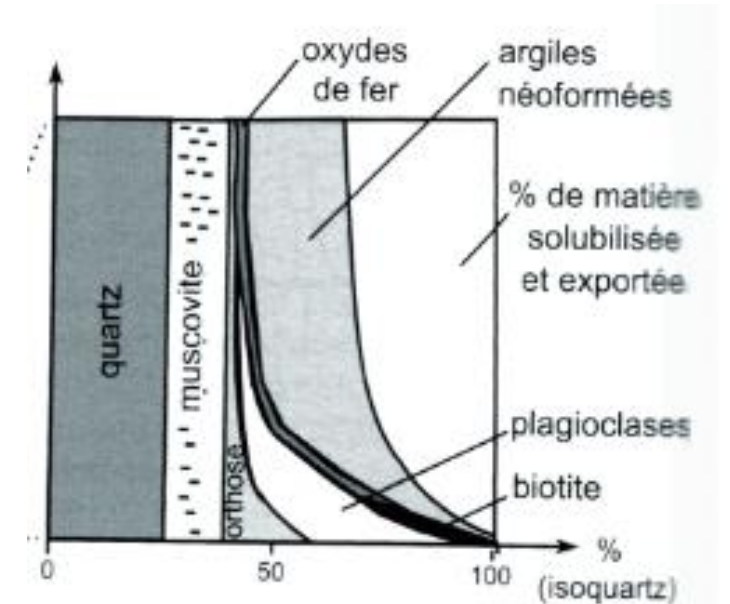
3. L'hydrolyse des silicates par l'eau

3.3. Altération de l'orthose selon le climat

- Rappel de minéralogie:
 - tectosilicates
 - charpente de tétraèdres à cœur de silice et d'alumine (1 Si^{4+} sur 4 est substitué par Al^{3+})
 - charpente soutenue par des K^+ (compensation du déficit de charge) dû au remplacement de Si^{4+} par Al^{3+}
 - Chaque cation K^+ placé à l'intérieur du réseau de tétraèdre pas fortement retenu dans le treillis
⇒ disparition fera s'effondrer l'édifice
- Effet de l'eau sur le réseau cristallin :
 - molécules d'eau orientent leur charge + vers le cristal (O^- à valence non satisfaite en surface)
 - ions H^+ suffisamment petits pour pénétrer dans les interstices du réseau cristallin
 - ⇒ excès de charge positive
 - ⇒ expulsion de K^+ (ssi $[\text{K}^+]$ faible à l'extérieur donc ssi drainage)
 - réaction d'échange se poursuit avec les Si (suite à la déstabilisation des cristaux par perte des K^+)
 - Enfin échange avec les ions Al^{3+} qui forment des précipités
- Bilan: **dégradation des silicates dépend du taux de remplacement de Si par Al.**



Orthose KAlSi_3O_8



L'anorthite ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), 2 Si sur 4 sont remplacées par Al, est plus fragile que l'orthose KAlSi_3O_8

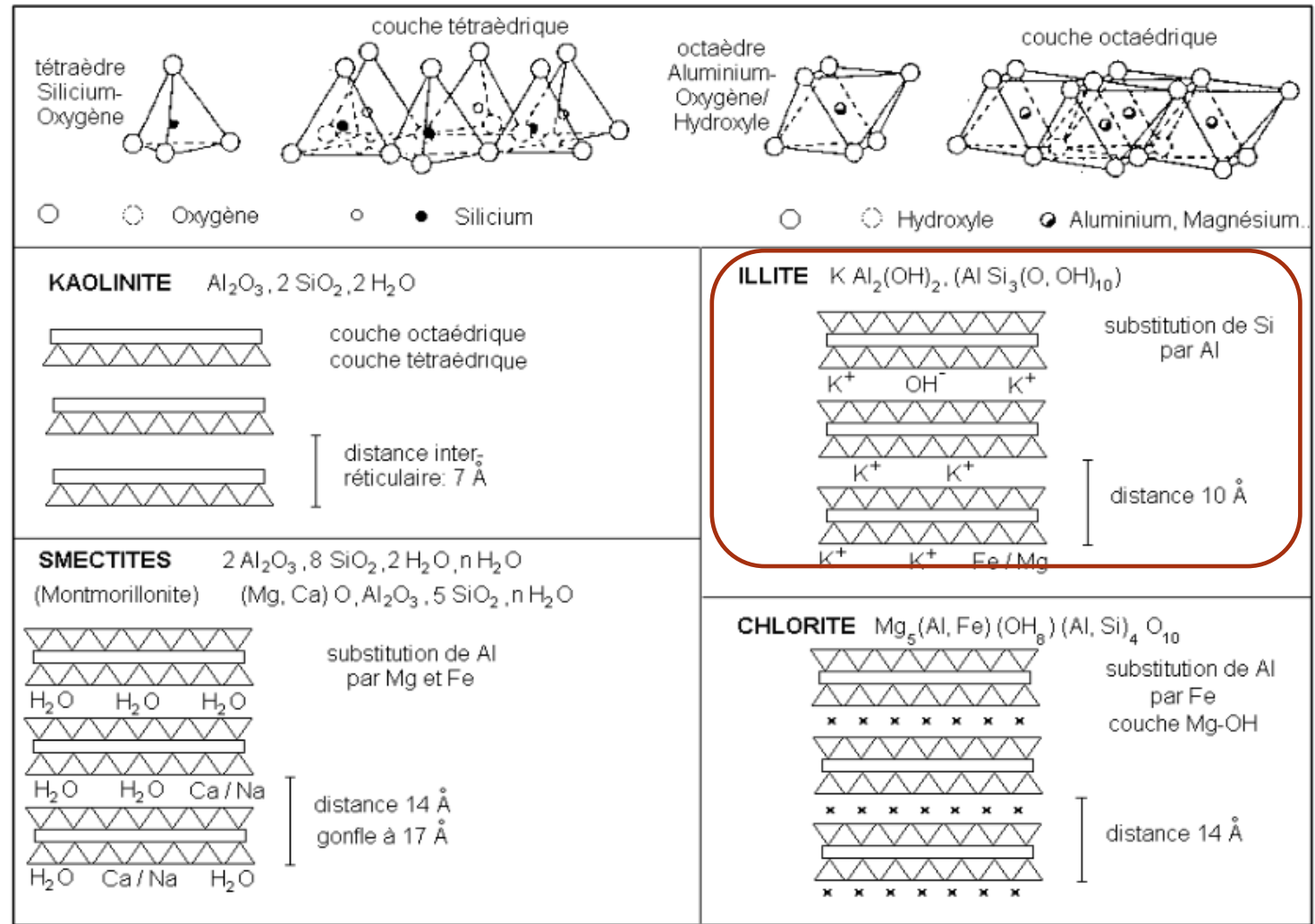
E. L'ALTERATION CHIMIQUE DES ROCHES

3. L'hydrolyse des silicates par l'eau

3.3. Altération de l'orthose selon le climat

En climat tempéré : une hydrolyse modérée de l'orthose : la bisiallisation

- **Bisiallisation** : restent 2 Si pour 1 Al
- **Argile TOT (illite)** :
 - une couche d'**Octaèdres à cœur d'Al³⁺**
 - 2 couches de **Tétraèdre à cœur de Si⁴⁺**
- Dégradation partielle du Feldspath avec **lessivage de la plupart des cations extérieurs** aux tétraèdres et de **60% des ions Si**.
- Réseau en charpente des feldspaths (**tectosilicates**) → réseau à **tétraèdres en feuillets (phyllosilicates)** caractéristique des argiles.
- **Composition initiale AlSi₃** (+ O + cations extérieurs) → **AlSi₂ = argile 2/1 de type illite**.
 - maille de type **TOT**
- **Altération ménagée**.



structure cristallographique des minéraux argileux (Beauchamp, 2005)



orthose + solution d'attaque → illite + silicium + potassium (ions des solutions de lessivage)

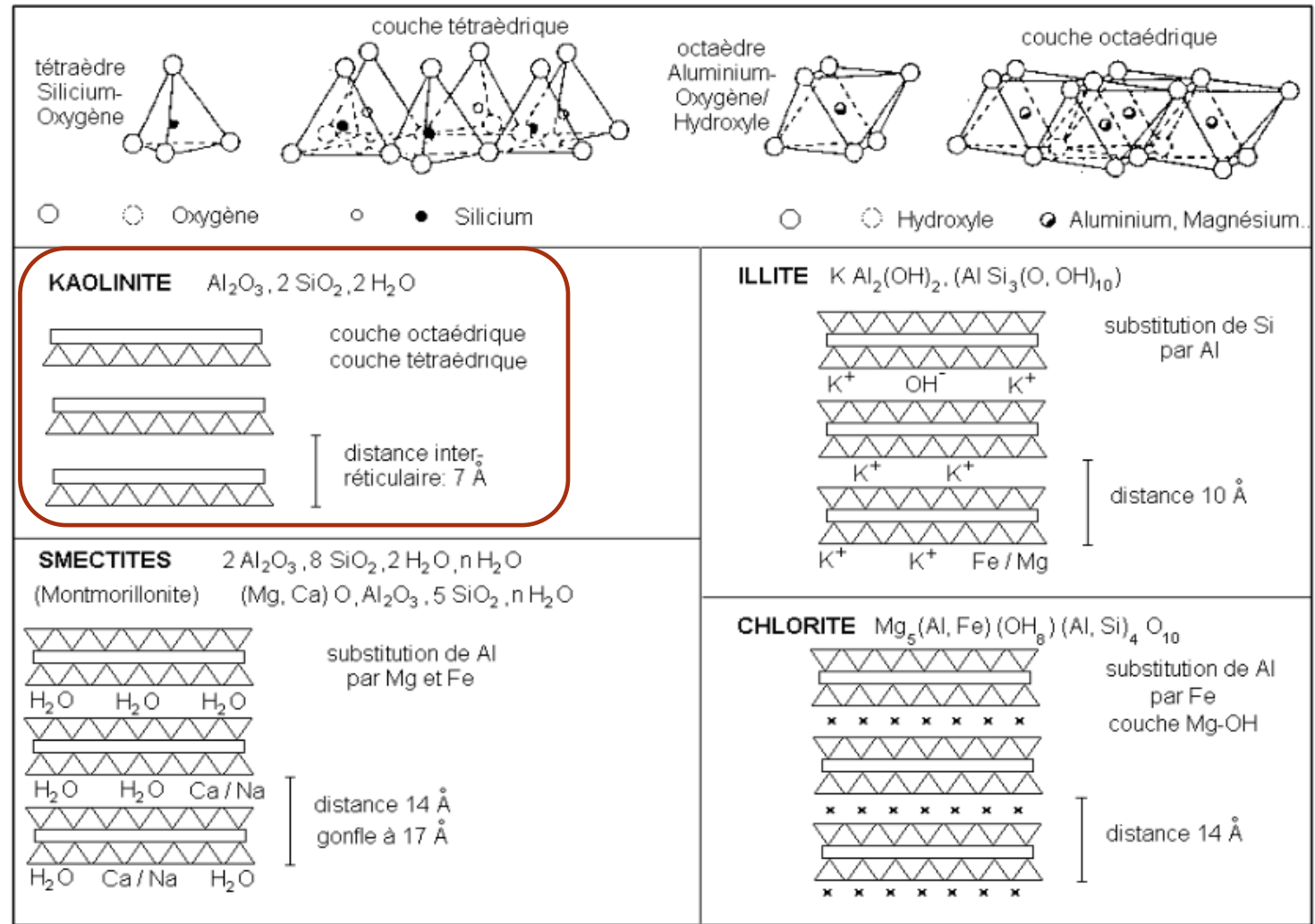
E. L'ALTERATION CHIMIQUE DES ROCHES

3. L'hydrolyse des silicates par l'eau

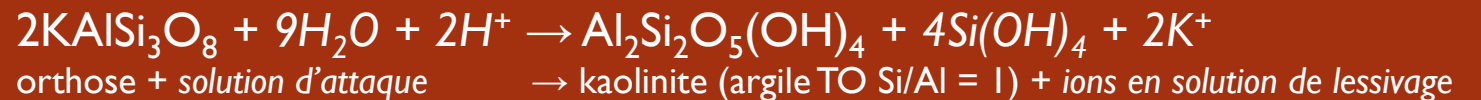
3.3. Altération de l'orthose selon le climat

En climat tropical : une hydrolyse plus poussée de l'orthose : la monosiallisation

- **Monosiallisation = kaolinisation** : reste 1 Si pour 1 Al
- **Argile TO :**
 - une couche d'**Octaèdres à cœur d'Al³⁺**
 - une couche de **Tétraèdre à cœur de Si⁴⁺**
- **Tous les cations extérieurs** aux tétraèdres (K⁺) et 2/3 des ions Si sont lessivés
- **Composition initiale AlSi₃** (+ O + cations extérieurs) → **AlSi = argile I/I de type kaolonite**
 - maille de type **TO**
- **Altération moyenne.**



structure cristallographique des minéraux argileux (Beauchamp, 2005)



