

ST-E – Le phénomène sédimentaire

Chapitre 1 – Modelés des paysages et transferts de matériaux en surface



Les paysages

Paysage = Modelé (du latin, modulus, mesure) = ensemble des figures de la surface topographique.

Relief = inégalité en creux ou en saillie d'une surface topographique.

Les 3 principaux reliefs :

- Montagne : versants inclinés
- Plateau : pente faible à nulle – cours d'eau encaissés
- Plaine : pente faible à nulle – cours d'eau en surface

1. La diversité des paysages

1.1. Analyse d'un paysage : la cuesta

Un bassin sédimentaire en cuvette



Les isobathes sous Paris



Les terrains du trias qui affleurent dans les Vosges sont à 2500 m sous Paris et 3000 m sous Provins

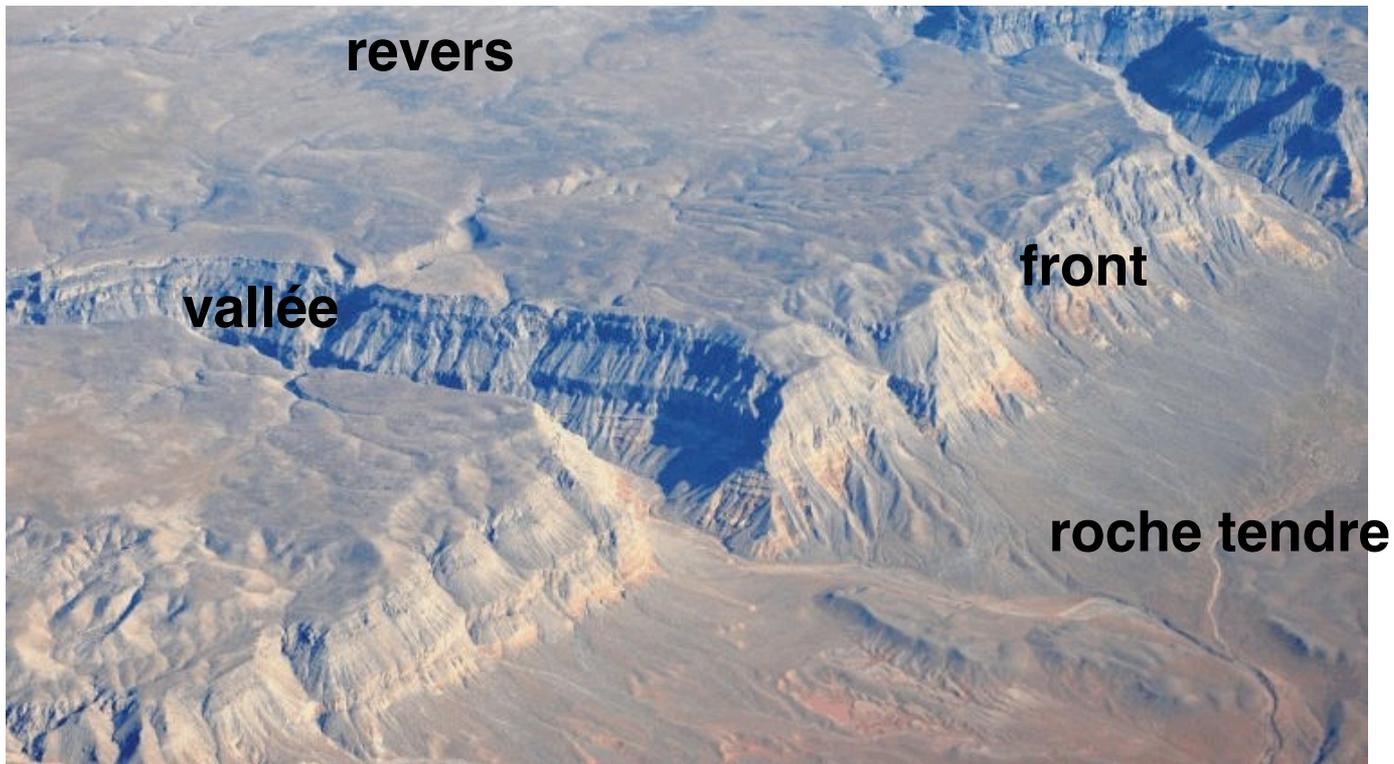
Modèle de cuesta en Arizona



Cuesta formée par les grès de la Formation de Wingate (Jurassique) reposant sur les argilites et siltites rouges plus tendres de la Formation de Chinle (Trias). Bitter Springs, Arizona, USA.

Source : <http://www.geolsed.ulg.ac.be/processus/processus.htm>

Une cuesta entaillée par une vallée

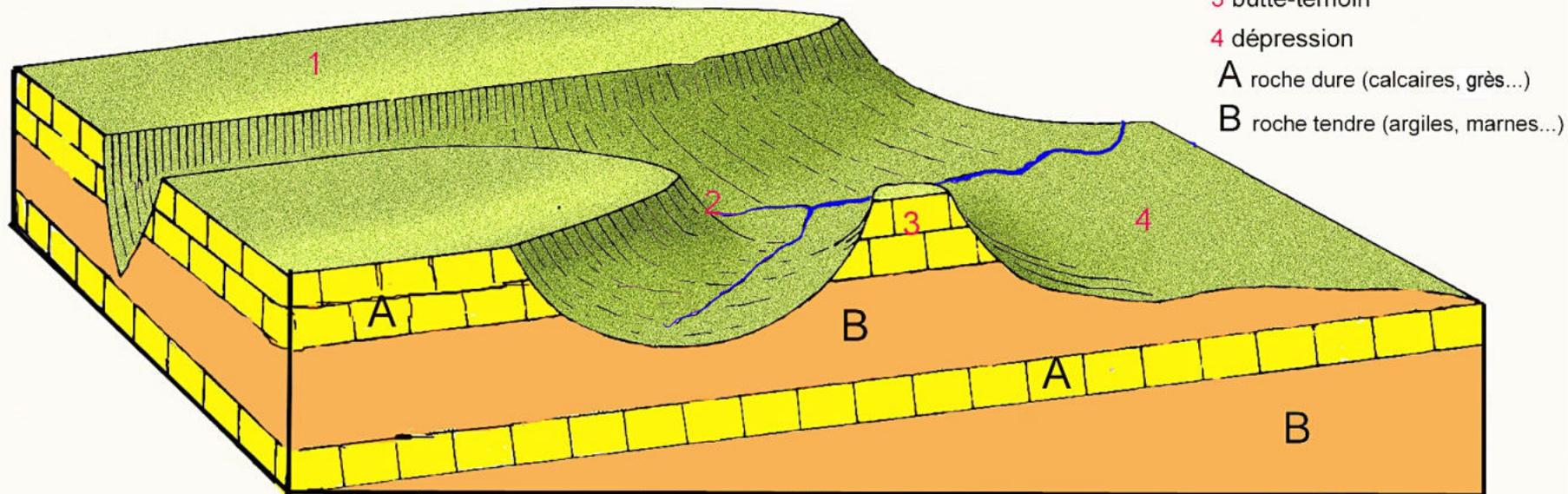


Une cuesta vue d'avion (Utah, USA). Remarquer le réseau conséquent qui entaille profondément le front de la cuesta.

Source : <http://www.geolsed.ulg.ac.be/processus/processus.htm>

Cuesta et érosion différentielle

Schéma de principe expliquant le relief de cuesta



Monument Valley : des buttes témoins

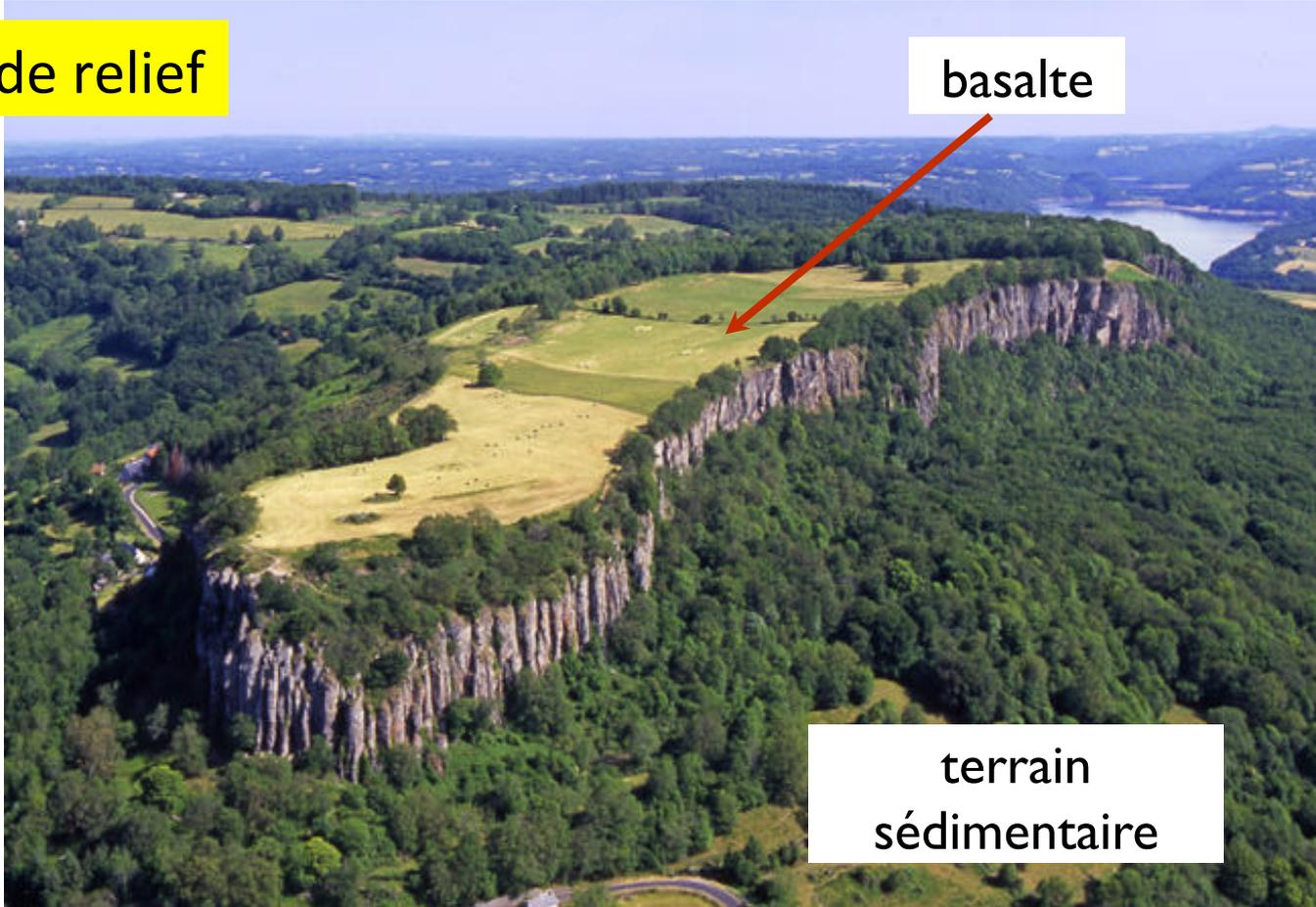


1. La diversité des paysages

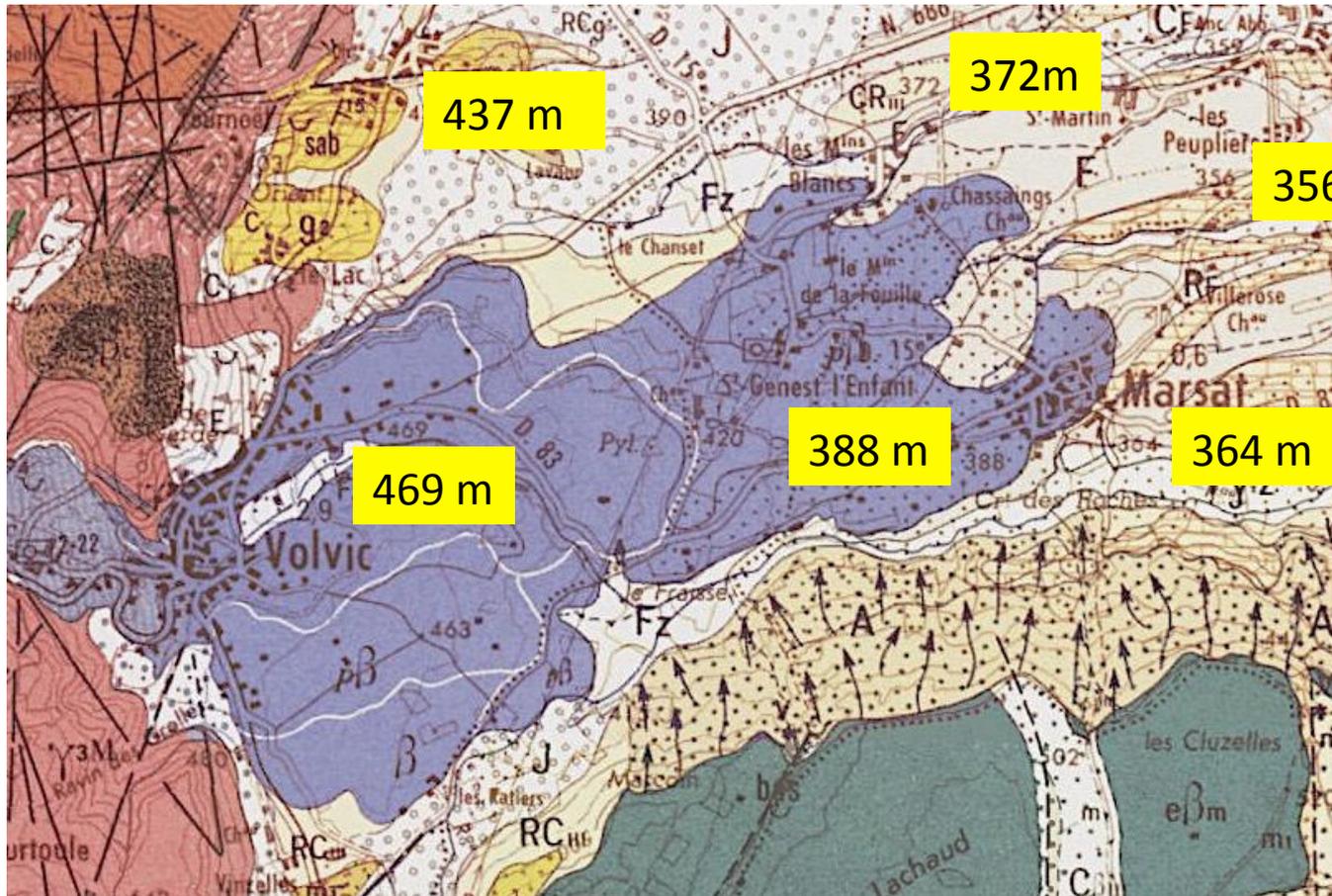
1.2. Influence des facteurs lithologiques, climatiques et structuraux