E. L'ALTERATION CHIMIQUE DES ROCHES

3. L'hydrolyse des silicates par l'eau

3.3. Altération de l'orthose selon le climat

En climat équatorial : une hydrolyse totale de l'orthose : l'allitisation

- **Allitisation = latéritisation:** reste 0 Si , uniquement Al
- **Tous les cations extérieurs** aux tétraèdres (K^+) et tous les ions Si sont lessivés
- **Composition initiale $AlSi_3$** (+ O + cations extérieurs) → 0 Si/Al = 0 → allitisation
- **Précipitation des hydrolysats insolubles ($3 < z/r < 10$)**
- **Altération forte (climat chaud et humide)**



Orthose + solution d'attaque → gibbsite (minéral néoformé : hydroxyde d'aluminium Si/Al=0) + ions des solutions de lessivage

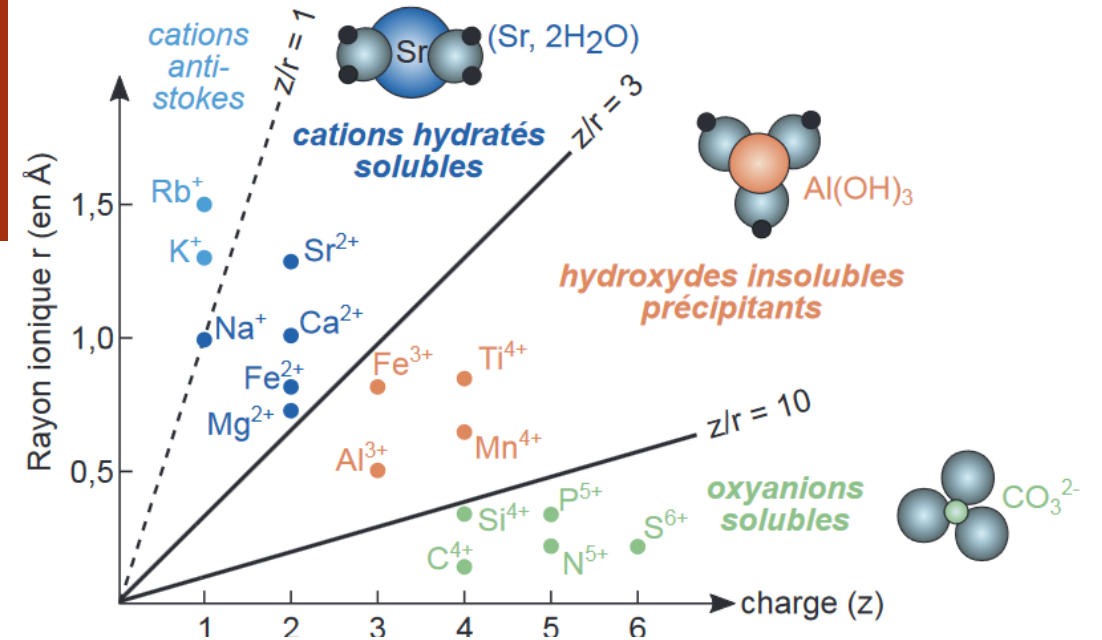
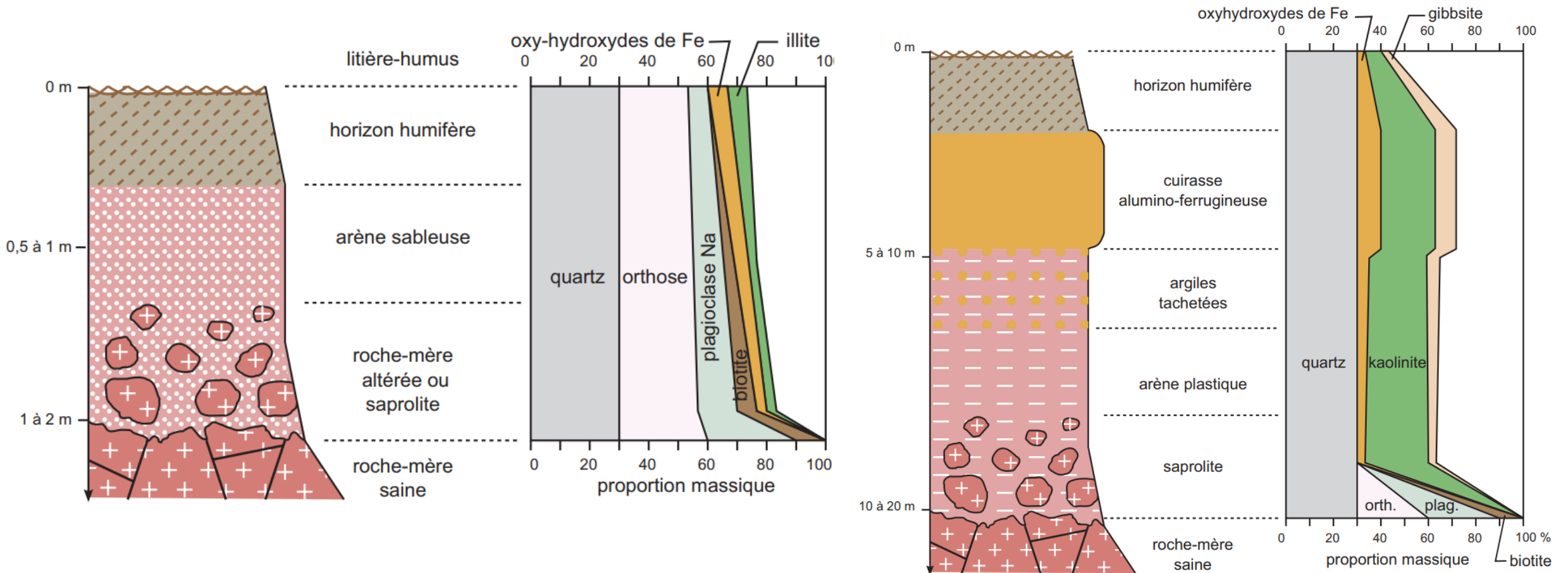


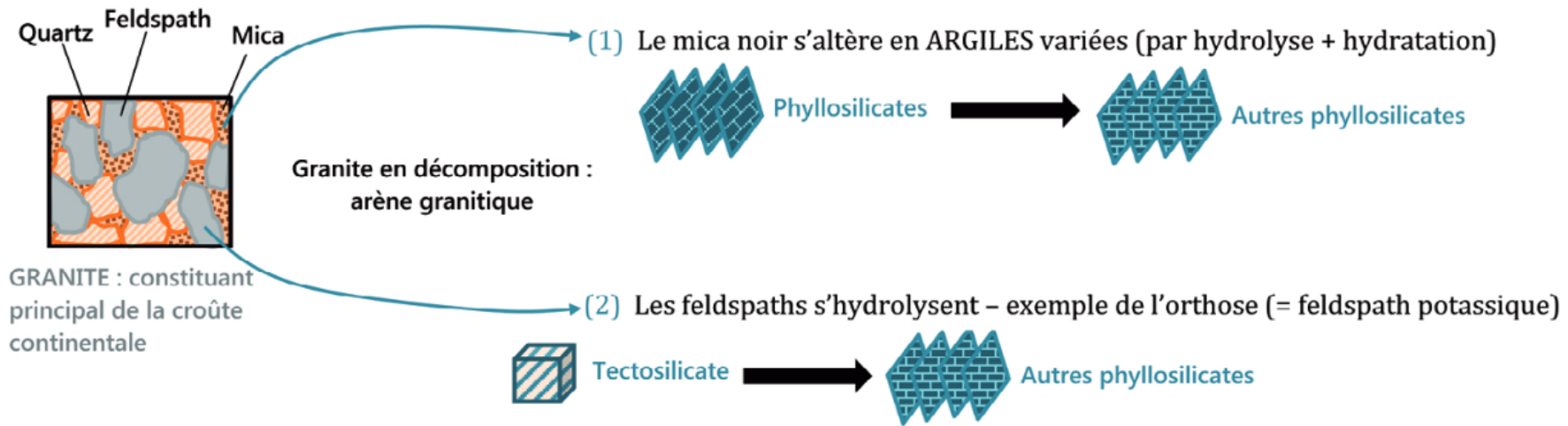
Diagramme de Goldschmidt (1937) (source : Dunod, ed. 2021)