Facteurs lithologiques

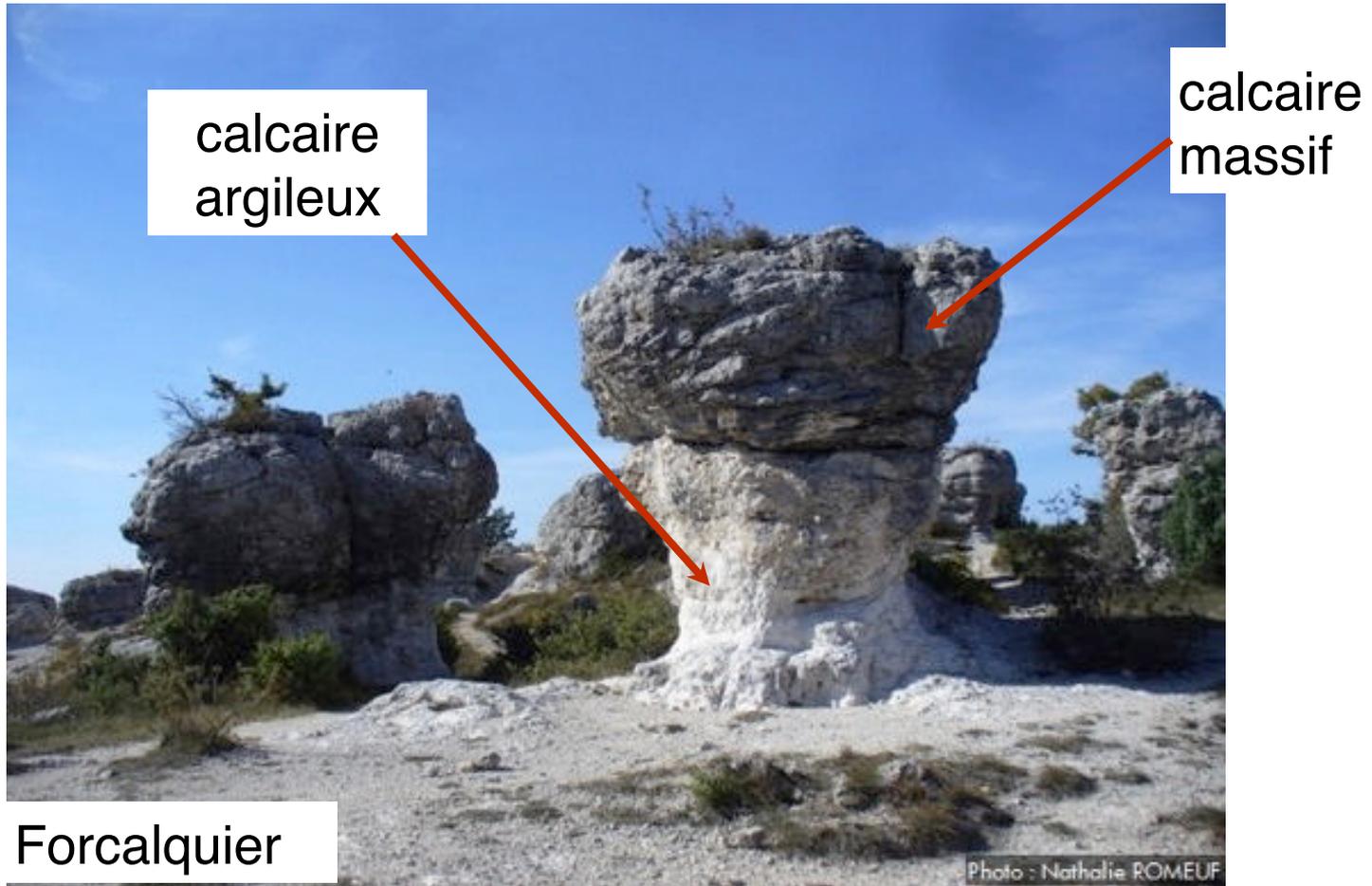
Inversion de relief



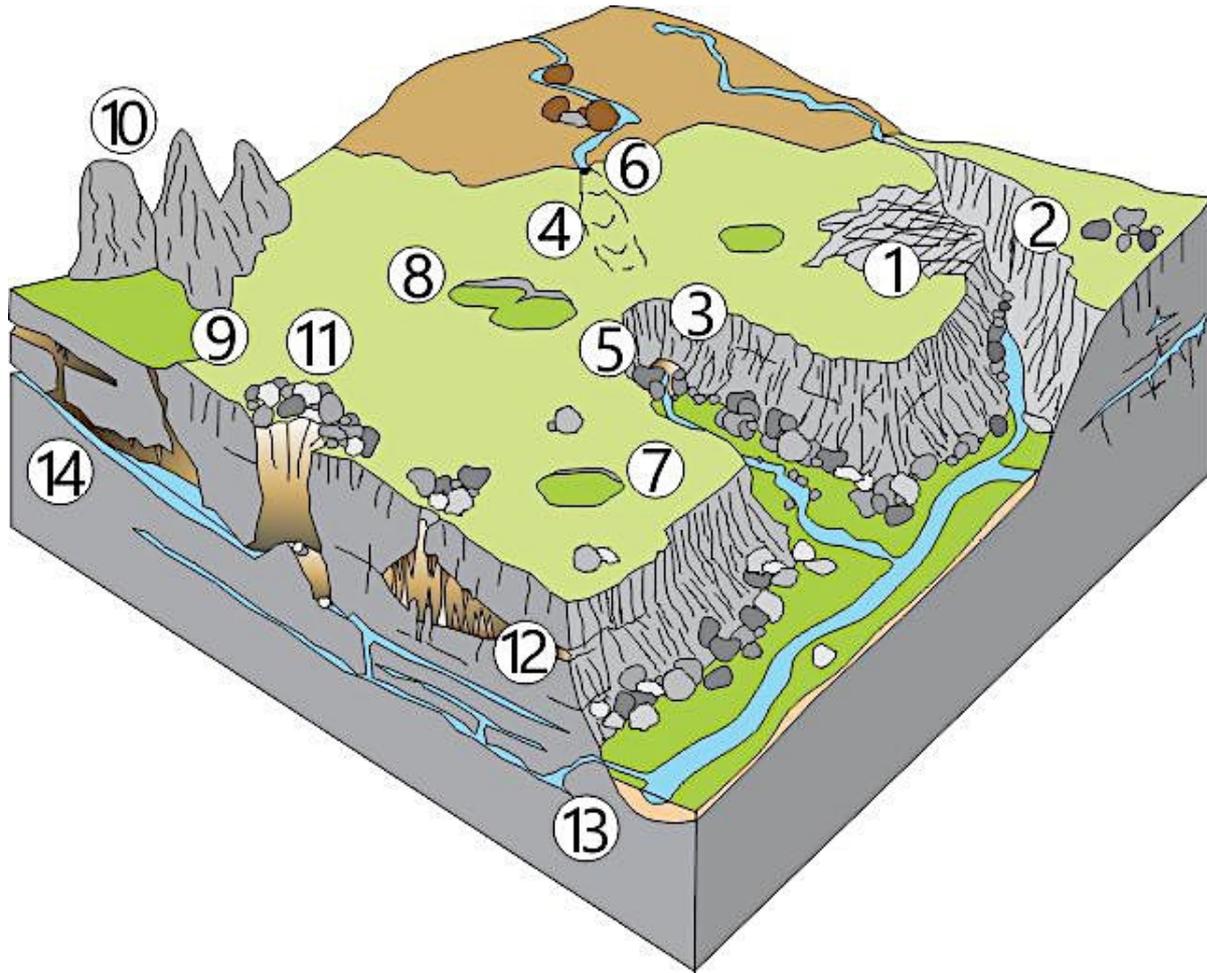
Carte de Clermont-Ferrand



Les cheminées des fées

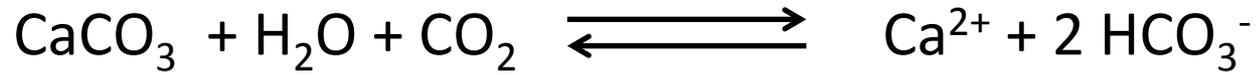


Les karsts : gorges, avens, grottes...



- (1) **Lapiez**
- (2) **Canyon = gorge**
- (3) **Reculée**
- (4) **Vallée sèche**
- (5) **résurgence** de rivière
- (6) **Perte**
- (7) **Doline**
- (8) **Ouvala** (9) **Poljé**
- (10) **Mogotes**
- (11) **Aven = goufre**
- (12) **Grotte**
- (13) **Source** vauclusienne
- (14) **rivière souterraine.**

Les karsts, paysages issus de la dissolution du calcaire



Lapiaz de La Clusaz (74)



Photos C. Escuyer

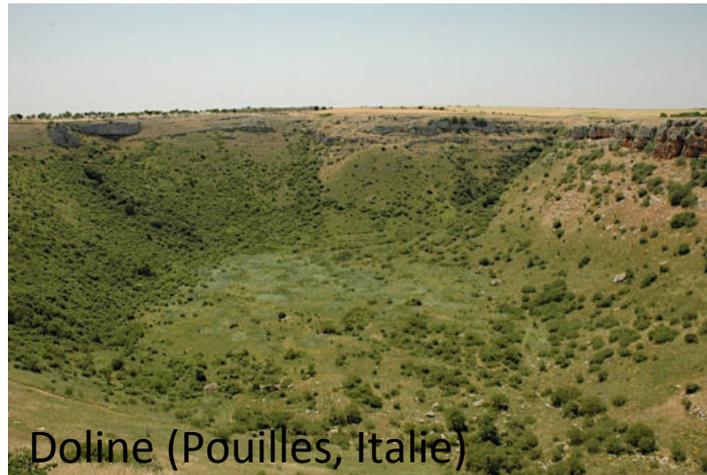
Quelques figures de karst



Perte d'une rivière



Gorges du Verdon



Doline (Pouilles, Italie)



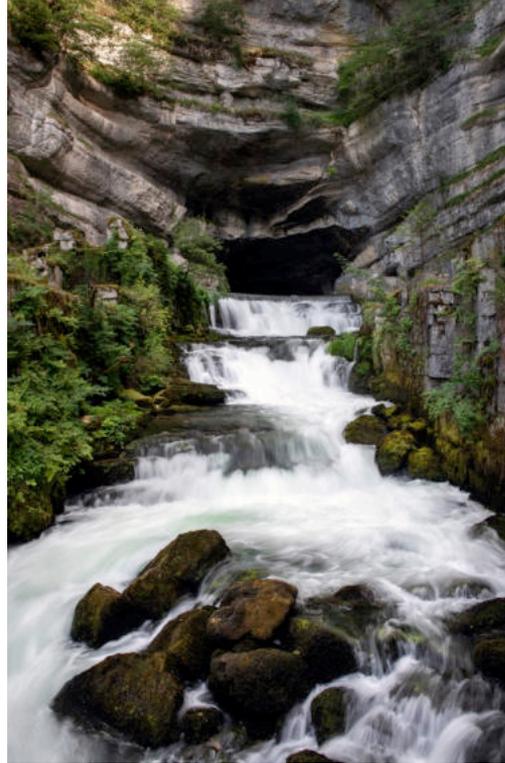
Gouffre = aven

Quelques figures de karst

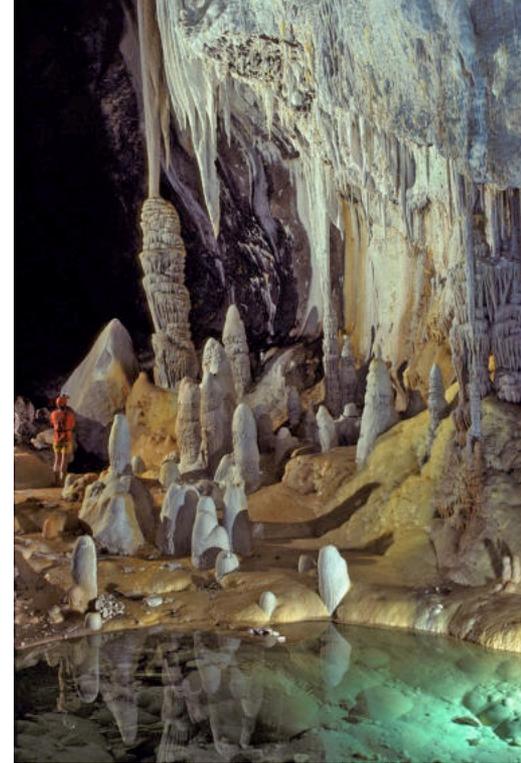
grotte



Reculée de Baume les Messieurs (39)



« sources » de la Loue (résurgence)