E. L'ALTERATION CHIMIQUE DES ROCHES

3. L'hydrolyse des silicates par l'eau

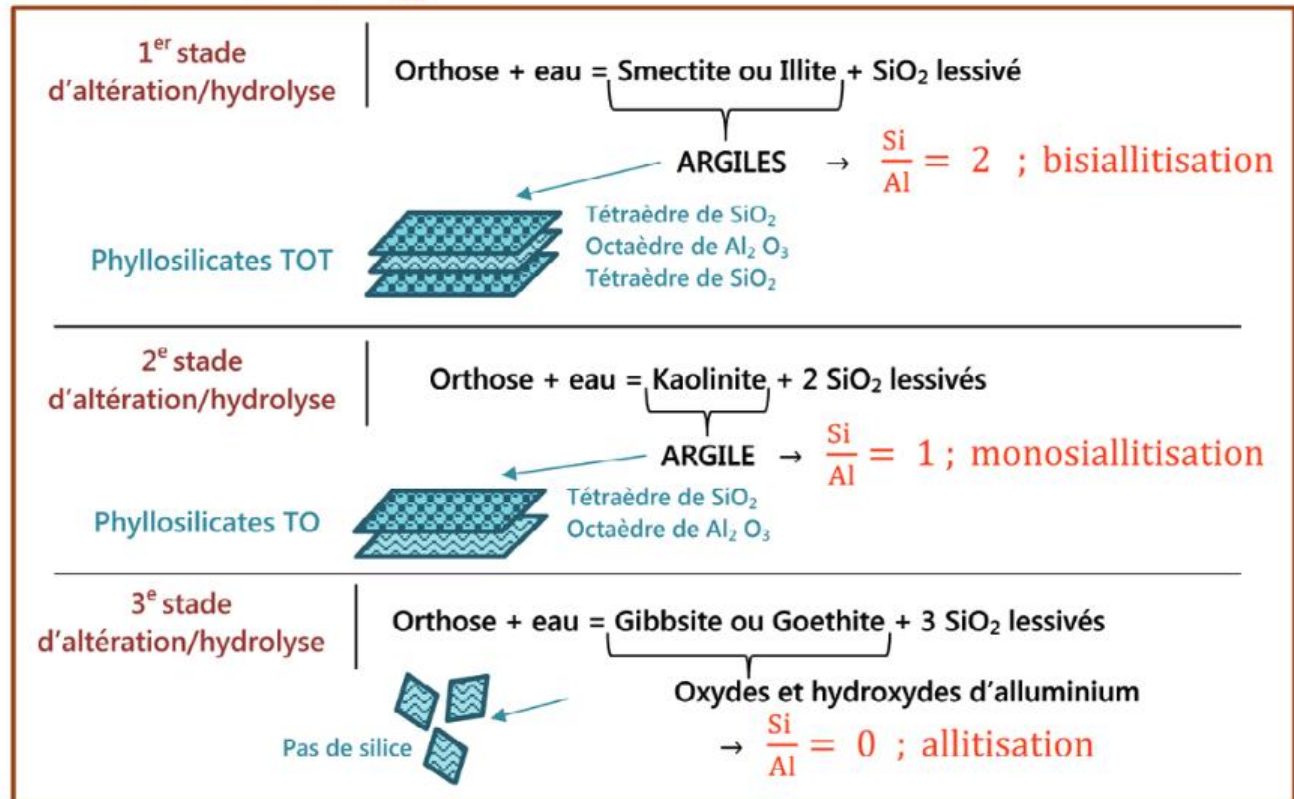


Bilan sur l'hydrolyse d'une orthose en fonction du climat



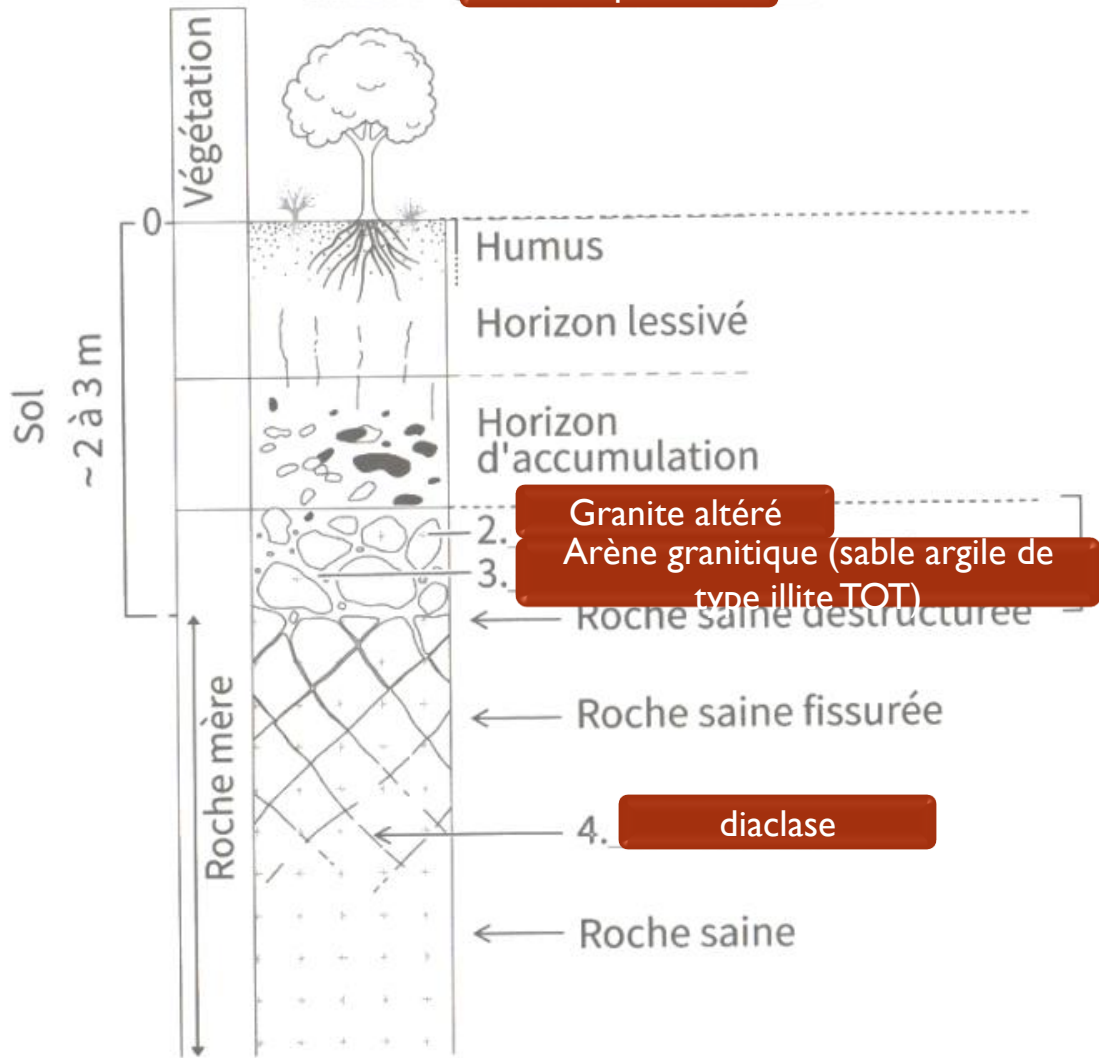
ORTHOSE $KAlSi_3O_8$: rapport $\frac{Si}{Al} = 3$

LESSIVAGE DE LA SILICE

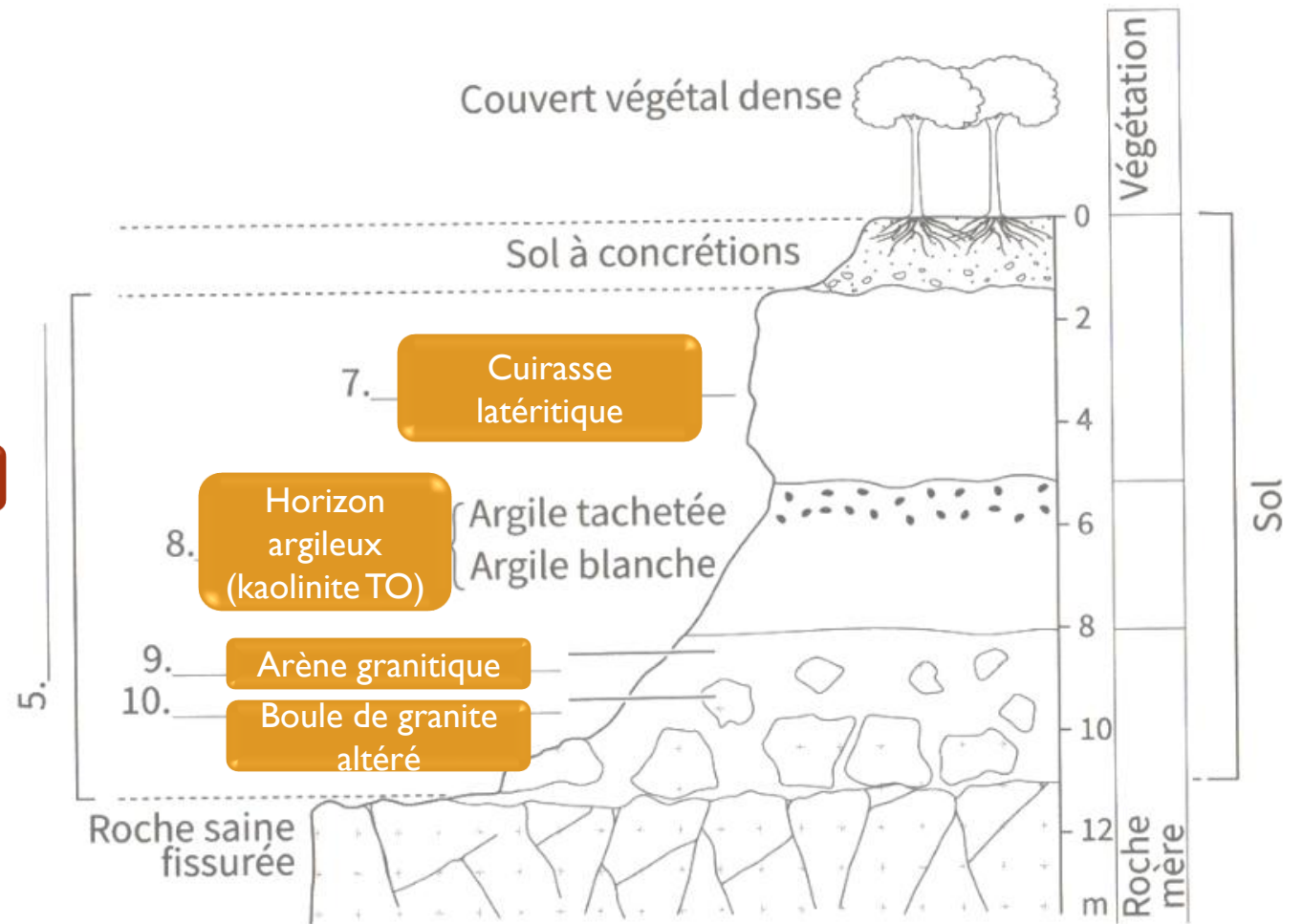


Bilan sur l'altération progressive du granite
(source: Vuibert, ed. 2021)

Climat 1. **tempéré**



Climat 6. **équatorial**

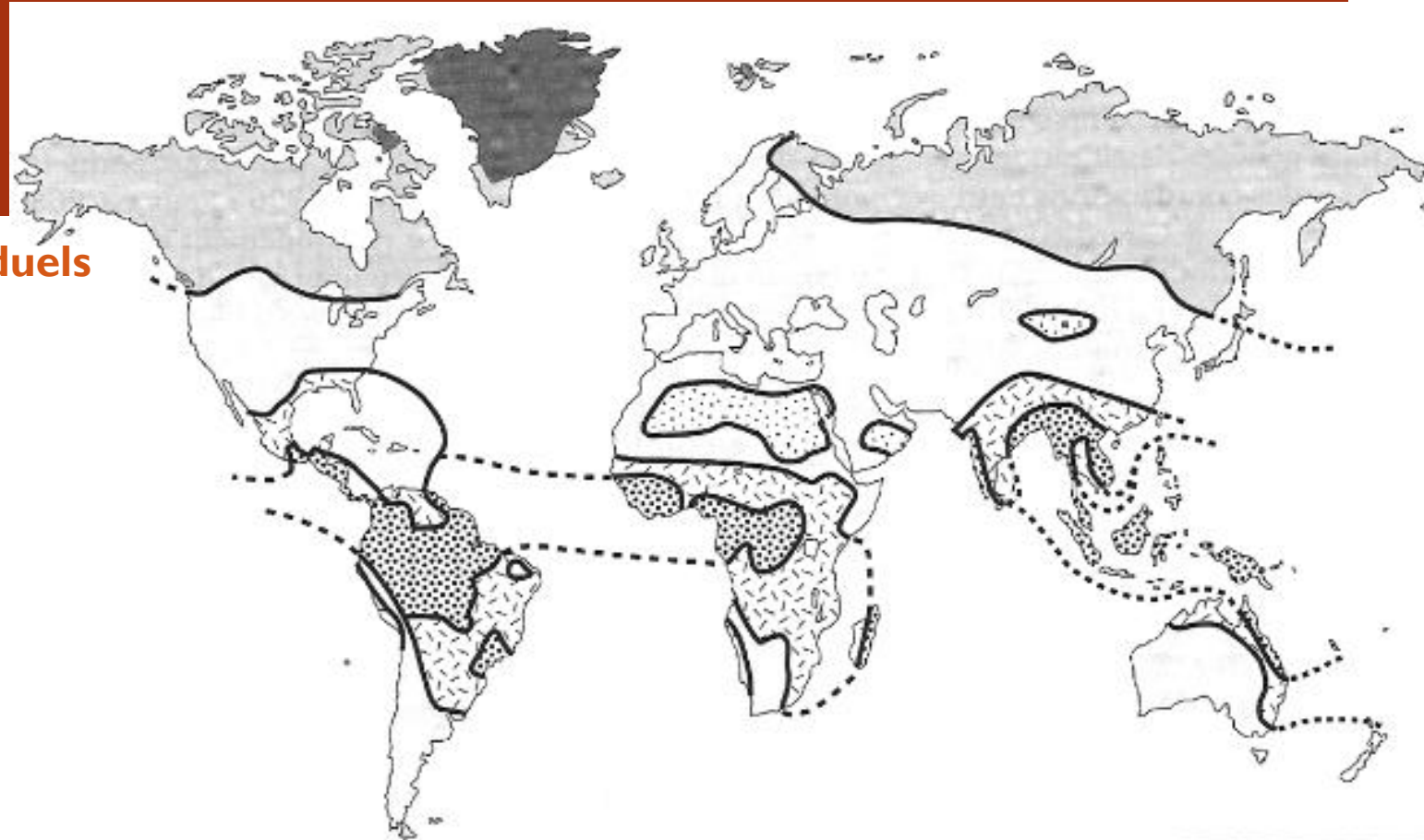


E. L'ALTERATION CHIMIQUE DES ROCHES

3. L'hydrolyse des silicates par l'eau

3.3. Distribution climatique des sols résiduels

- Roches soumises à l'altération → recouvertes par des sols résiduels
- Fraction minérale des sols = minéraux non altérés (Quartz) + minéraux en cours de dégradation : argiles 2/1 ; 1/1, 0/1 et d'hydroxydes d'aluminium et de fer.
 - **Région polaire : peu ou pas d'altération** ($T^{\circ}\text{C}$ très basse, pas d'eau liquide).
 - **Région tempérée** : $T^{\circ}\text{C}$ et pluviométrie moyennes. Sols variés toujours caractérisés par de l'**illite** (2/1).
 - **Région désertique** : Pas d'hydrolyse car pas d'eau. **Pas d'altération**, sols à minéraux bruts.
 - **Région tropicale** : $T^{\circ}\text{C}$ élevée, alternance de saisons sèches et humides. **Sols épais à kaolinites 1/1 et hydroxydes de fer et d'aluminium ($\text{Al}(\text{OH})_3$)**. Le fer est à l'état Fe^{3+} insoluble.
 - **Région équatoriale** : $T^{\circ}\text{C}$ élevée, forte pluviométrie. **Hydrolyse totale sur grande épaisseur** : même quartz dissout. **Allitisation et ferrallitisation** → sols latéritiques
 - ✓ Si^{4+} , Al^{3+} , Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^{+} et Na^{+} libérés des réseaux silicatés et lessivés → nappes souterraines.
 - ✓ oxydes de fer ferrique Fe^{3+} → cuirasse latéritique
 - ✓ élimination secondaire du fer concentre les hydroxydes d'alumine et donne les bauxites latéritiques.