Source : planet-terre.ens-lyon.fr

Les facteurs structuraux liés à des plis

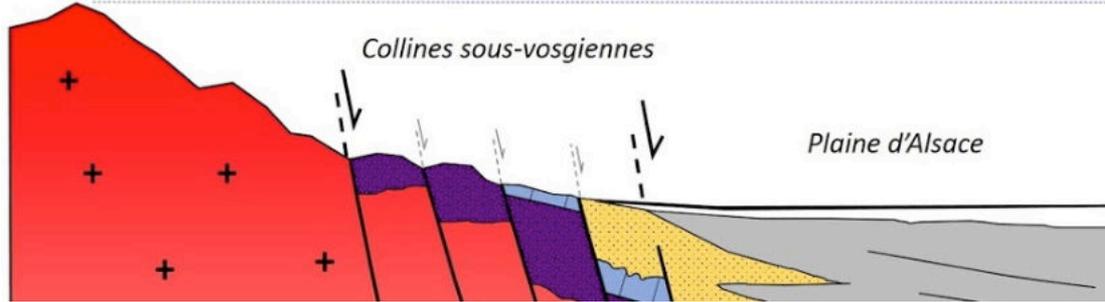
Un anticlinal conforme : l'Écoutoux



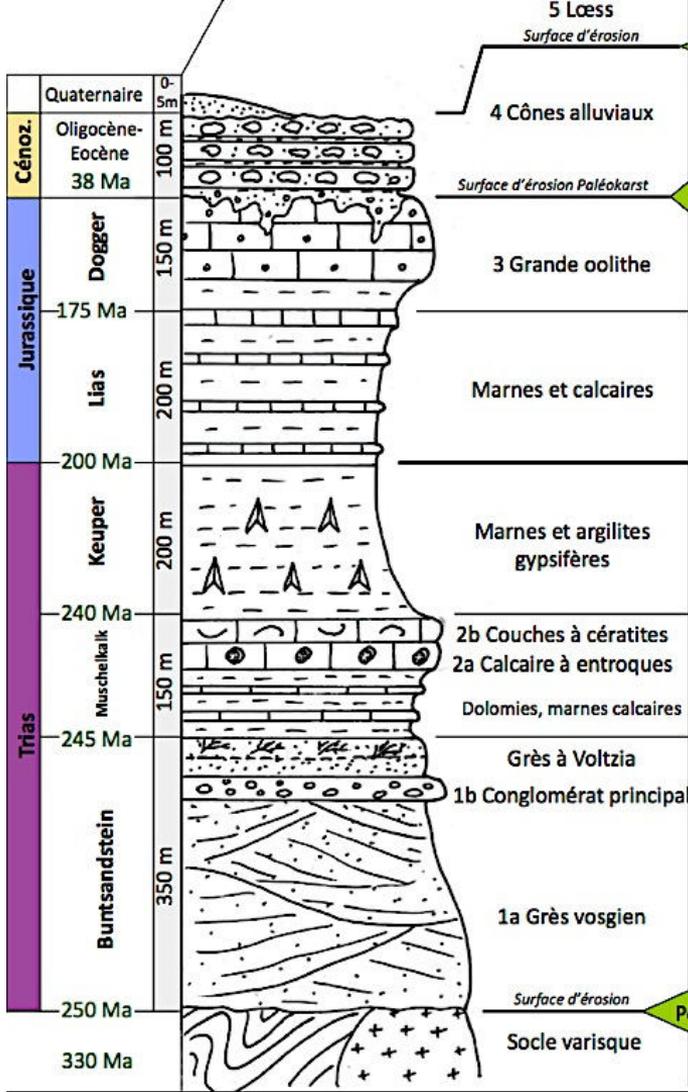
Le Mont Vercors, synclinal perché

Les facteurs structuraux liés à des failles

Le Grand Ballon



Photographie : Quentin Boesch



Calcul du rejet vertical total

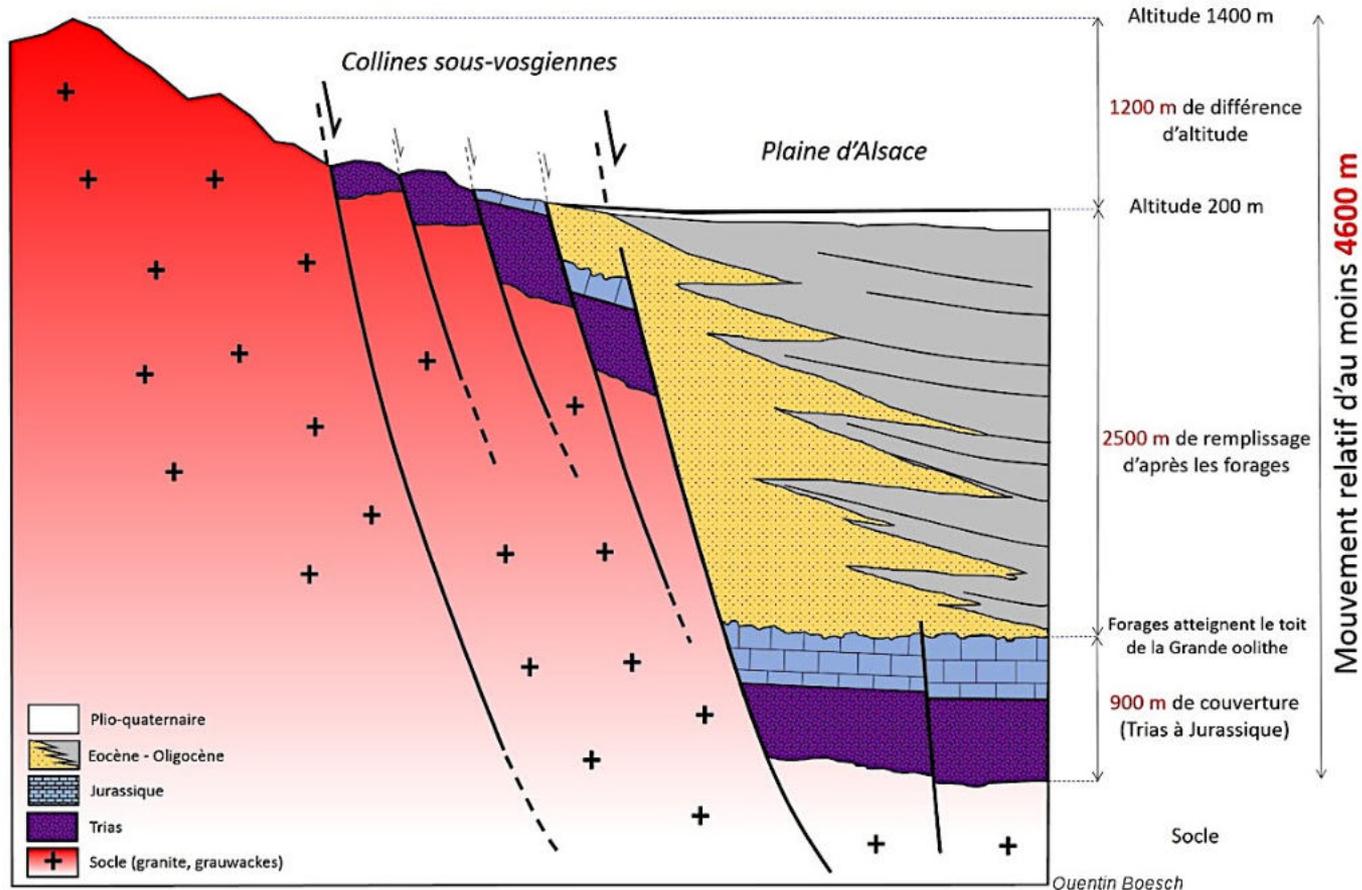
Au III^{aire}, l'Alsace a subi un effondrement progressif en régime d'extension.

Pour calculer le rejet vertical maximal, on peut faire une approximation à partir des éléments suivants :

- le granite affleure à 1400 m d'altitude dans le Sud des Vosges ;
- la plaine d'Alsace a une altitude moyenne de 200 m ;
- des forages ont permis de trouver le toit du calcaire oolithique (Grande oolithe) à une profondeur de 2 500 m ;
- les différents affleurements observés en Alsace et dans les Vosges ont permis d'établir le log ci-contre.

Les facteurs structuraux liés à des failles

Le Grand Ballon



Source : Q. Boesch

Les paysages granitiques sous différents climats



De l'argile rouge sous climat tropical



Ploumanac'h

© C. Escuyer

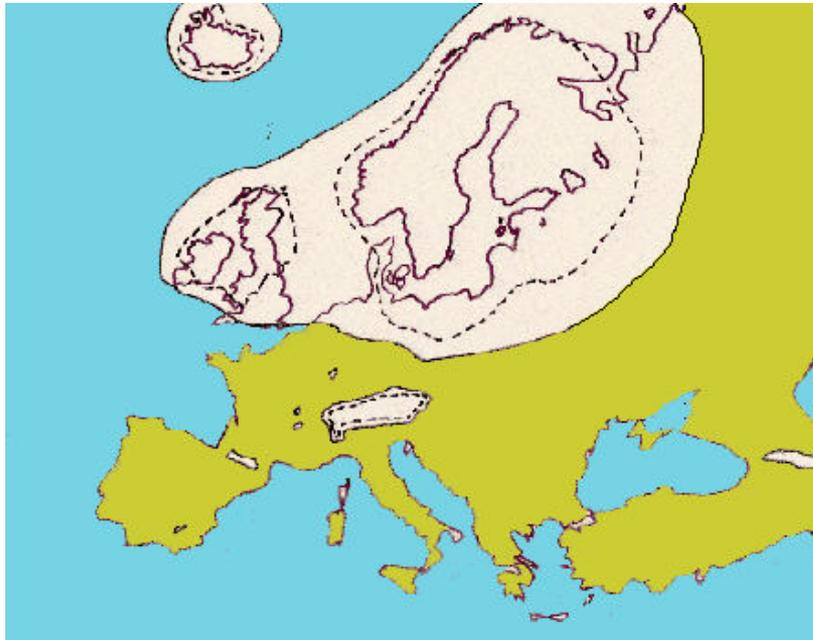
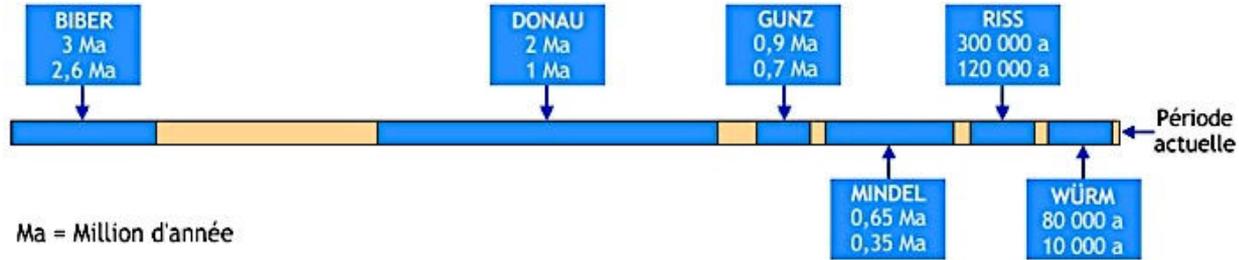
Vosges, 1 000 m d'altitude



falaise de granite

Les glaciations

Les glaciations quaternaires dans les Alpes



Extension de la calotte glaciaire au Riss (ligne continue) et au Würm (ligne pointillée).

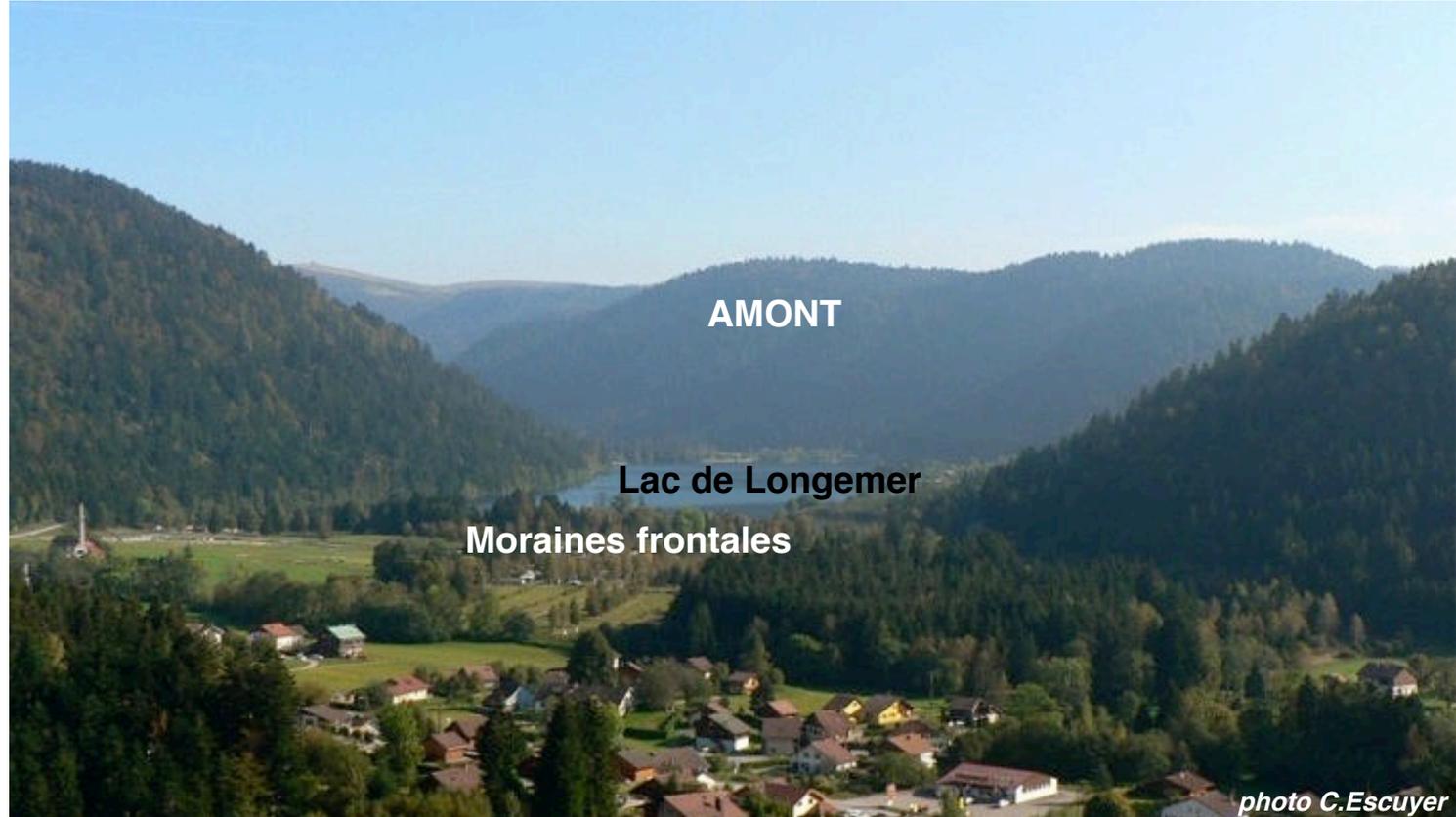
La géomorphologie glaciaire



Le paysage permet de voir :

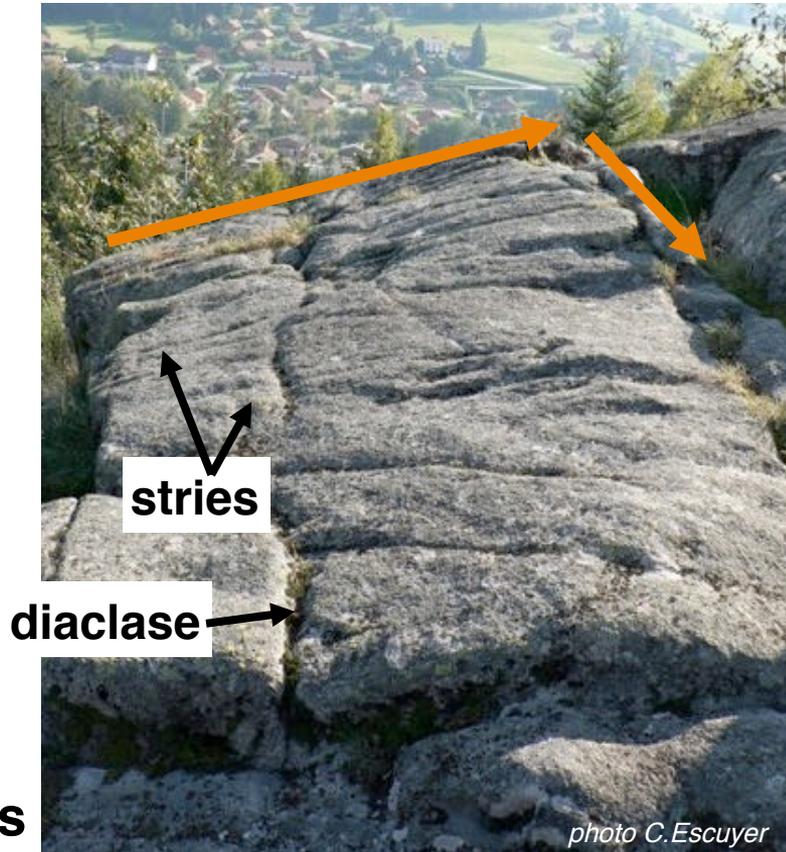
- le **cirque** creusé dans le granite ;
- une **tourbière** d'avant lac ;
- des éboulis de roches granitiques **anguleuses** témoignant de l'altération des roches par alternance gel-dégel (altération mécanique) ;
- un **lac glaciaire** : un barrage hydro-électrique est venu surmonter le **verrou** naturel qui barrait le lac en aval.

La géomorphologie glaciaire



Une vallée en auge

La Roche du Page



Stries
le glacier a avancé de gauche à droite ici

Les moraines, des roches particulières

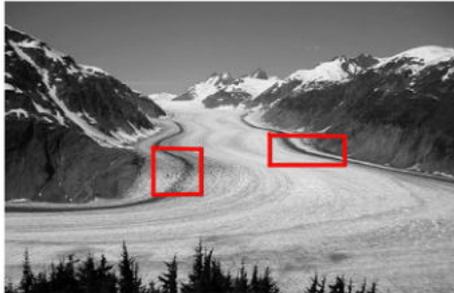


Bloc erratique « abandonné »
lors de la fonte du glacier



Moraine frontale témoignant de
l'avancée maximale du glacier

Moraine frontale



Moraines latérales



Moraine médiane



Moraine frontale



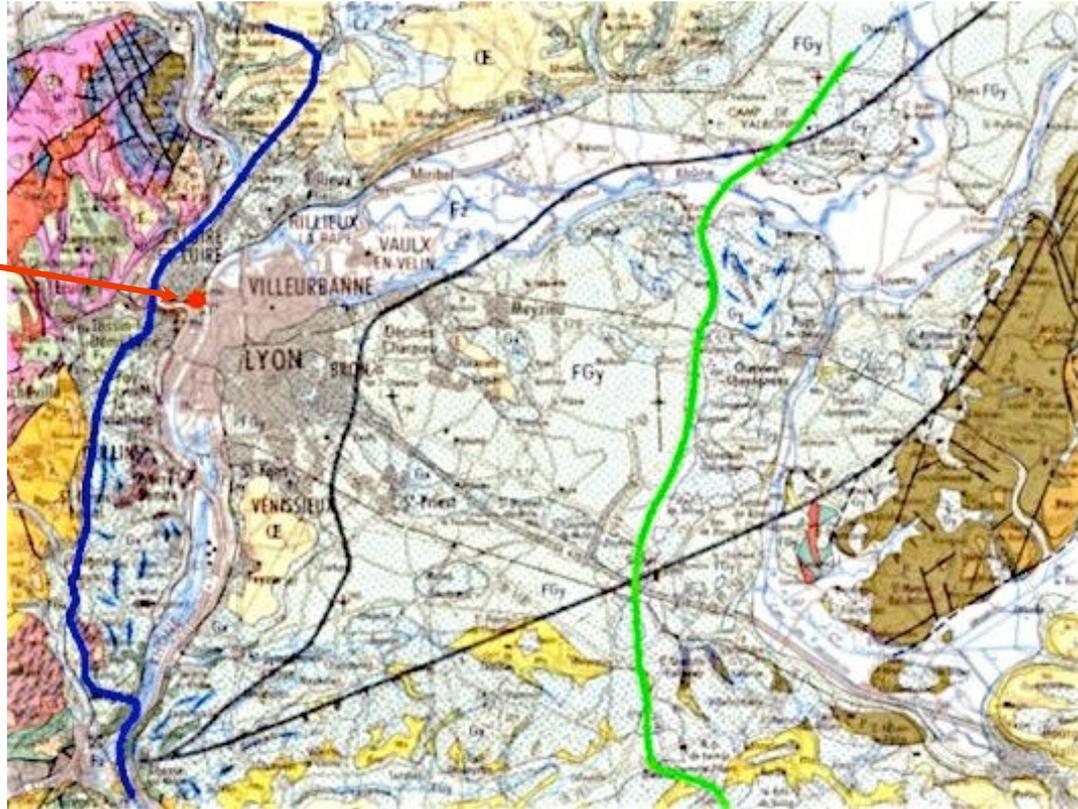
Galet strié

L'avancée maximale des glaciers retrouvée



Le « Gros caillou » de la Croix-Rousse, à Lyon : un bloc erratique.

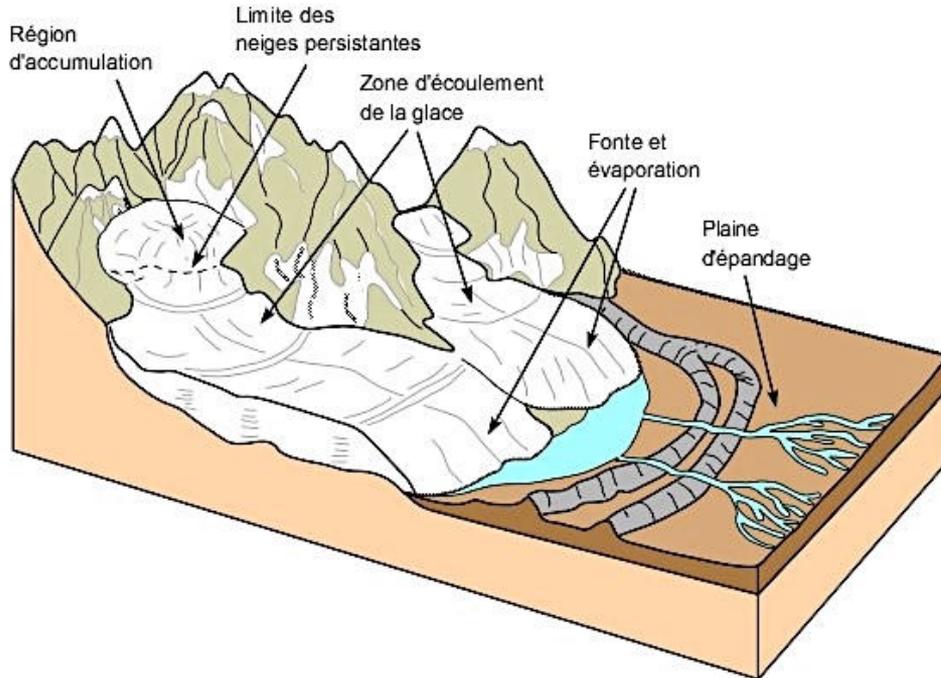
Dégagé au début du XXe siècle lors des travaux d'aménagement d'un funiculaire, ce gros caillou est constitué de quartzite triasique métamorphique. Les affleurements de ce type de terrain les plus proches sont situés en Haute Maurienne ou en Haute Tarentaise (Savoie), à plus de 175 km de Lyon.



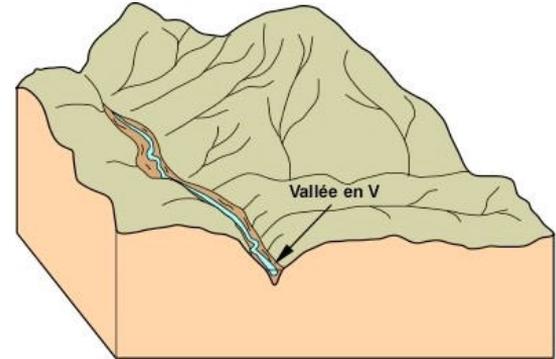
En bleu foncé : moraine terminale du Riss (- 140 000 ans)