ALTÉRATION PHYSIQUE		TYPES D'ALTÉRATIONS CHIMIQUES	
		PRINCIPAUX PRODUITS MINÉRALOGIQUES	
■ glaciers arctiques (10 %)	minéraux des roches mères	□ podzolisation (15,5 %)	☒ monosiallisation (18 %) kaolinite
☒ déserts (4 %)		□ bisiallition (39 %)	☒ allitisation (13,5 %) kaolinite gibbsite

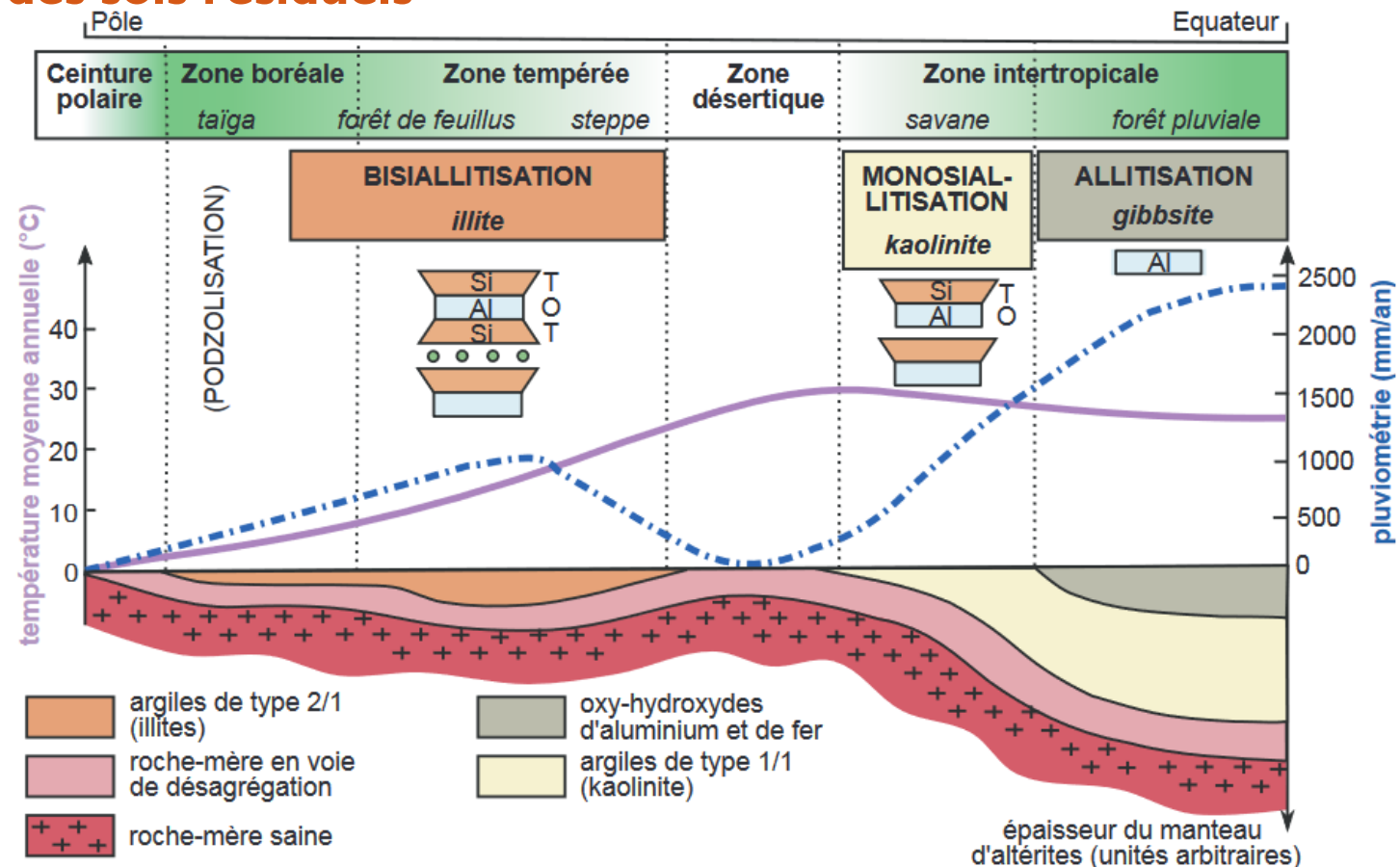
Répartition géographique des différents sols et types d'altérations.
La distribution latitudinale est largement modulée par la morphologie des continents (d'après Pedro, 1968)

E. L'ALTERATION CHIMIQUE DES ROCHES

3. L'hydrolyse des silicates par l'eau



3.3. Distribution climatique des sols résiduels



Les grands types d'altération potentielle sur substratum cristallin granito-gneissique selon la latitude. (D'après Pedro, 1975)(Source : Dunod, ed.2021)

PLAN: CHAPITRE ST-E-I : MODELÉS DES PAYSAGES ET TRANSFERTS DE MATÉRIAUX EN SURFACE I

- I. Facteurs à l'origine du modelé des paysages : altération physique et chimique**
 - A. Etude d'un exemple, le paysage de cuesta à l'Est du Bassin parisien**
 - B. Observation de la diversité de modelé des paysages**
 - 1. Observation d'un granite altéré
 - 2. Observation d'un karst
 - C. les 3 facteurs à l'origine du modelé du paysage**
 - D. L'altération physique des roches, les agents de la désagrégation mécanique des roches**
 - 1. Effets de la température : thermoclastie et cryoclastie
 - 2. Mécanismes dépendant de la gravité
 - 3. L'action de l'eau à l'état solide : exemple des glaciers
 - 4. autres agents de désagrégation mécanique
 - 5. Les conséquences de ces facteurs d'altération varient selon ...
 - E. L'altération chimique des roches**
 - 1. La dissolution des carbonates
 - 2. L'altération des roches silicatées, exemple du granite, une altération par hydrolyse
 - 3. L'hydrolyse des silicates par l'eau
- II. De l'érosion au transport des particules/solutés**
 - A. Diversité des modes et agents de transports**
 - 1. Transport sous forme dissoute
 - 2. Transport en suspension
 - 3. Transport en masse
 - B. Cas du transport des solutés : importance du substrat des bassins versants**
 - C. Cas du transport des particules**

II. DE L'ÉROSION AU TRANSPORT DES PARTICULES/SOLUTES

A. DIVERSITÉ DES MODES ET AGENTS DE TRANSPORTS

I. Transport sous forme dissoute



- actions de l'eau :

- soit par **hydrolyse**

- soit par **dissolution**

solution de lessivage

- matière ensuite **évacuée sous forme dissoute** en suivant le trajet de l'eau.

= **érosion chimique** difficilement distinguable de l'altération chimique

PLAN: CHAPITRE ST-E-I : MODELÉS DES PAYSAGES ET TRANSFERTS DE MATÉRIAUX EN SURFACE I

- I. Facteurs à l'origine du modelé des paysages : altération physique et chimique**
 - A. Etude d'un exemple, le paysage de cuesta à l'Est du Bassin parisien**
 - B. Observation de la diversité de modelé des paysages**
 - 1. Observation d'un granite altéré
 - 2. Observation d'un karst
 - C. les 3 facteurs à l'origine du modelé du paysage**
 - D. L'altération physique des roches, les agents de la désagrégation mécanique des roches**
 - 1. Effets de la température : thermoclastie et cryoclastie
 - 2. Mécanismes dépendant de la gravité
 - 3. L'action de l'eau à l'état solide : exemple des glaciers
 - 4. autres agents de désagrégation mécanique
 - 5. Les conséquences de ces facteurs d'altération varient selon ...
 - E. L'altération chimique des roches**
 - 1. La dissolution des carbonates
 - 2. L'altération des roches silicatées, exemple du granite, une altération par hydrolyse
 - 3. L'hydrolyse des silicates par l'eau
- II. De l'érosion au transport des particules/solutés**
 - A. Diversité des modes et agents de transports**
 - 1. Transport sous forme dissoute
 - 2. Transport en suspension
 - 3. Transport en masse
 - B. Cas du transport des solutés : importance du substrat des bassins versants**
 - C. Cas du transport des particules**

II. DE L'ÉROSION AU TRANSPORT DES PARTICULES/SOLUTES

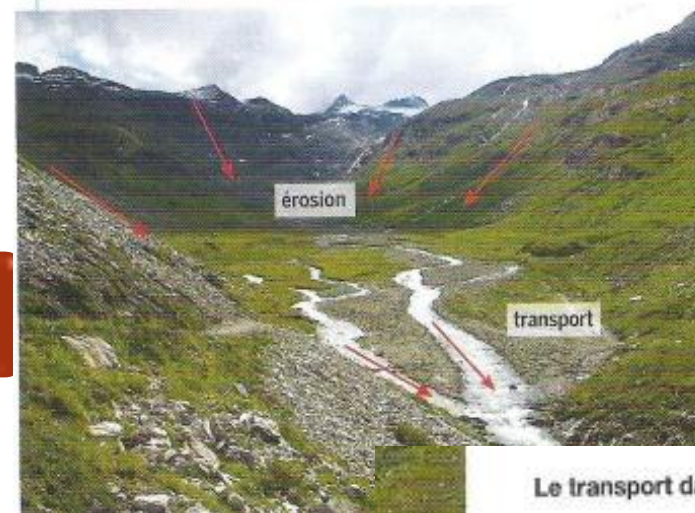
A. DIVERSITE DES MODES ET AGENTS DE TRANSPORTS

2. Transport en suspension

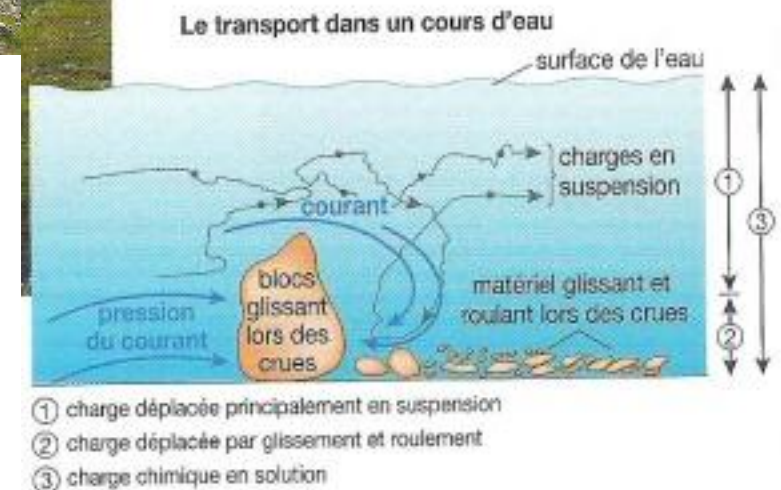


- altération physique des roches → désagrégation mécanique
- altération chimique des roches → formation de **nouvelles phases** généralement de petite taille : les **argiles** (au sens minéralogique) qui peuvent eux aussi être mises en mouvement.
- particules érodées peuvent être transportées sur des distances variables par un fluide = **transport en suspension**.

érosion
mécanique



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



PLAN: CHAPITRE ST-E-I : MODELÉS DES PAYSAGES ET TRANSFERTS DE MATÉRIAUX EN SURFACE I

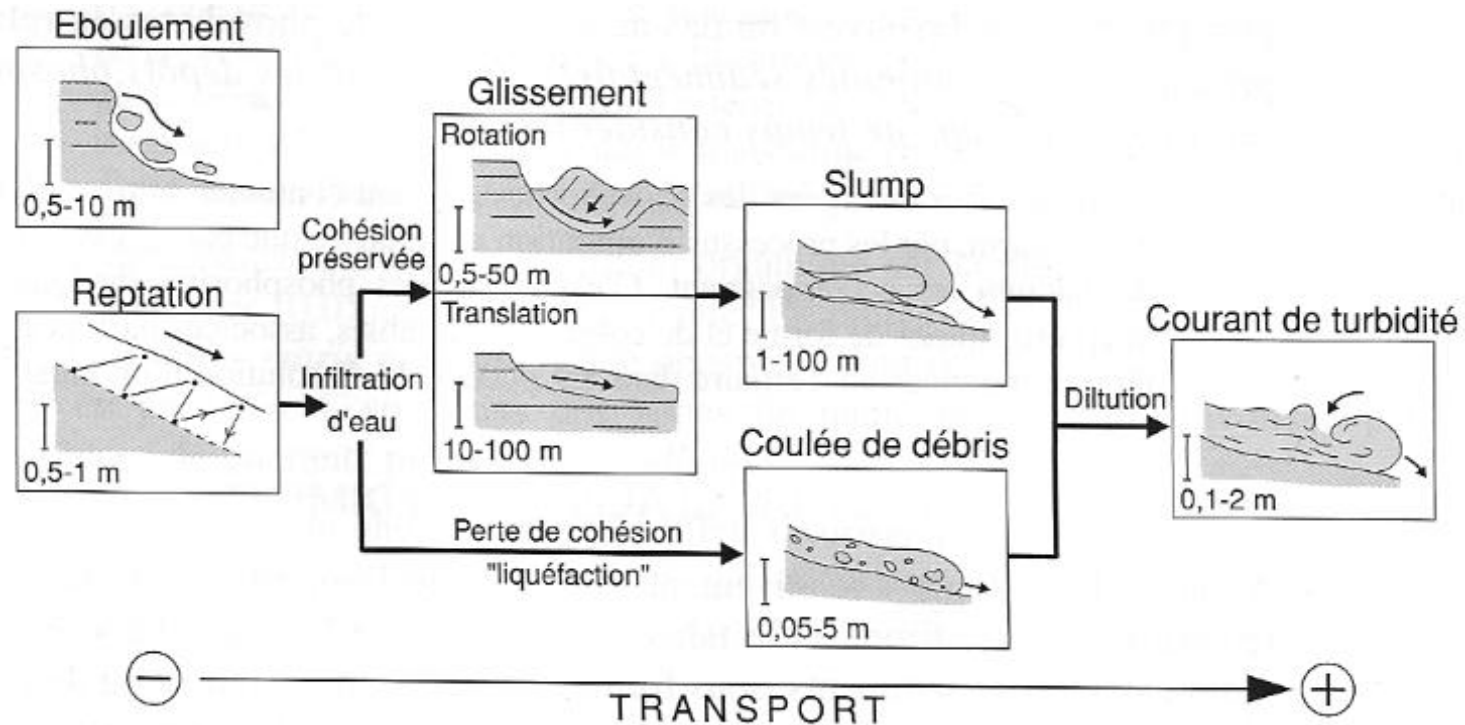
- I. Facteurs à l'origine du modelé des paysages : altération physique et chimique**
 - A. Etude d'un exemple, le paysage de cuesta à l'Est du Bassin parisien**
 - B. Observation de la diversité de modelé des paysages**
 - 1. Observation d'un granite altéré
 - 2. Observation d'un karst
 - C. les 3 facteurs à l'origine du modelé du paysage**
 - D. L'altération physique des roches, les agents de la désagrégation mécanique des roches**
 - 1. Effets de la température : thermoclastie et cryoclastie
 - 2. Mécanismes dépendant de la gravité
 - 3. L'action de l'eau à l'état solide : exemple des glaciers
 - 4. autres agents de désagrégation mécanique
 - 5. Les conséquences de ces facteurs d'altération varient selon ...
 - E. L'altération chimique des roches**
 - 1. La dissolution des carbonates
 - 2. L'altération des roches silicatées, exemple du granite, une altération par hydrolyse
 - 3. L'hydrolyse des silicates par l'eau
- II. De l'érosion au transport des particules/solutés**
 - A. Diversité des modes et agents de transports**
 - 1. Transport sous forme dissoute
 - 2. Transport en suspension
 - 3. Transport en masse
 - B. Cas du transport des solutés : importance du substrat des bassins versants**
 - C. Cas du transport des particules**