En vert: moraine terminale du Würm (-18 000 ans). *Source : eduterre.fr*

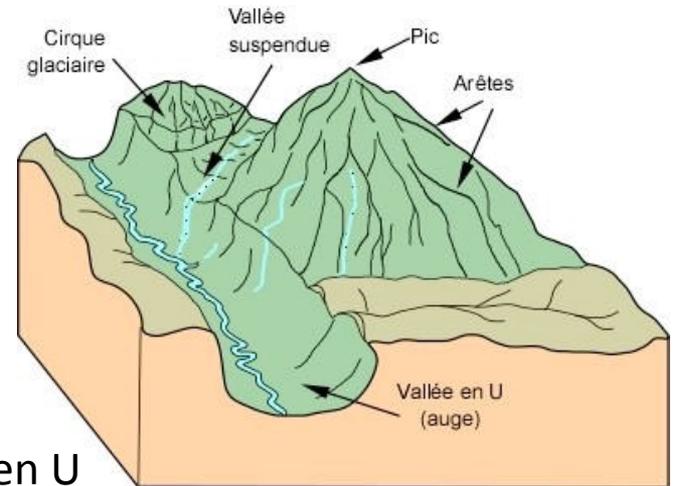
Les indices glaciaires



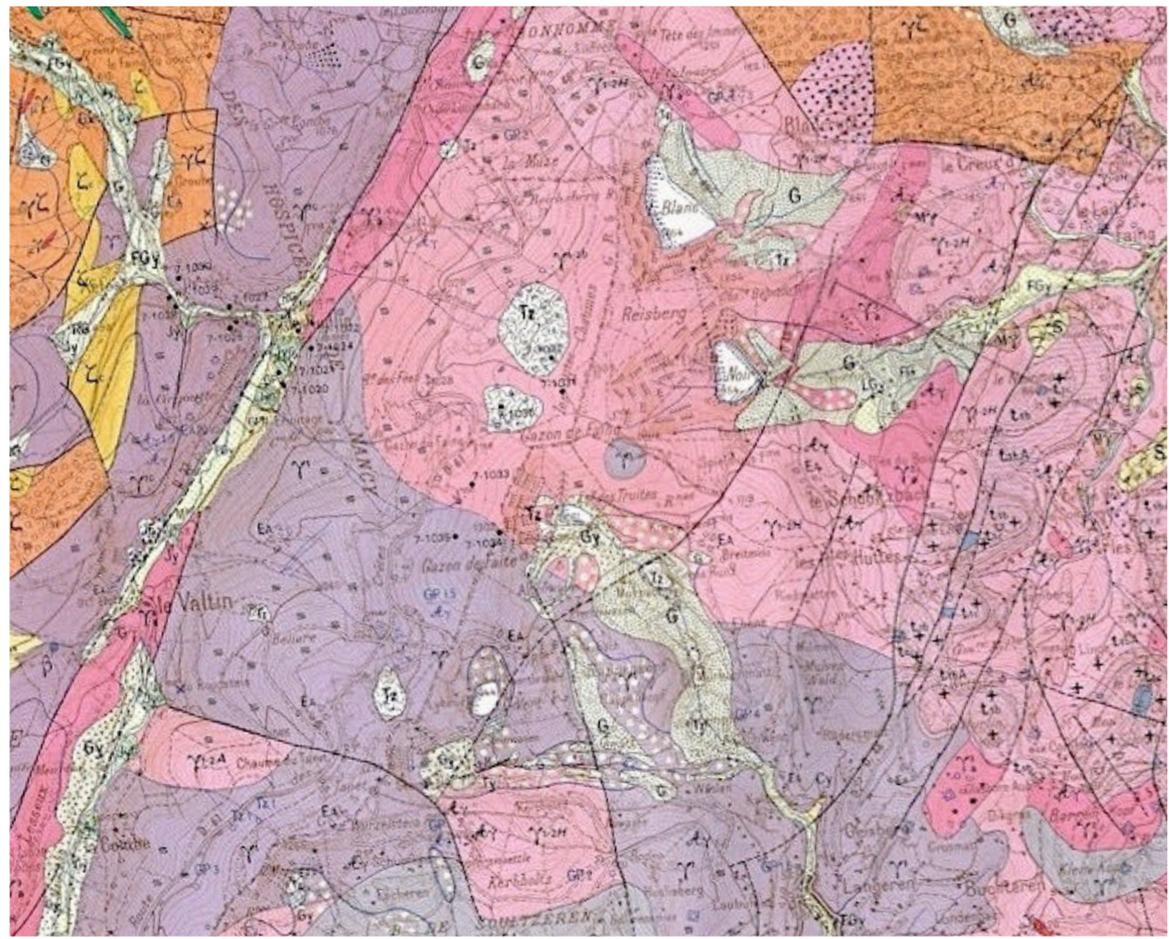
Vallée creusée par un glacier : en U



Vallée creusée par une rivière : en V

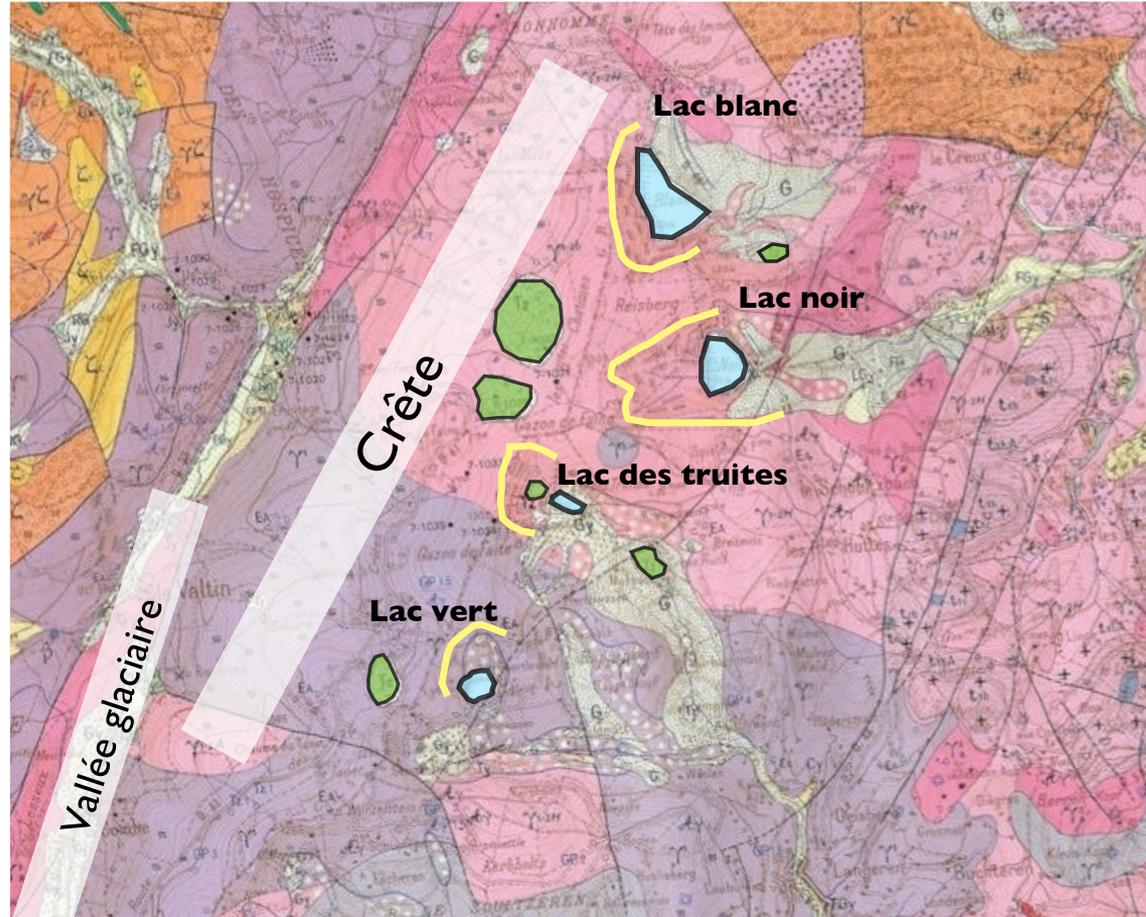


Carte de Gérardmer

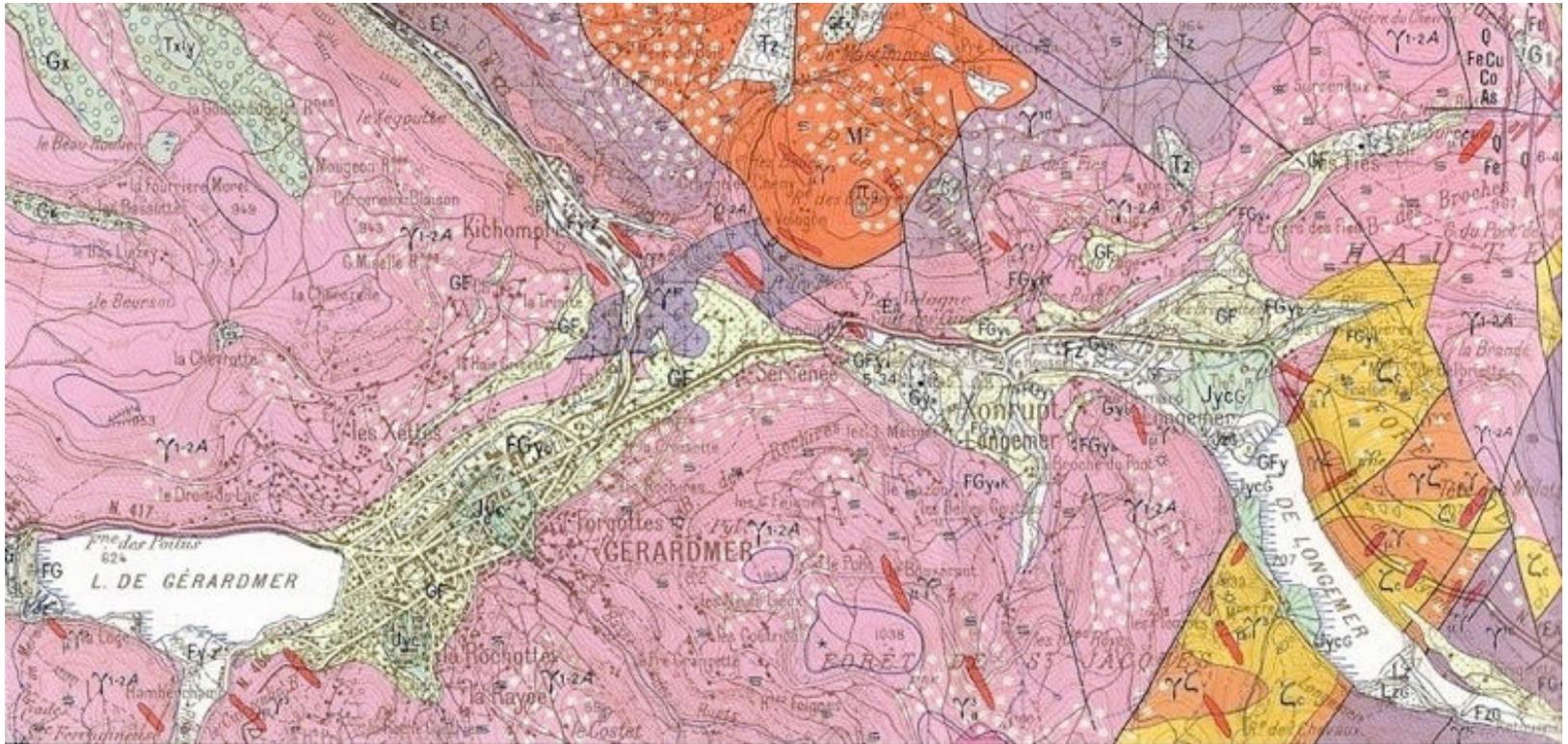


Les indices de glaciation passée

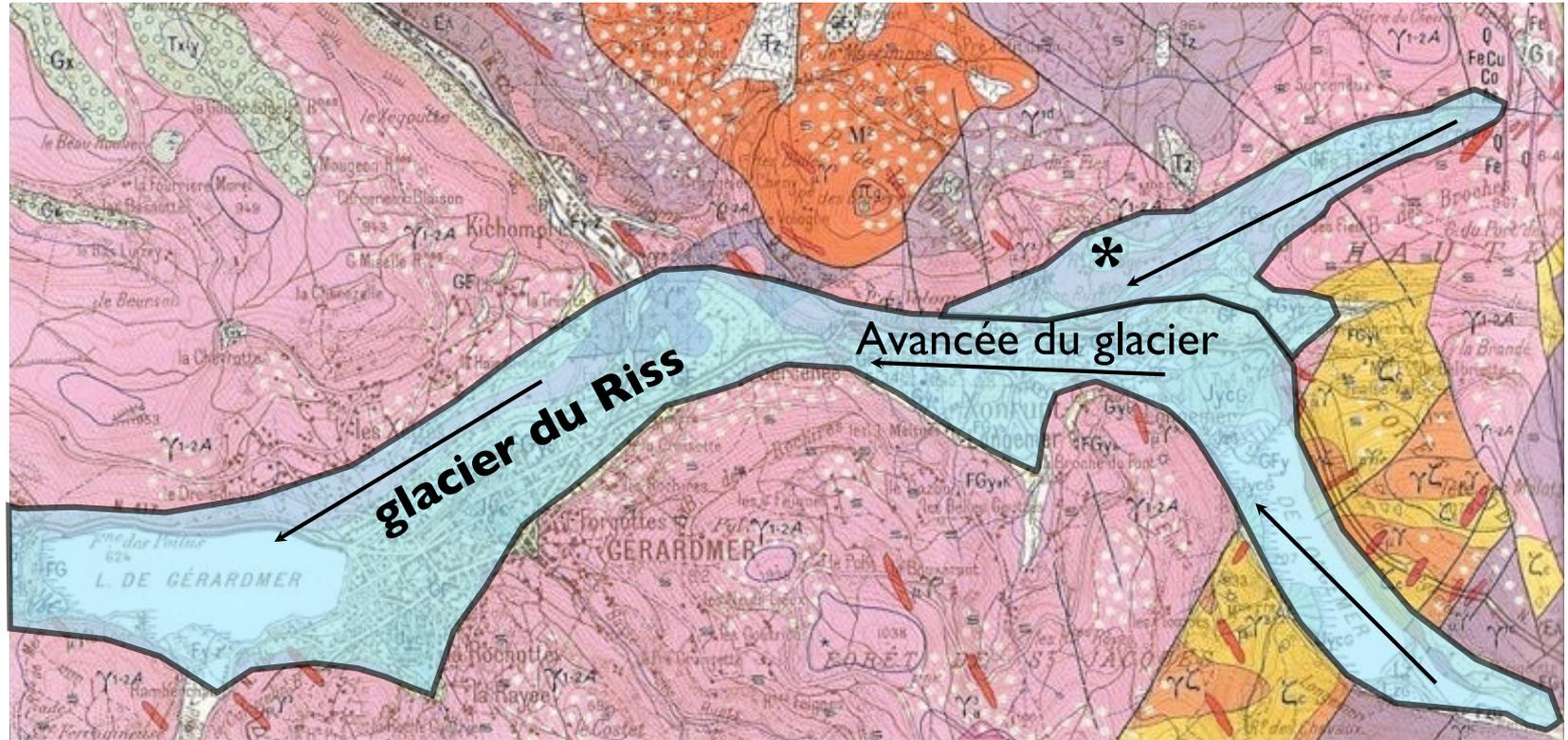
- Tourbière 
- Lac glaciaire 
- Falaise 
- G : moraines d'âge Riss (x) à Würm (y)