II. DE L'ÉROSION AU TRANSPORT DES PARTICULES/SOLUTES

A. DIVERSITÉ DES MODES ET AGENTS DE TRANSPORTS

3. Transport en masse

- fluide très concentré en particules solides → **transport en masse**
- Selon pente, concentration en fluide → **différents processus gravitaires**
 - Si **concentration en fluide faible** (ex sédiments en cours de diagenèse)
 - ⇒ cohésion du dépôt maintenue
 - ⇒ **Slumps**
 - Si **quantité d'eau élevée**
 - ⇒ **cohésion perdue**
 - ⇒ **avalanches** et coulées
 - Plus quantité d'eau infiltrée importante, plus distance de transport grande.
 - ⇒ slump = déplacement sur faible distance
 - ⇒ Coulée = déplacement sur faible distance
 - ✓ **coulées de turbidité** (les plus diluées) → transport le plus long → turbidites .



les différents processus gravitaires (in Cojan et Renard)

PLAN: CHAPITRE ST-E-I : MODELÉS DES PAYSAGES ET TRANSFERTS DE MATÉRIAUX EN SURFACE I

- I. Facteurs à l'origine du modelé des paysages : altération physique et chimique**
 - A. Etude d'un exemple, le paysage de cuesta à l'Est du Bassin parisien**
 - B. Observation de la diversité de modelé des paysages**
 - 1. Observation d'un granite altéré
 - 2. Observation d'un karst
 - C. les 3 facteurs à l'origine du modelé du paysage**
 - D. L'altération physique des roches, les agents de la désagrégation mécanique des roches**
 - 1. Effets de la température : thermoclastie et cryoclastie
 - 2. Mécanismes dépendant de la gravité
 - 3. L'action de l'eau à l'état solide : exemple des glaciers
 - 4. autres agents de désagrégation mécanique
 - 5. Les conséquences de ces facteurs d'altération varient selon ...
 - E. L'altération chimique des roches**
 - 1. La dissolution des carbonates
 - 2. L'altération des roches silicatées, exemple du granite, une altération par hydrolyse
 - 3. L'hydrolyse des silicates par l'eau
- II. De l'érosion au transport des particules/solutés**
 - A. Diversité des modes et agents de transports**
 - 1. Transport sous forme dissoute
 - 2. Transport en suspension
 - 3. Transport en masse
 - B. Cas du transport des solutés : importance du substrat des bassins versants**
 - C. Cas du transport des particules**

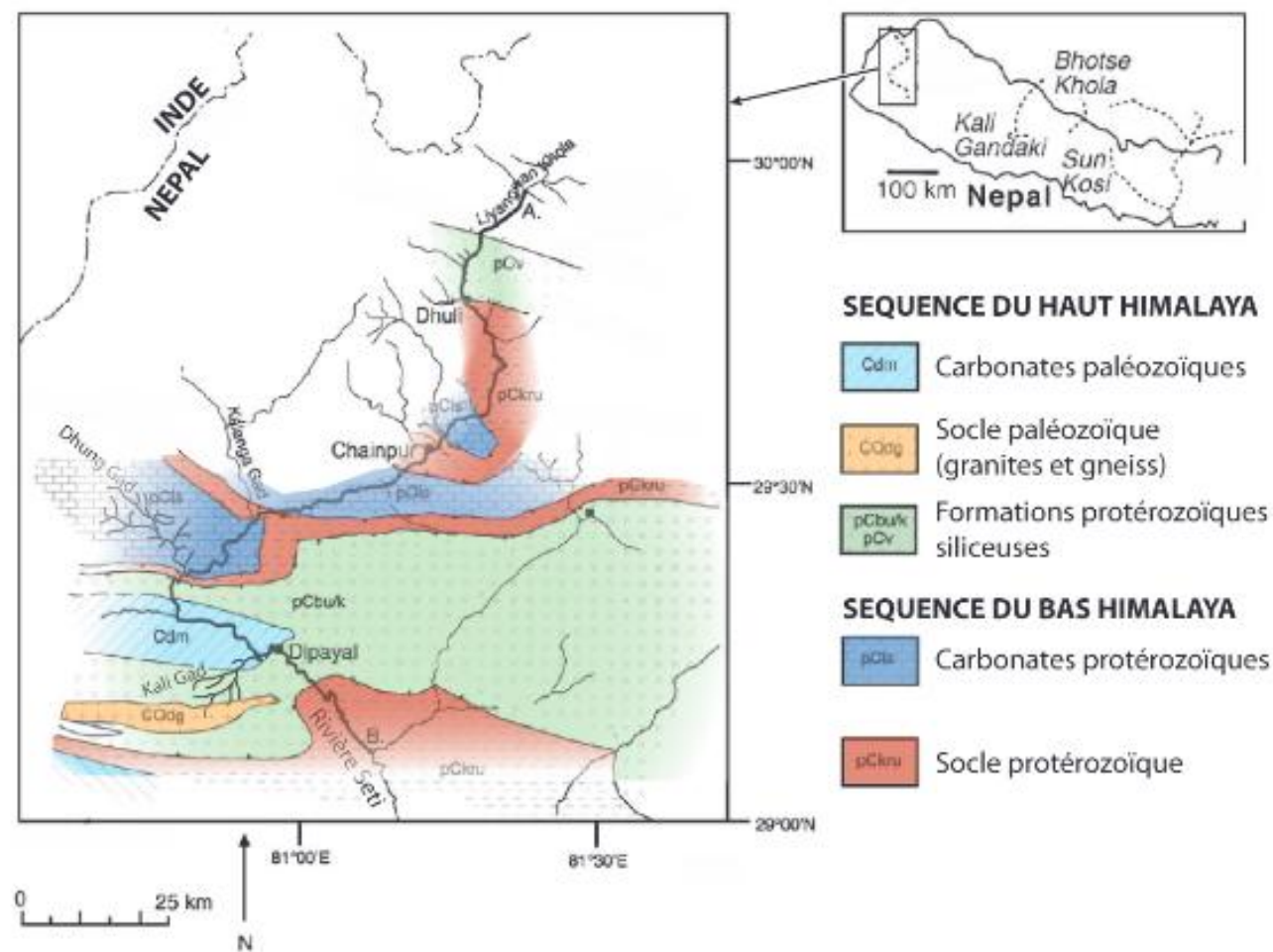
II. DE L'ÉROSION AU TRANSPORT DES PARTICULES/SOLUTES

B. CAS DU TRANSPORT DES SOLUTES : IMPORTANCE DU SUBSTRAT DES BASSINS VERSANTS



	Ca ²⁺	HCO ₃ ⁻	Si ⁴⁺
Dhung Gad	906	2 849	152
Kali Gad	123	526	377

- La **lithologie des bassins versants** conditionne les concentrations relatives d'ions dans les rivières et fleuves.
- Sur **domaine calcaire**, les rivières seront essentiellement chargées en **Ca²⁺** et **HCO₃⁻**.
- Sur **domaine granitique**, elles seront riches en **Silicium (Si⁴⁺)**.



PLAN: CHAPITRE ST-E-I : MODELÉS DES PAYSAGES ET TRANSFERTS DE MATÉRIAUX EN SURFACE I

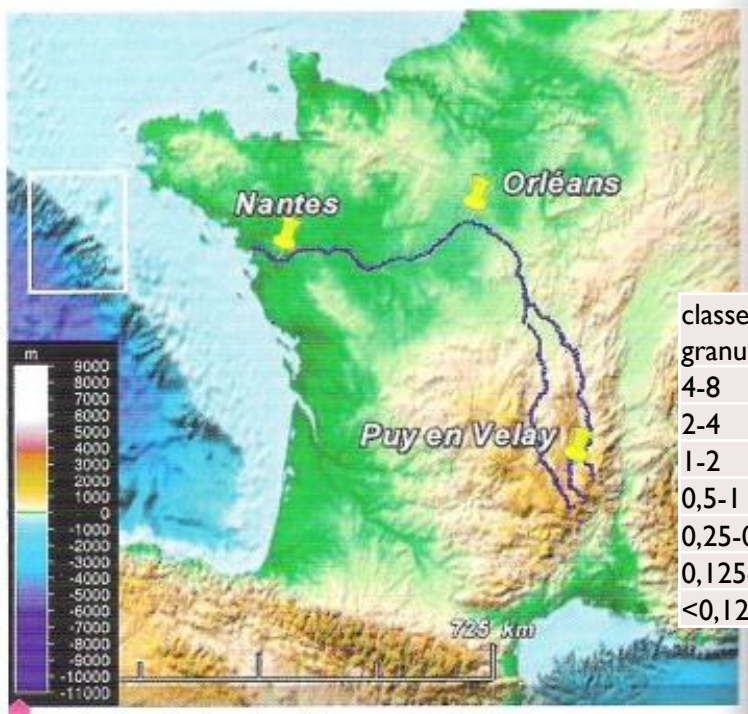
- I. Facteurs à l'origine du modelé des paysages : altération physique et chimique**
 - A. Etude d'un exemple, le paysage de cuesta à l'Est du Bassin parisien**
 - B. Observation de la diversité de modelé des paysages**
 - 1. Observation d'un granite altéré
 - 2. Observation d'un karst
 - C. les 3 facteurs à l'origine du modelé du paysage**
 - D. L'altération physique des roches, les agents de la désagrégation mécanique des roches**
 - 1. Effets de la température : thermoclastie et cryoclastie
 - 2. Mécanismes dépendant de la gravité
 - 3. L'action de l'eau à l'état solide : exemple des glaciers
 - 4. autres agents de désagrégation mécanique
 - 5. Les conséquences de ces facteurs d'altération varient selon ...
 - E. L'altération chimique des roches**
 - 1. La dissolution des carbonates
 - 2. L'altération des roches silicatées, exemple du granite, une altération par hydrolyse
 - 3. L'hydrolyse des silicates par l'eau
- II. De l'érosion au transport des particules/solutés**
 - A. Diversité des modes et agents de transports**
 - 1. Transport sous forme dissoute
 - 2. Transport en suspension
 - 3. Transport en masse
 - B. Cas du transport des solutés : importance du substrat des bassins versants**
 - C. Cas du transport des particules**