La vallée glaciaire



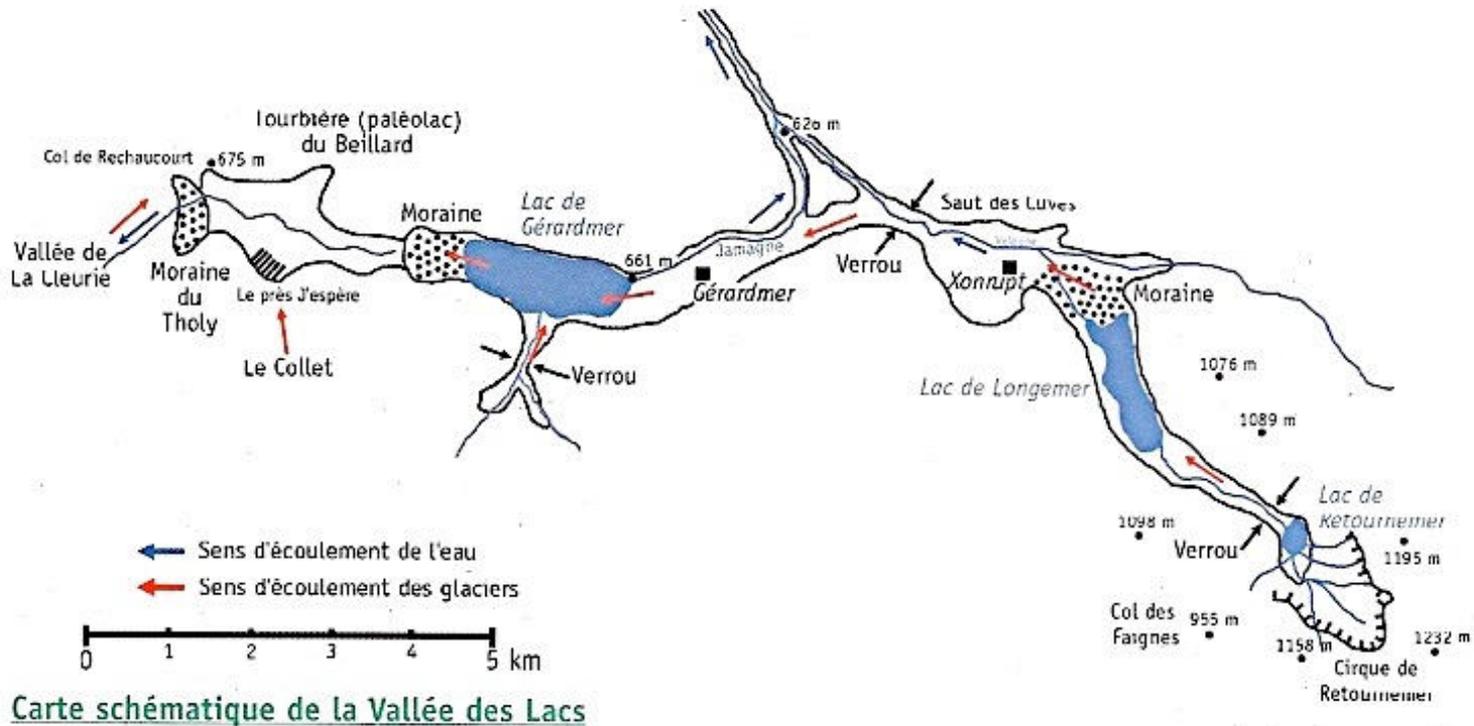
Reconstitution du glacier



* Roche du page

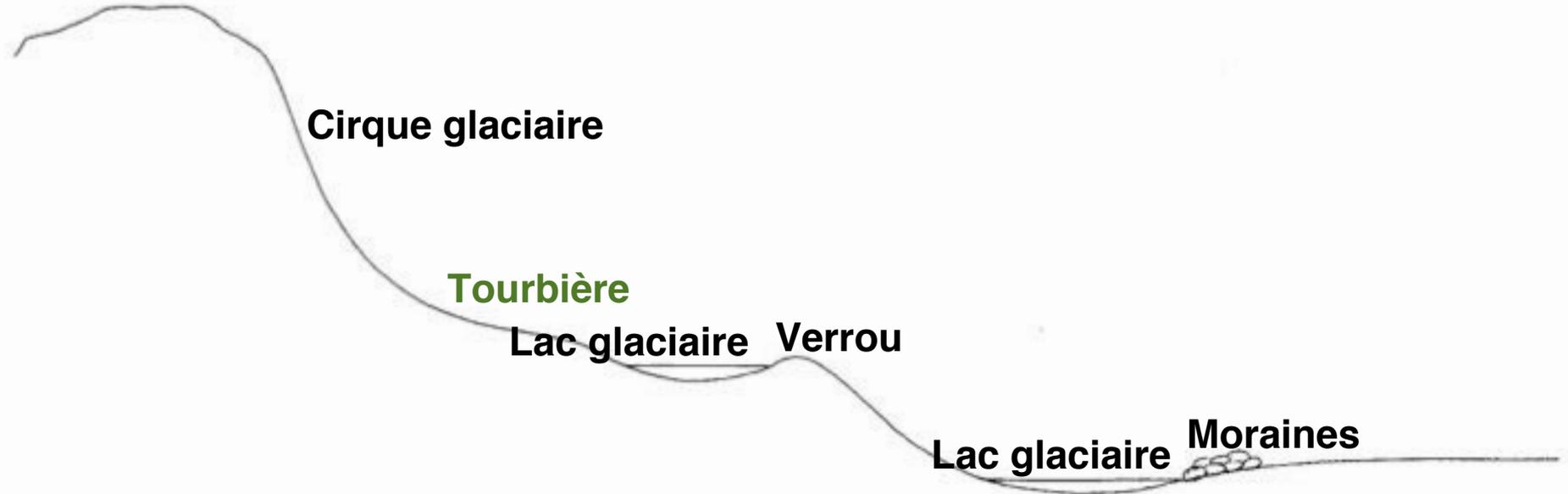
cirque de
Retournemer

Reconstitution de l'ère glaciaire



Un profil glaciaire

Hautes-chaumes



1. La diversité des paysages

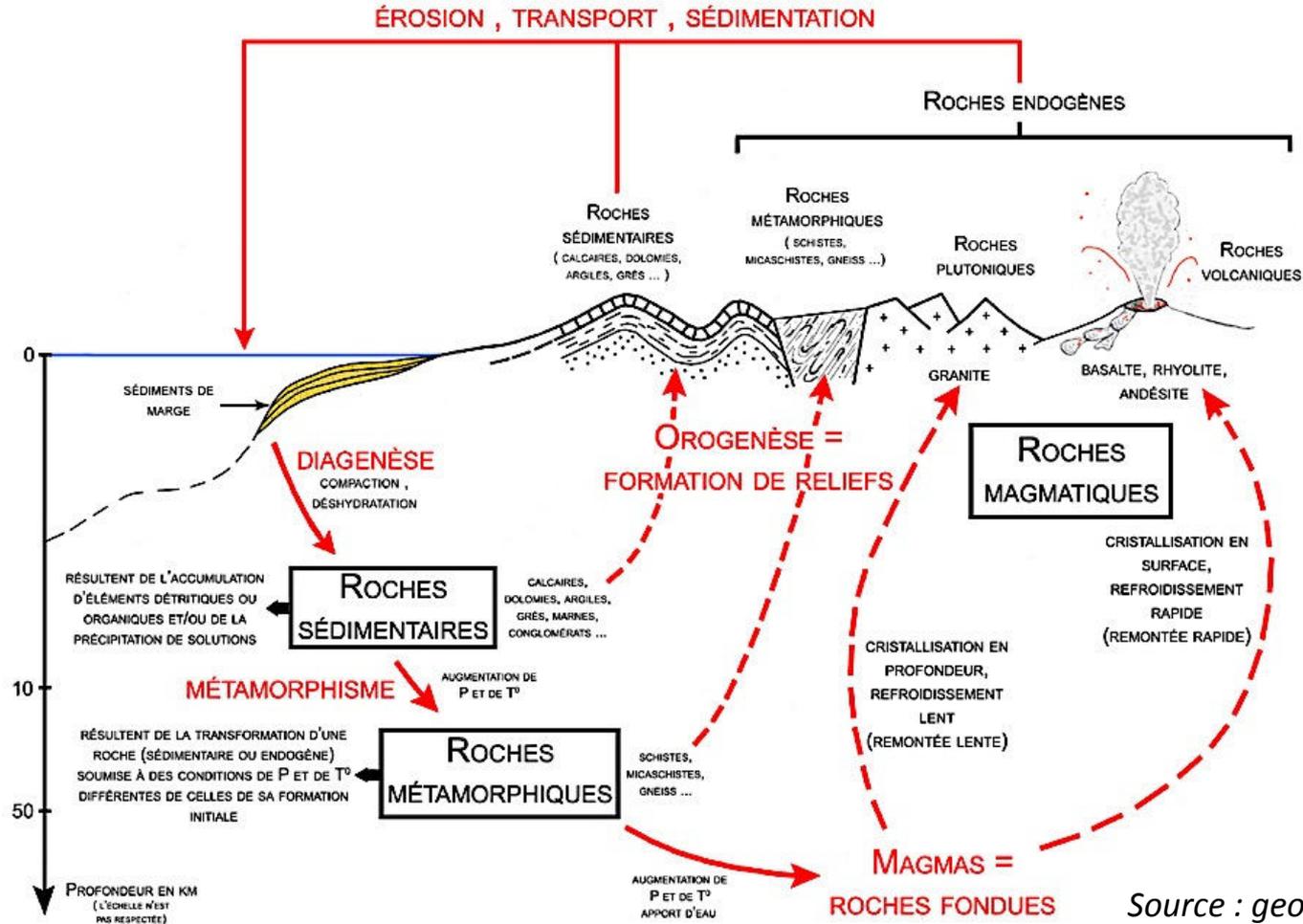
1.3. Bilan : altération et érosion déterminent l'avenir d'un paysage

Érosion et transport



Eau chargée en argile

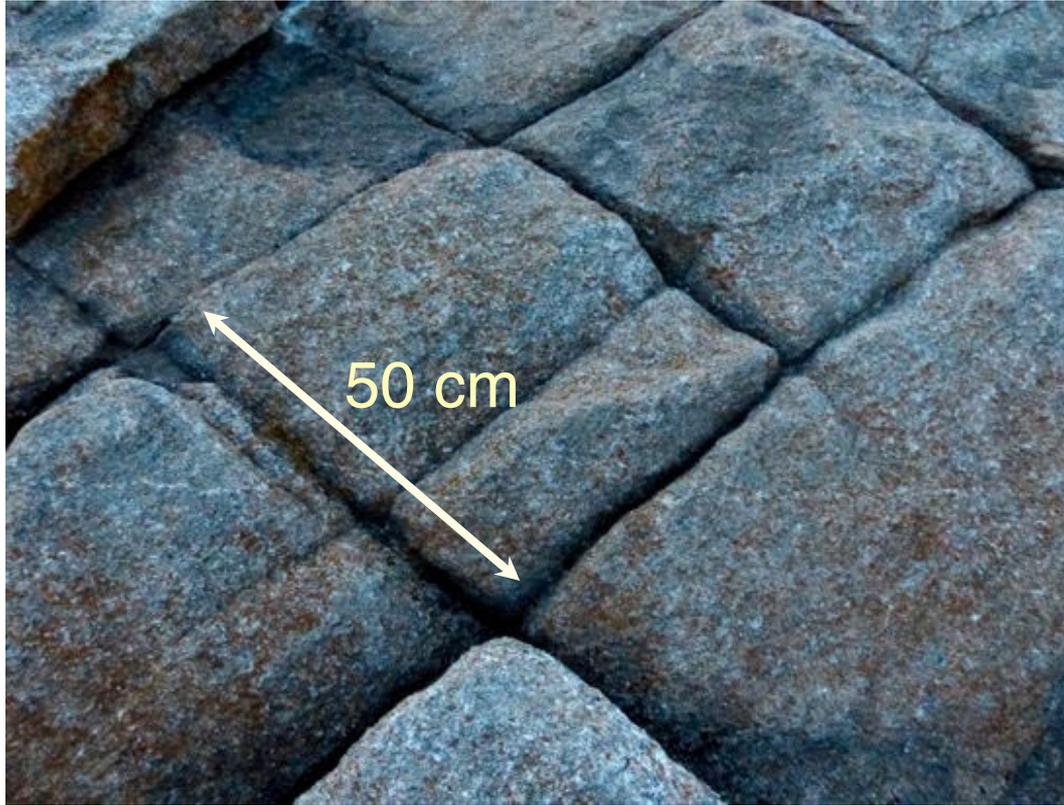
BILAN



2. Les processus d'altération

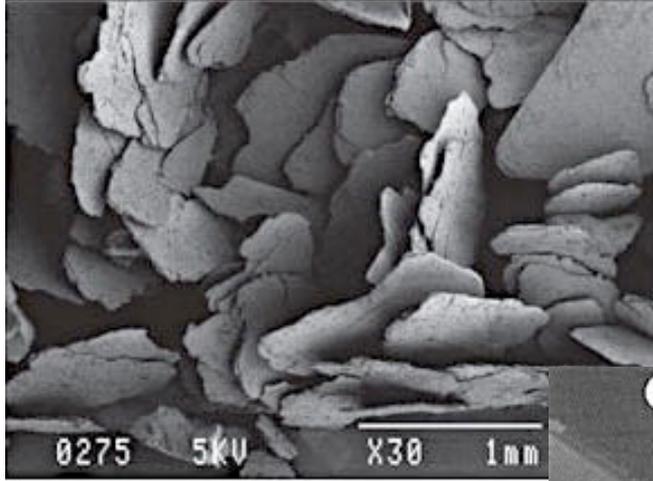
2.1. La désagrégation mécanique et ses moteurs

Les diaclases, zones de fragilité et d'infiltration

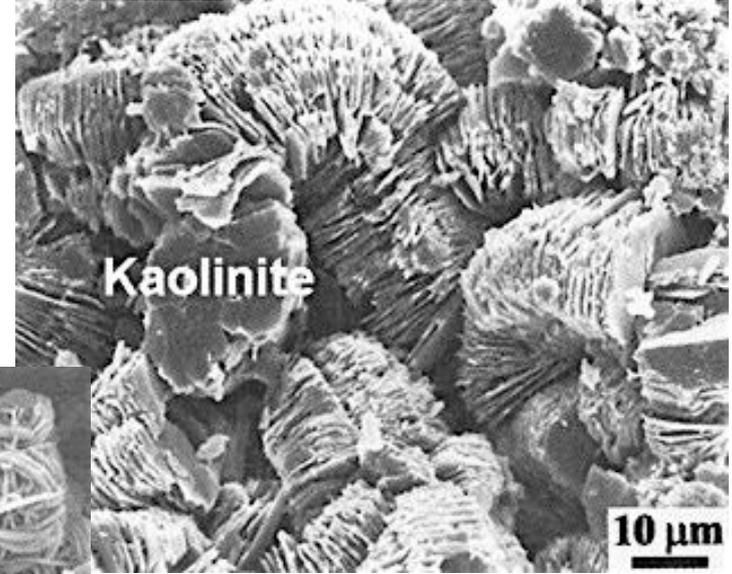


Dalle de granite (Quiberon)

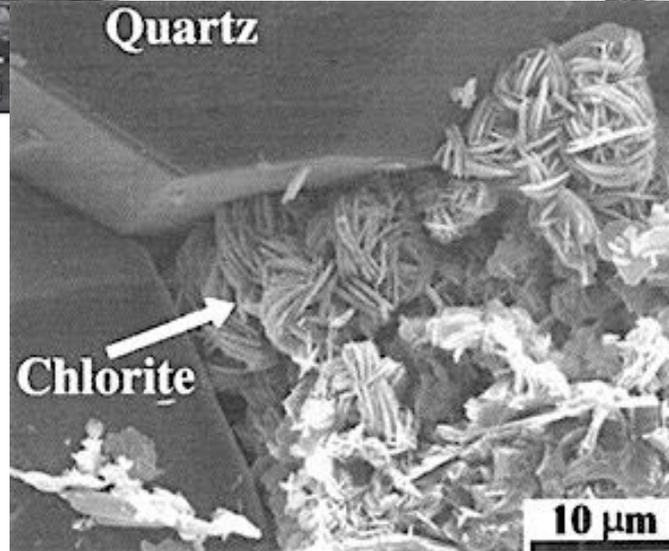
Les phyllosilicates, des minéraux qui gonflent



Mica



Kaolinite



Chlorite

La cryoclastie



© C. Escuyer



Photographie : Pierre Thomas



Photographie : Till Niemann

Effets de la biosphère



Effets :

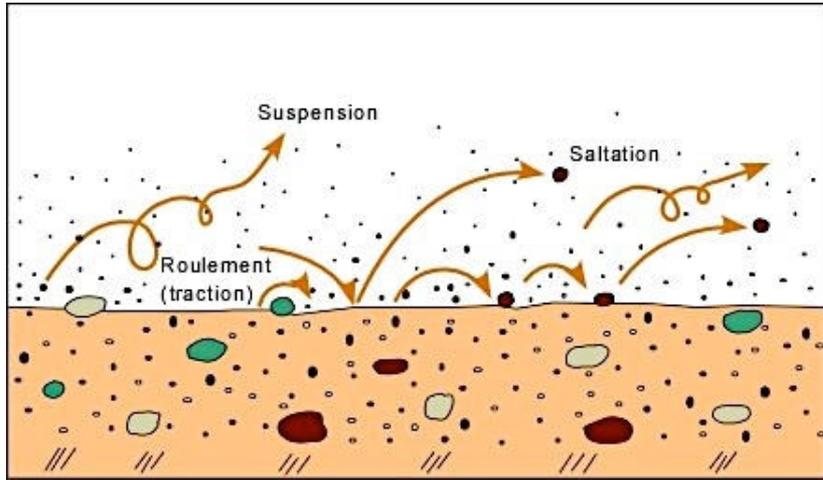
- des organismes fousseurs
- de l'acidification des sols au contact des racines
- de la force des racines en croissance

Effet de la gravité



La chute provoque la fragmentation des blocs

Abrasion par le sable



Encoche d'usure par les galets soumis aux vagues



e = encoche d'érosion

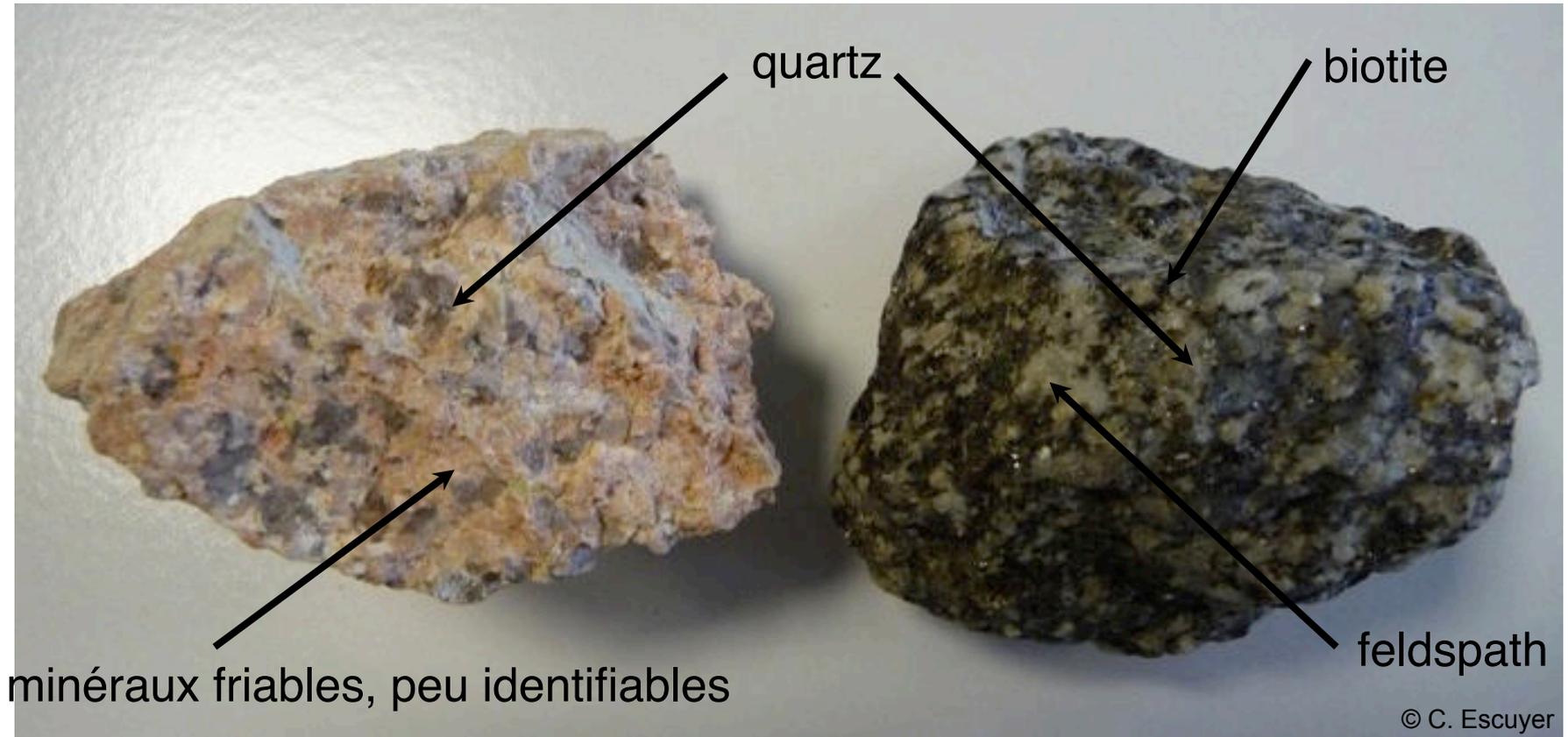
g = galets

b = blocs tombés

2. Les processus d'altération

2.2. L'altération chimique des roches silicatées

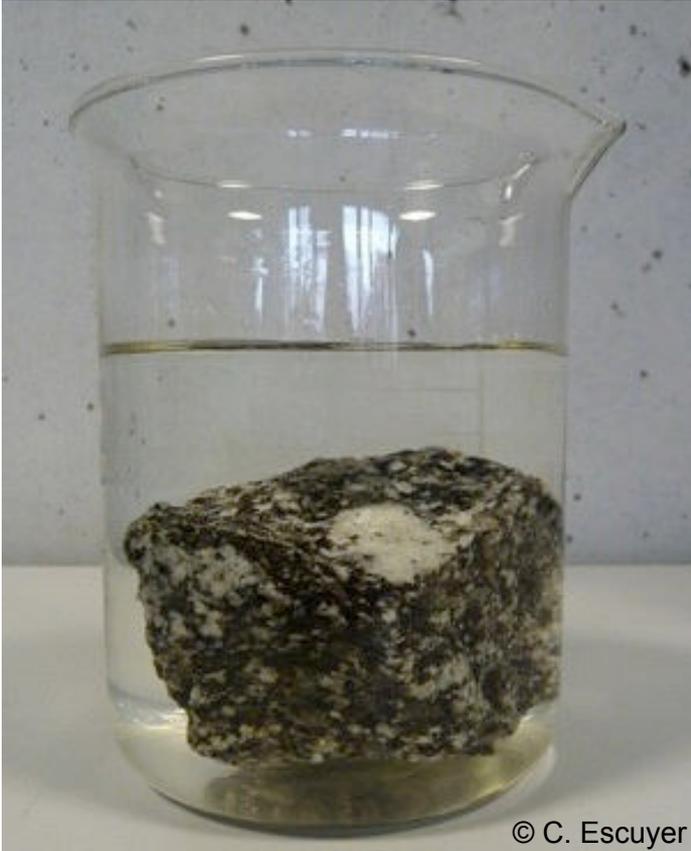
Granite sain – granite altéré



Granite altéré

Granite sain

De granite à l'arène granitique



© C. Escuyer

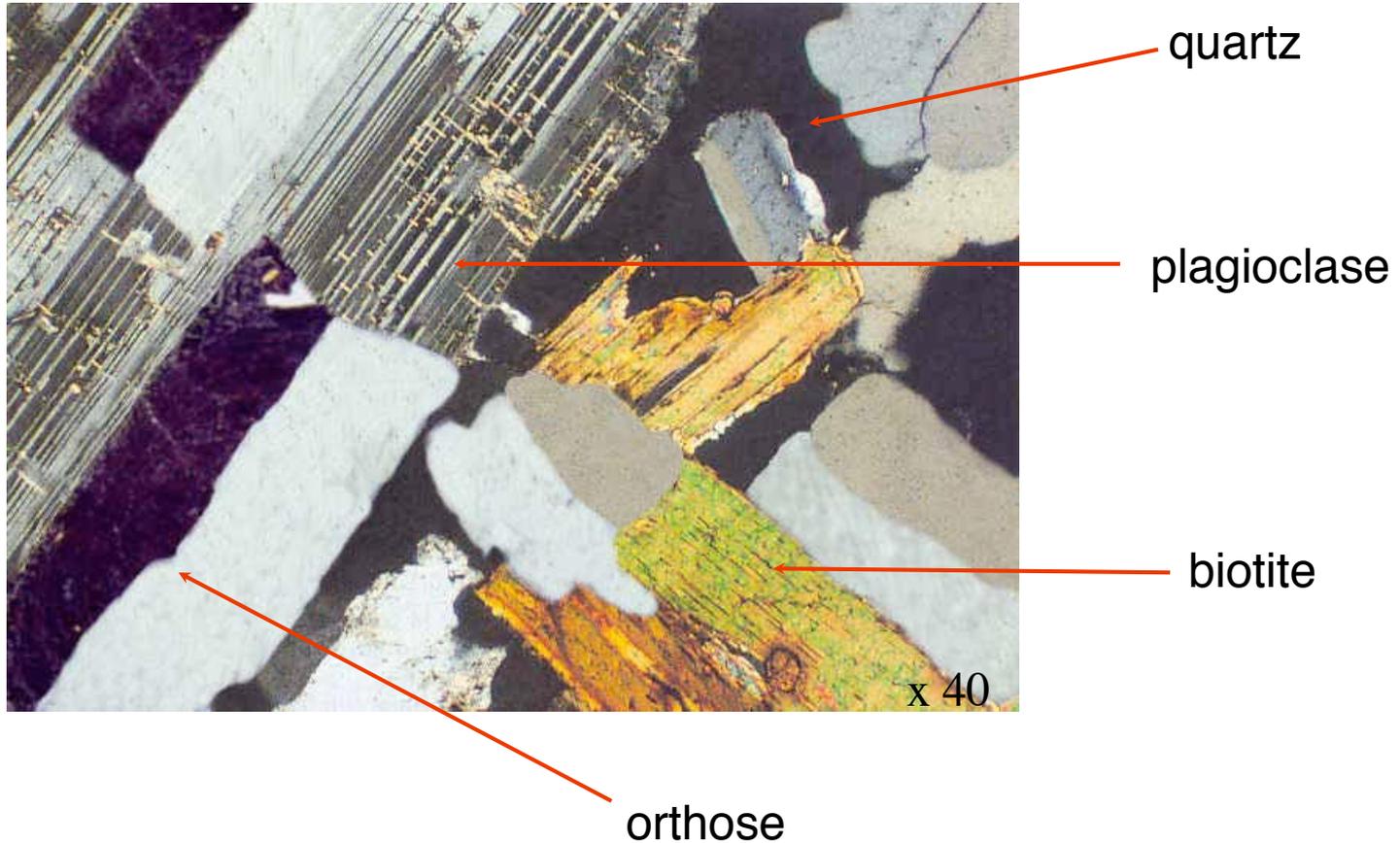
Granite sain



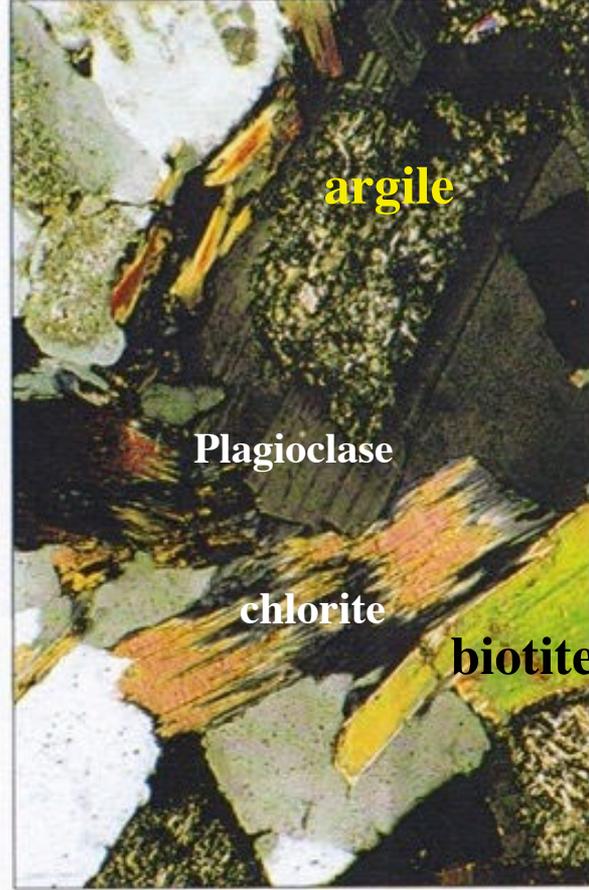
© C. Escuyer

Granite altéré

Granite sain



Granite altéré = pourri



Étude quantitative en climat tempéré

1. Les analyses minéralogiques pondérales d'un granite et de son arène donnent les résultats suivants en g.dm^{-3} .

1.1. Comparer la masse volumique du granite à celle de son arène. Comment expliquer la différence ?

	Granite frais	Arène
Quartz	830	800
Biotite	450	220
Plagioclase	810	115
Orthose	560	520
Argile	0	345
Masse totale	2 650	2 000

1.2. Exprimer dans le tableau suivant la teneur des minéraux en % et la variation de la valeur.

	Analyse pondérale (%)		Variations	
	Granite frais	Arène	Valeur	Valeur relative (%)
Quartz	31	40	+9	+29
Biotite	17	11	-6	-35
Plagioclase	31	5,75	-25,25	-81,5
Orthose	21	26	+5	+24
Argile	0	17,25	+17,25	

1.3. Classer les minéraux dans l'ordre décroissant de leur altérabilité.

Plagioclase - biotite - orthose - quartz

1.4. Préciser l'origine de l'argile. L'argile ne peut provenir que de la transformation des minéraux dont la teneur diminue (plagioclase et biotite).