II. DE L'ÉROSION AU TRANSPORT DES PARTICULES/SOLUTES

C. CAS DU TRANSPORT DES PARTICULES

I. L'hydrodynamisme conditionne le comportement des particules

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

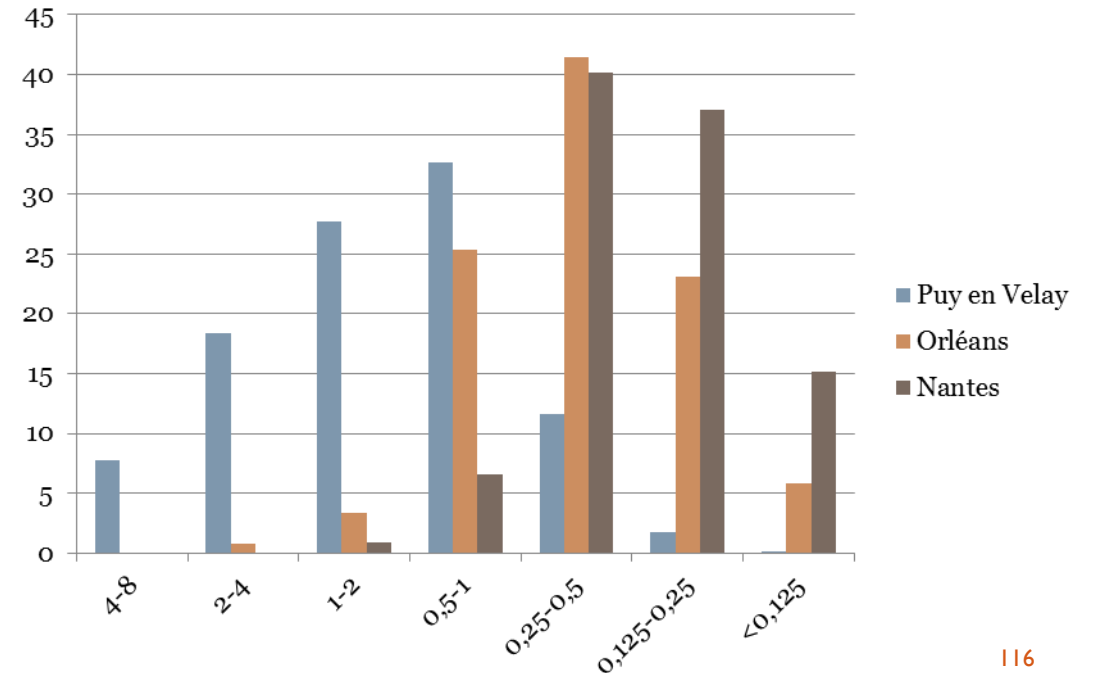
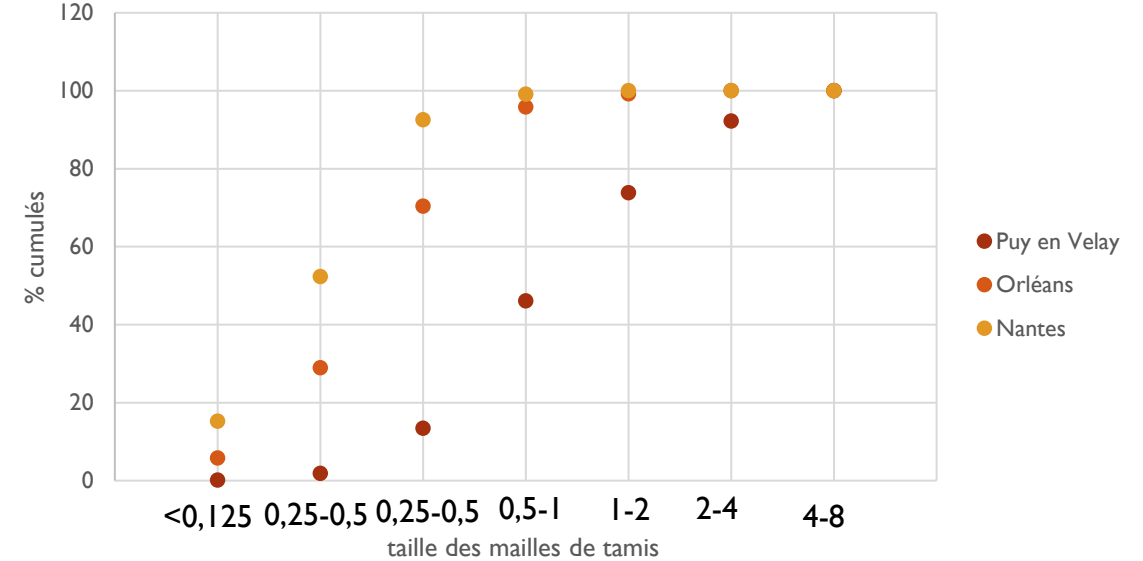


classe granulométrique	Puy en Velay	Orléans	Nantes
4-8	7,8	0	0
2-4	18,4	0,8	0
1-2	27,7	3,4	0,9
0,5-1	32,7	25,4	6,6
0,25-0,5	11,6	41,5	40,2
0,125-0,25	1,7	23,1	37,1
<0,125	0,1	5,8	15,2

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

Localisation des lieux de prélèvements sur la Loire

courbes cumulatives des tailles de particules pour 3 sables de Loire

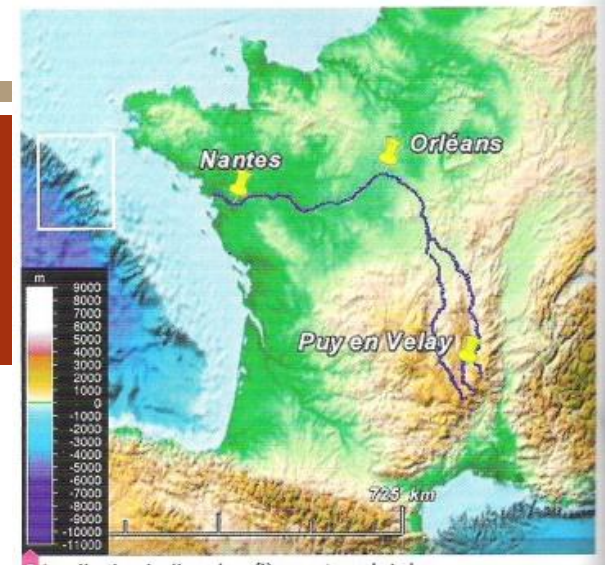


II. DE L'EROSION AU TRANSPORT DES PARTICULES/SOLUTES

C. CAS DU TRANSPORT DES PARTICULES

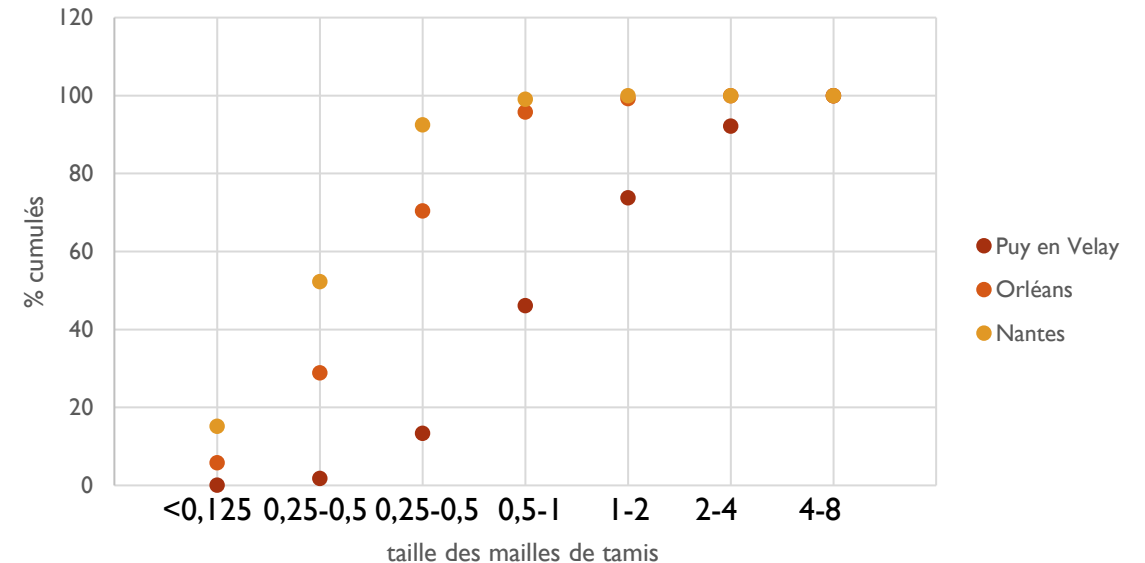
I. L'hydrodynamisme conditionne le comportement des particules

- Le sable de Loire échantillonné vers Orléans présente une plus grande gamme de classes granulométriques et une taille moyenne des sédiments plus importante que pour celui échantillonné vers Nantes. Le sable de Nantes est donc mieux trié (peu de classes granulométriques). Ceci peut s'interpréter en termes d'**hydrodynamisme**.
- En effet, pour des particules de densité constante, plus la taille est importante plus le poids est élevé. Or plus une particule est lourde plus l'énergie pour la mettre en mouvement doit être importante. Ainsi l'énergie de la Loire doit être plus élevée au niveau du Puy en Velay > Orléans > Nantes.
- D'autre part, le sable du Puy en Velay s'est déposé plus en amont que le sable de d'Orléans et de Nantes : ceci confirme que l'énergie du courant décroît de la source vers l'embouchure (au premier ordre, avec la pente topographique).
- Enfin, le sable de Nantes est bien trié ce qui signifie que l'énergie du courant doit être relativement constante alors que l'énergie doit être plus variable pour le sable d'Orléans, et surtout du Puy en Velay. Cette observation va dans le même sens que la précédente car les variations saisonnières (fonte des glaces au printemps, assèchement en été...) sont plus marquées en amont.
- Cet exemple montre que l'étude granulométrique de différents dépôts sédimentaires permet de les positionner au moins de manière relative dans un **réseau hydrographique**.



Localisation des lieux de prélèvements sur la Loire

courbes cumulatives des tailles de particules pour 3 sables de Loire

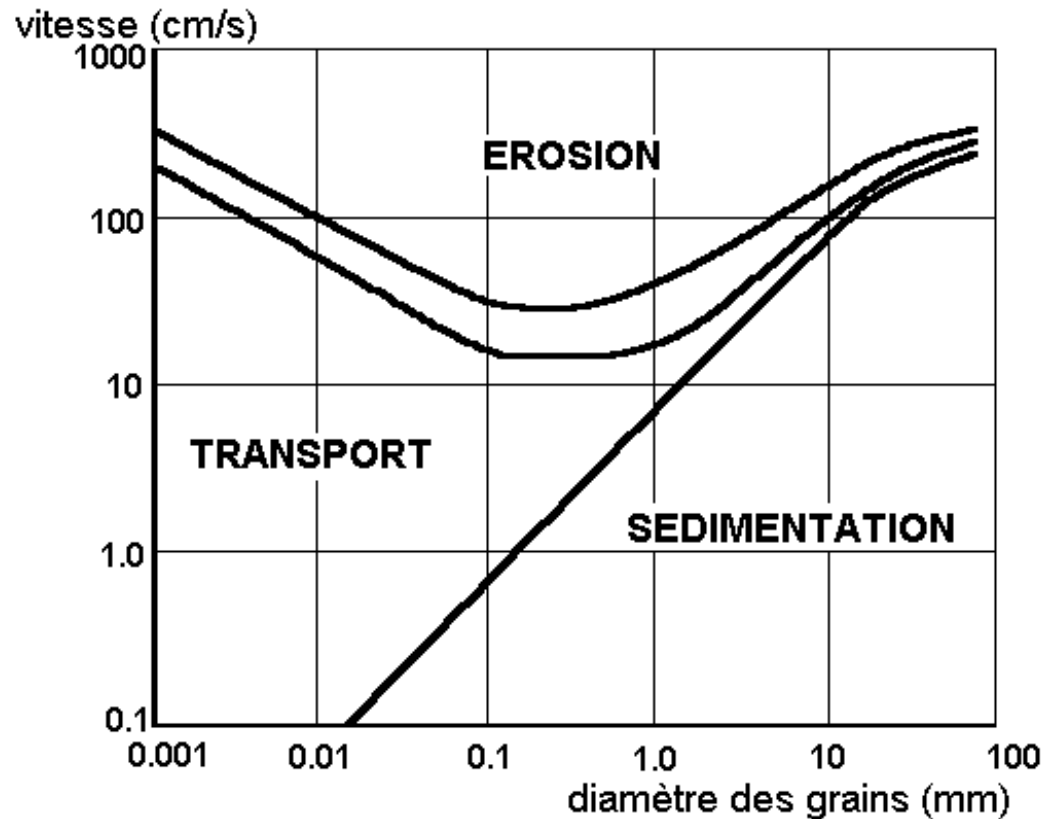


résultats de tamisage du sable de Loire prélevé à différents endroits.

II. DE L'ÉROSION AU TRANSPORT DES PARTICULES/SOLUTES

C. CAS DU TRANSPORT DES PARTICULES

I. L'hydrodynamisme conditionne le comportement des particules



Comportement des particules en fonction de leur granulométrie et de la vitesse du courant (diagramme de Hjulström)

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

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

2. Une particule de 0.1 mm de diamètre est transportée uniquement par de l'eau circulant à :

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

3. Une particule de 0.012 mm de diamètre ne peut ni être transportée ni érodée, si la vitesse de courant est de :

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

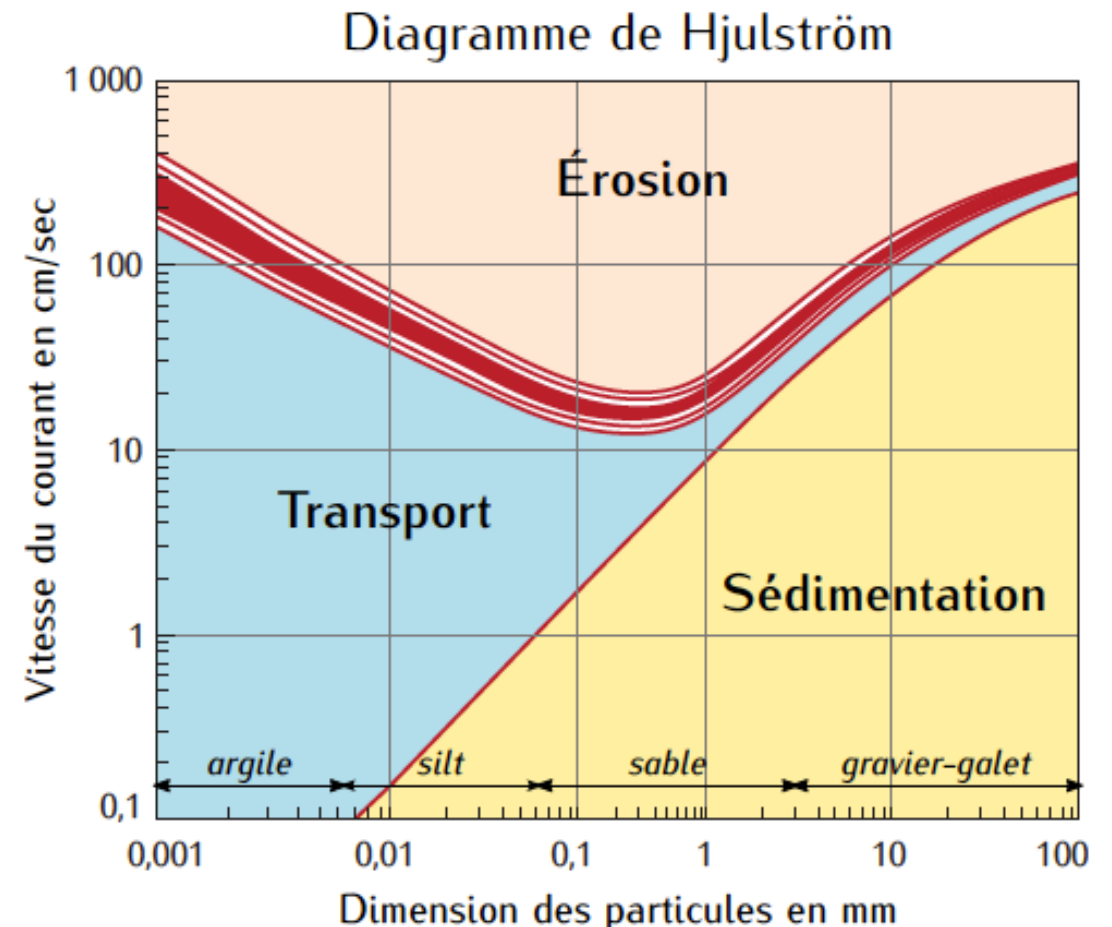
II. DE L'ÉROSION AU TRANSPORT DES PARTICULES/SOLUTES

C. CAS DU TRANSPORT DES PARTICULES

I. L'hydrodynamisme conditionne le comportement des particules



Taille des éléments	Éléments	Roche consolidée
> 256 mm	Blocs	Conglomérat
4 à 256 mm	Galets	
2 à 4 mm	Graviers	Micro-conglomérat
63 µm à 2 mm	Sable grossier	Grès grossier
	Sable moyen	
	Sable fin	
2 à 63 µm	Particules silteuses	Siltite
< 2 µm	Argiles (granulométrique)	Argilite



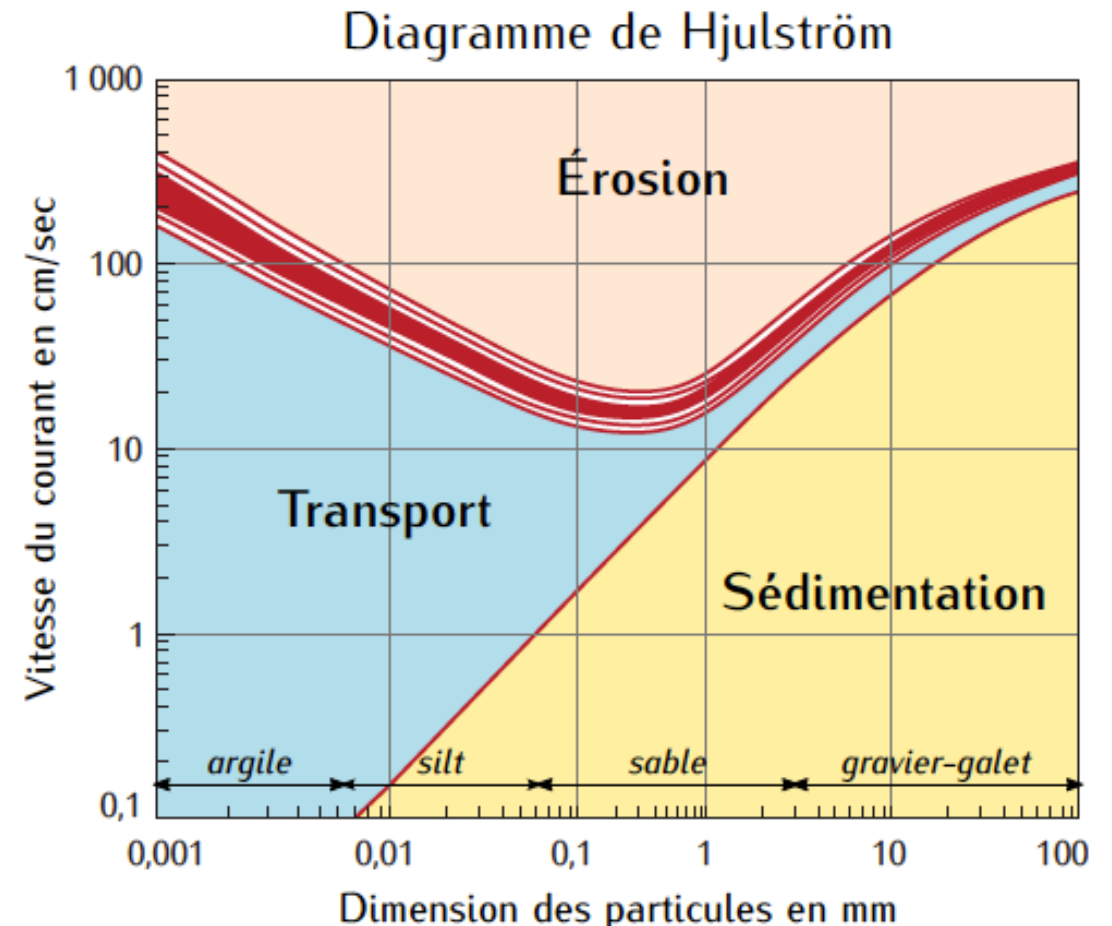
II. DE L'ÉROSION AU TRANSPORT DES PARTICULES/SOLUTES

C. CAS DU TRANSPORT DES PARTICULES

I. L'hydrodynamisme conditionne le comportement des particules



- **Diagramme de Hjulström** = comportement des différentes classes granulométriques en fonction de la vitesse du courant
- Trois domaines distincts :
 - Domaine de **dépôt** ou **sédimentation**: énergie du courant insuffisante pour transporter la particule qui reste sur le substrat.
 - Domaine de **transport** : énergie du courant suffisante pour déplacer une particule en suspension dans le fluide.
 - Domaine de **transport et d'érosion**: énergie du courant suffisante non seulement pour transporter une particule en suspension dans le fluide mais aussi pour mettre en suspension une particule déposée sur le fond (= érosion)

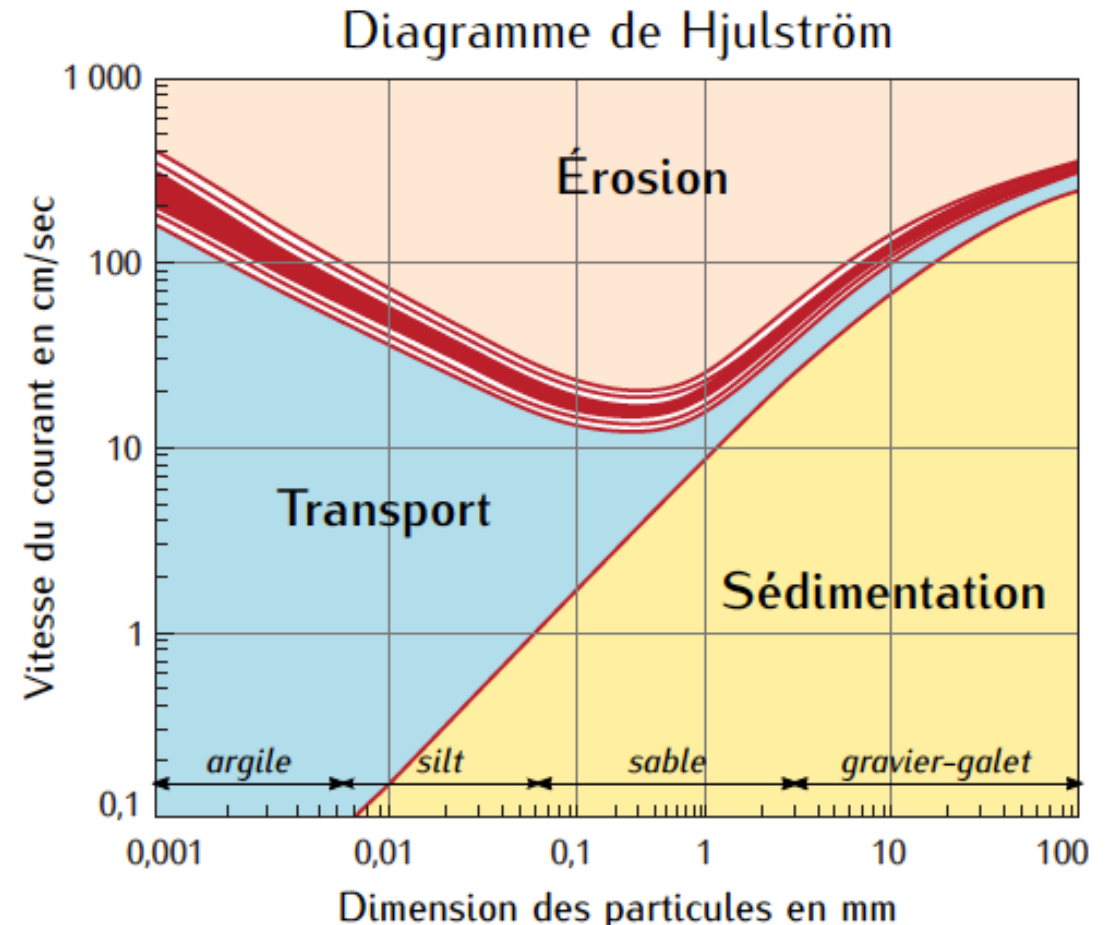


II. DE L'ÉROSION AU TRANSPORT DES PARTICULES/SOLUTES

C. CAS DU TRANSPORT DES PARTICULES

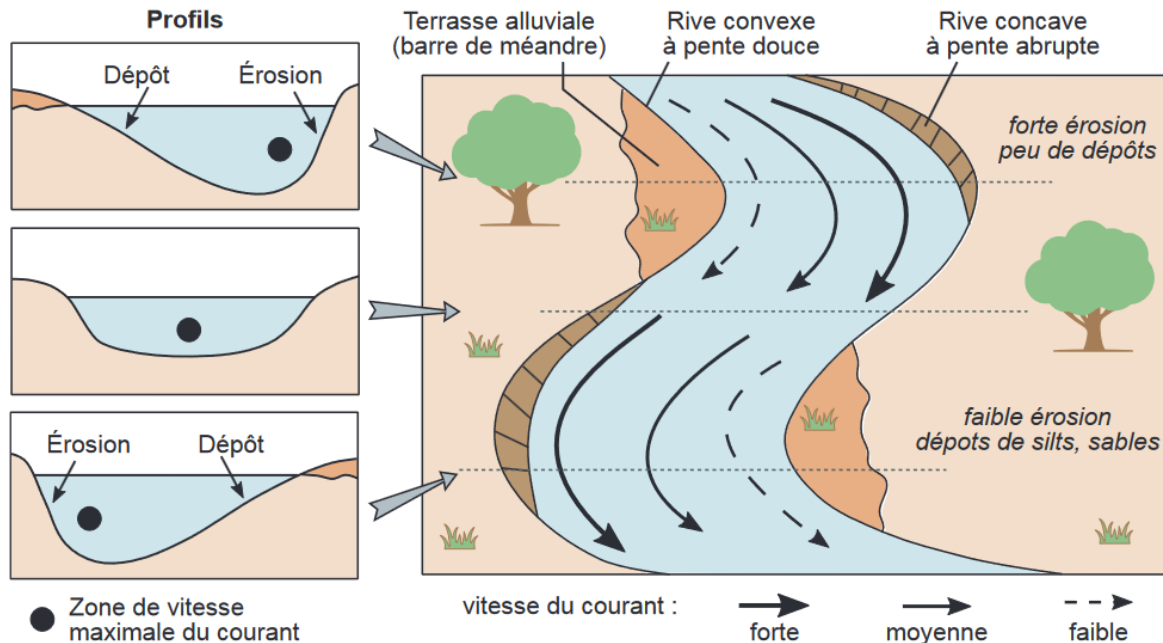
I. L'hydrodynamisme conditionne le comportement des particules

- Plus une particule a un diamètre petit, plus elle sédimentera pour une vitesse de courant faible
 - ⇒ **tri granulométrique des dépôts** de particules
 - ✓ *particules les plus grosses sédimentent en amont*
 - ✓ *plus fines en aval du réseau hydrographique*
- Vitesse de courant pour éroder des particules de diamètre 1 mm = 20 cm.s⁻¹
 - Vitesse ↗ pour des particules de diamètre plus important et pour des particules de diamètre plus faible (par exemple pour les argiles).
 - ✓ **petites particules = forces de cohésion importantes** (qu'il est difficile de rompre) ⇒ ne se comportent pas comme une seule particule mais comme un agrégat
- Diagramme de Hjulström ne tient pas compte de tous les paramètres ayant un effet sur la sédimentation
 - **seul le diamètre** des particules
 - mais **pas leur densité...** (Il existe une loi donnant la vitesse de chute d'un corps dans un fluide en mouvement qui prend en compte ces différents paramètres : la loi de Stokes.



C. CAS DU TRANSPORT DES PARTICULES

I. L'hydrodynamisme conditionne le comportement des particules



Méandre ardéchois

(<https://www.flickr.com/photos/10653408@N00/231685861/>)



: formation des méandres par érosion de la rive concave et sédimentation sur la rive convexe. L'ensemble se déplace vers l'aval. Recouplement de méandre et développement d'un méandre abandonné.

*Influence de la vitesse du courant sur la morphologie fluviale
(Dunod, ed.2021, p.794)*

II. DE L'ÉROSION AU TRANSPORT DES PARTICULES/SOLUTES

C. CAS DU TRANSPORT DES PARTICULES

I. L'hydrodynamisme conditionne le comportement des particules

Loi de Stokes::

$$V = \sqrt{[(4/3) (d g / Cd) (\Delta\phi / \phi_f)]}$$

Avec :

d : le diamètre de la particule comme dans le diagramme de Hjulström (en m).

g : la gravité (en ms^{-2}).

Cd : le coefficient d'entraînement du fluide qui dépend du type d'écoulement du fluide (dont sa vitesse) et de la forme de la particule (en ms^{-1}). Ainsi, une particule plane comme un feuillet d'argile sédimente moins facilement qu'une particule sphérique.

ϕ_f : la densité du fluide. Plus le fluide est dense plus la vitesse de chute est lente.

$\Delta\phi$: la différence entre la densité de la particule et la densité du fluide. Plus cette différence est importante plus la particule sédimente vite.

Ainsi, des particules de faible diamètre mais de densité élevée peuvent sédimenter pour des vitesses de courant plus importantes que ce qu'on observerait pour des particules de diamètre plus important mais de densité beaucoup plus faible. Il convient donc d'être prudent quant à l'exploitation du diagramme de Hjulström.

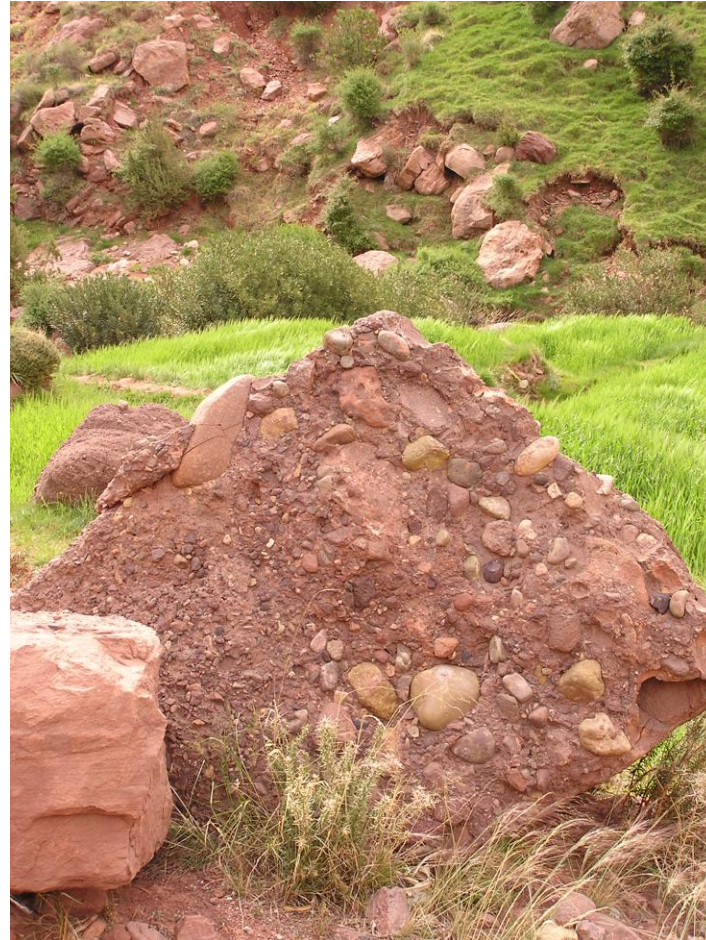


II. DE L'ÉROSION AU TRANSPORT DES PARTICULES/SOLUTES

C. CAS DU TRANSPORT DES PARTICULES

2. Conséquences du transport des particules

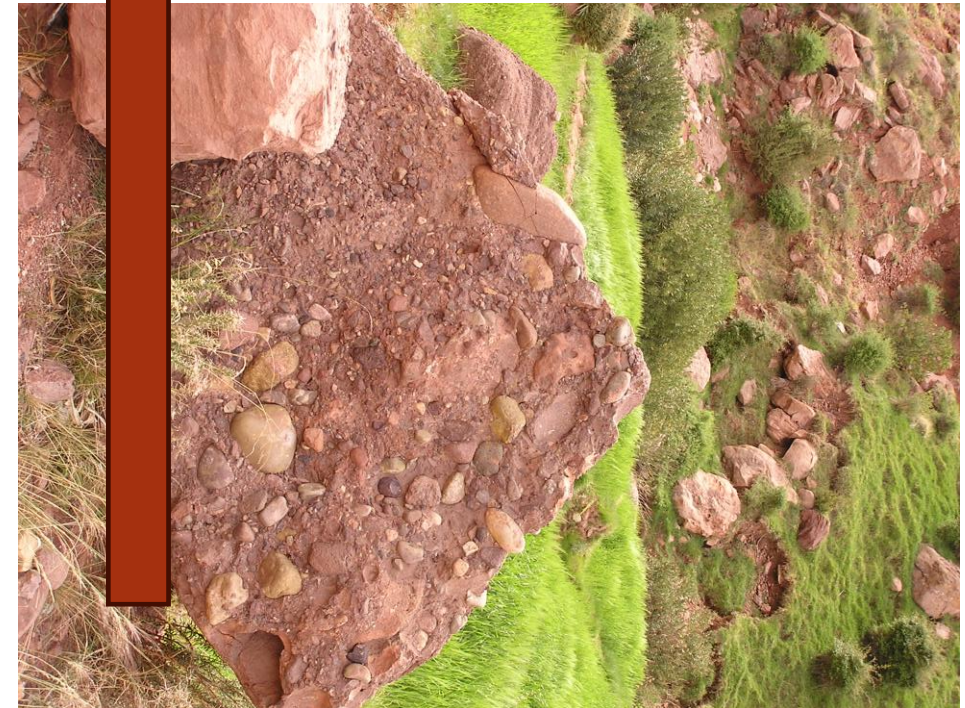
2.1. Tri granulométrique



*Granoclassement
(Haut Atlas marocain S. Dalaine)*

Taille des particules
sédimentées

Énergie (vitesse) du
courant décroît



II. DE L'EROSION AU TRANSPORT DES PARTICULES/SOLUTES

C. CAS DU TRANSPORT DES PARTICULES

2. Conséquences du transport des particules



2.2. Façonnage des particules : exemple des grains de quartz

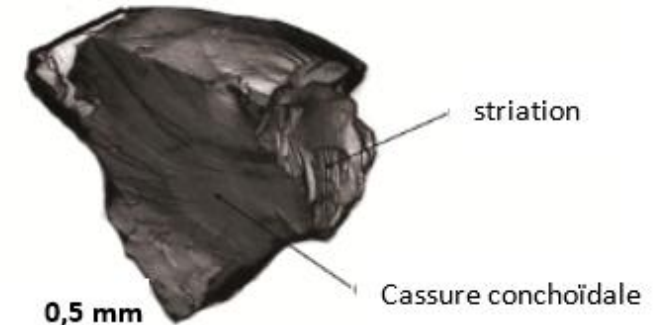
- **émoussé** caractérise une succession de chocs peu puissants qui marquent un **transport par l'eau**.
- L'étude ces grains permet donc de remonter à leur type de transport ce qui donne des **indications paléoenvironnementales**.

a) Grain anguleux et irrégulier : **quartz non usé peu transporté**



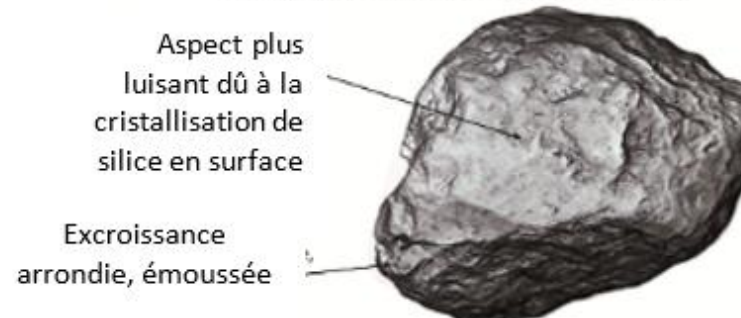
0,5 mm

b) Grain anguleux, présentant des cassures et des striations : **quartz façonné par un transport glaciaire**



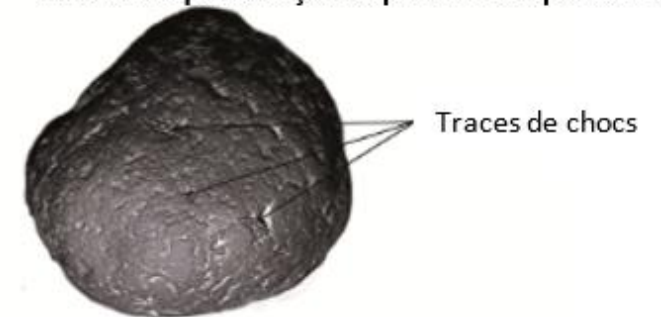
0,5 mm

c) Grain émoussé et luisant : **quartz façonné par un transport fluvatile**



0,5 mm

d) Grain rond mat et présentant de nombreuses traces de chocs : **quartz façonné par un transport éolien**



0,2 mm

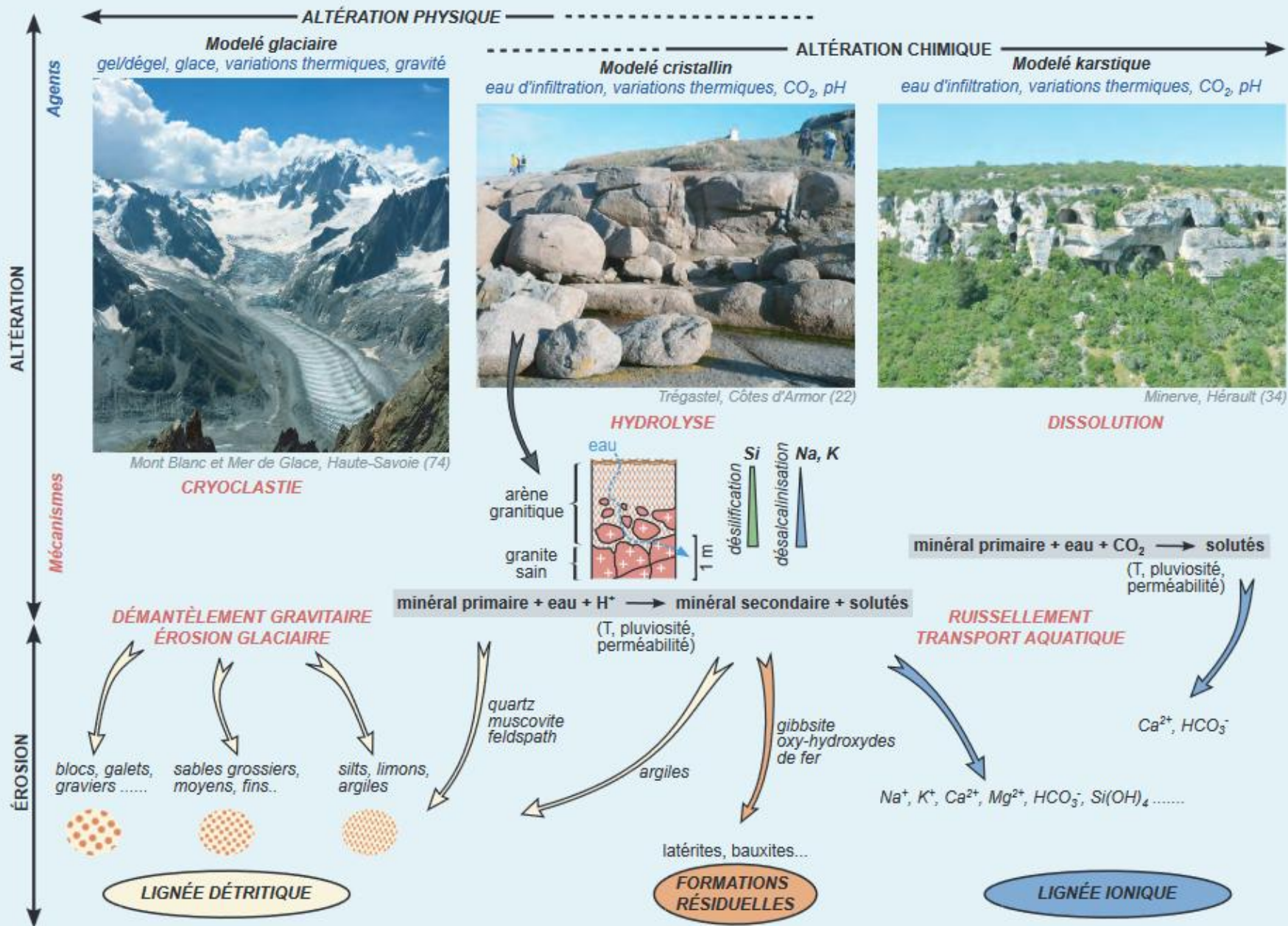


Figure de synthèse Divers aspects de l'altération et de l'érosion.

(Photos : M. Imbert et L. Bougeois)