2. Les analyses chimiques exprimées en % du granite et de son arène donnent pour divers oxydes les résultats suivants :

	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	MgO	CaO	Na₂O	K₂O	H₂O
Granitee	70	14,5	3,8	1,2	1,5	3	5	1
Arène	67	15	4	0,7	0,3	0,6	3	9,4

2.1. Exprimer dans le tableau suivant la masse des différents oxydes en g.dm^{-3} , en prenant en compte les densités de 2,65 pour le granite et de 2 pour l'arène. Puis compléter avec la variation de la valeur (absolue et en %).

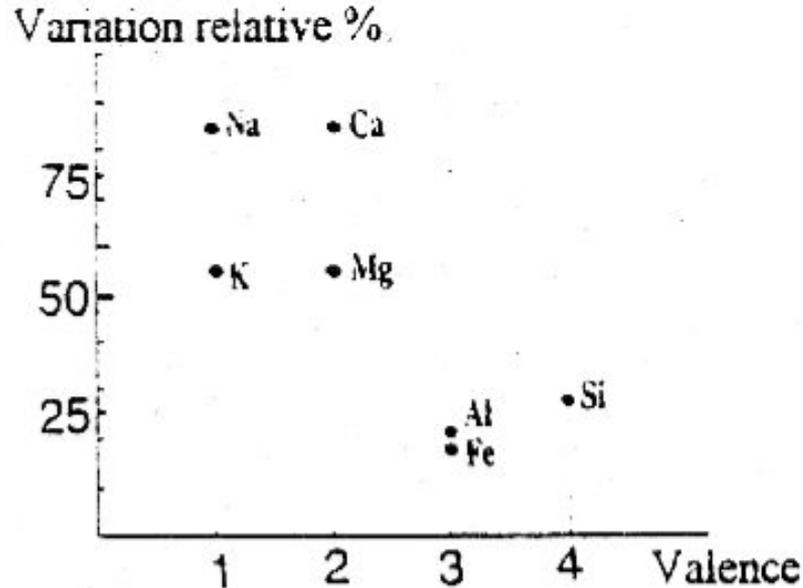
	Masse en g.dm^{-3}		Variations	
	Granite frais	Arène	valeur absolue	valeur relative %
SiO ₂	1855	1340	-515	-28
Al ₂ O ₃	384,2	300	-84,2	-22
Fe ₂ O ₃	100,7	80	-207	-20
MgO	31,8	14	-17,8	-56
CaO	39,8	6	-33,8	-85
Na ₂ O	79,5	12	-67,5	-85
K ₂ O	132,5	60	-72,5	-55
H ₂ O	26,5	188	+161,5	+609
total	2650	2000	-650	-24,5

2.2. Classer les oxydes par ordre décroissant de mobilisation.

CaO, Na₂O, MgO et K₂O à mobilisation forte.

SiO₂, Al₂O₃ et Fe₂O₃ à mobilisation faible.

Construire un graphique en portant en abscisse la valence (c'est-à-dire la charge) de l'ion et en ordonnée le % de variation.



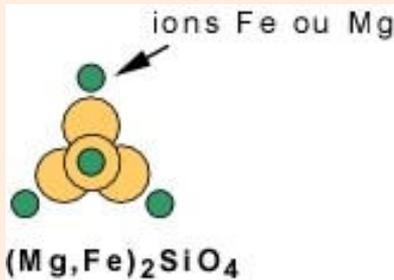
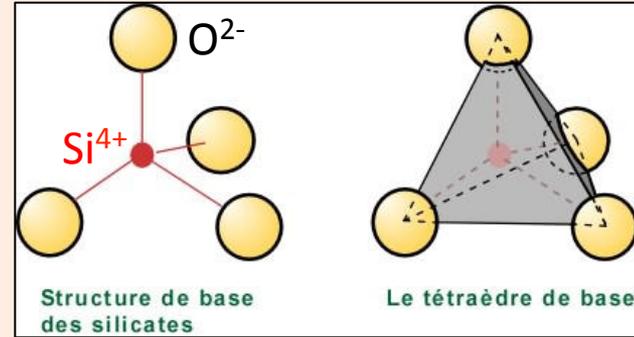
Si on pousse les réactions d'hydrolyse de façon plus intense, en lien avec un climat plus chaud et plus humide, on peut voir apparaître des argiles plus riches en Al³⁺ et Fe³⁺ mais appauvries en Si⁴⁺. C'est le cas de la bauxite, argile contenant 50% d'Al₂O₃, de l'eau, du Fe₂O₃ et de la silice SiO₂ en faible proportion (5%).

La structure cristalline des silicates

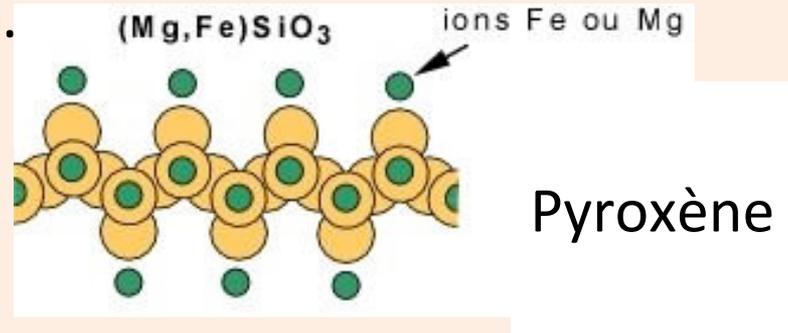
La maille de base est le tétraèdre SiO_4^{4-} .

Neutralisé par des cations Fe^{2+} ou Mg^{2+} : c'est l'olivine, un nésosilicate.

Des tétraèdres mis bout à bout constituent une chaîne simple (inosilicate) comme le pyroxène.



olivine



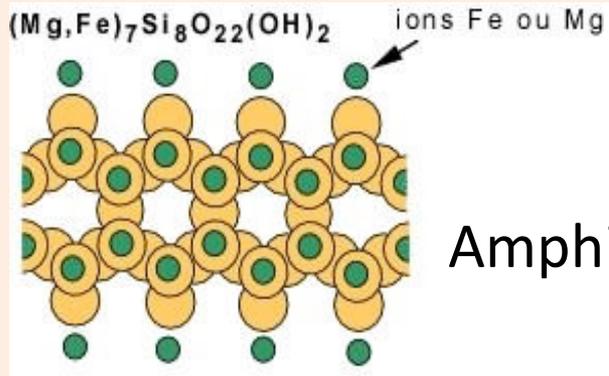
Pyroxène

La structure cristalline des silicates

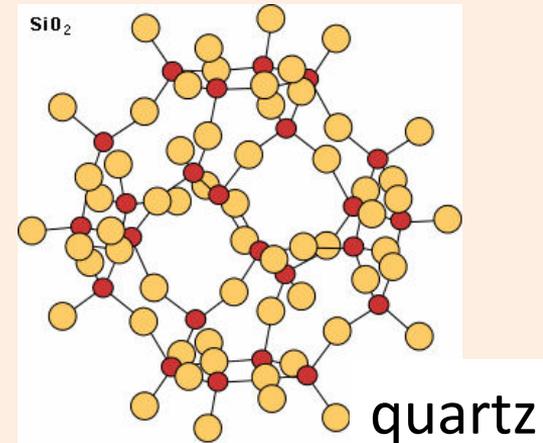
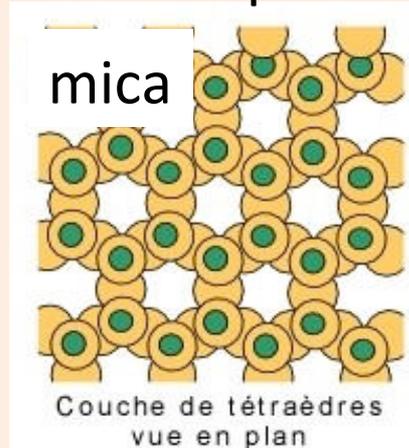
Des tétraèdres mis bout à bout en chaîne double (inosilicate) forment l'amphibole.

Des tétraèdres unis par en couche plane forment les phyllosilicates comme le mica.

Des tétraèdres unis par tous les oxygènes constituent le cristal le plus résistant : tectosilicate : quartz et feldspaths.

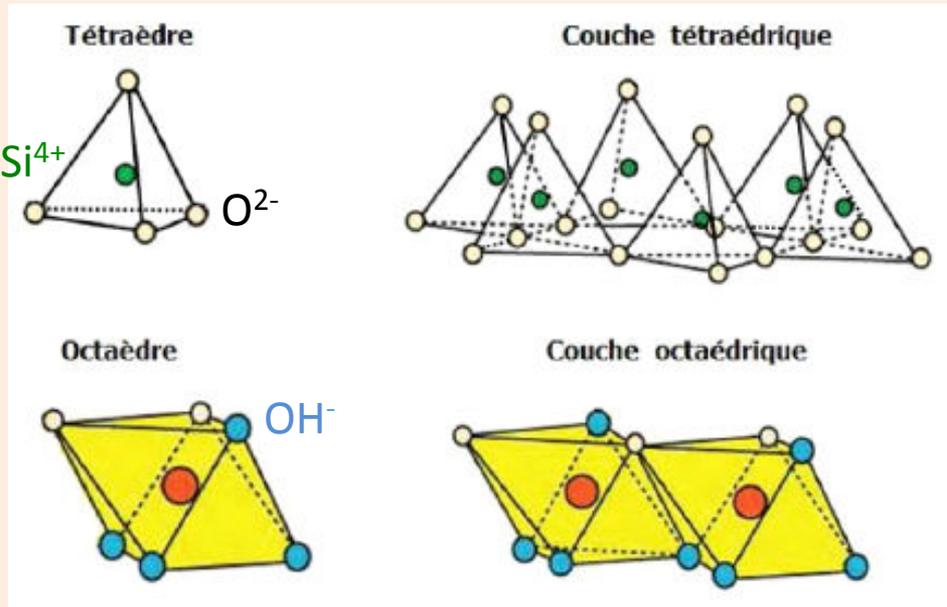


Amphibole



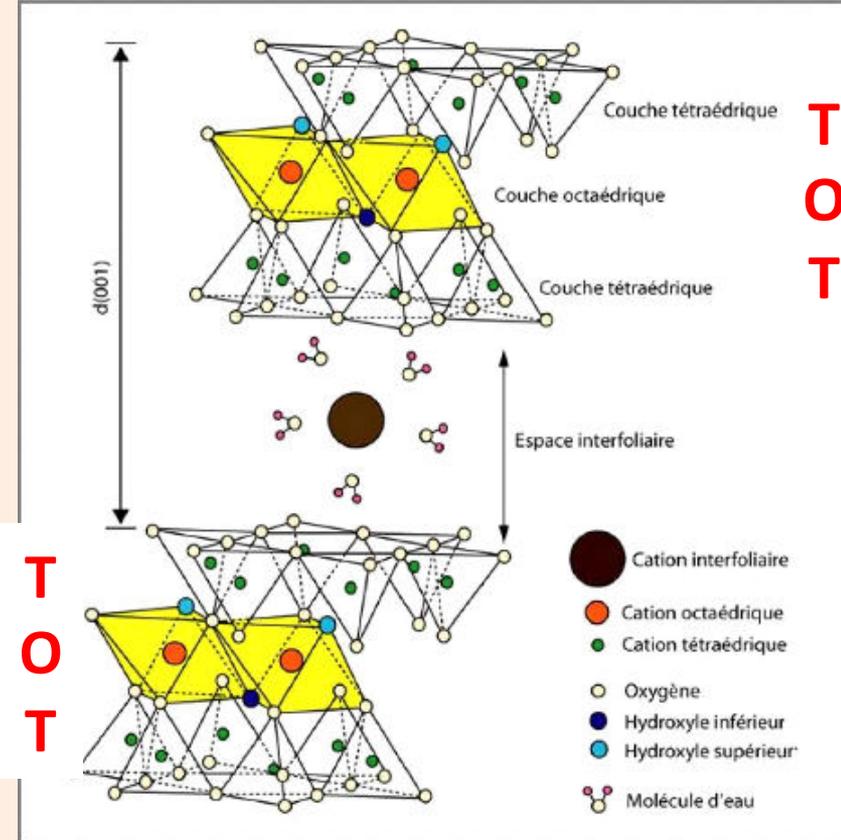
Les phyllosilicates

Si Si^{4+} est remplacé par Al^{3+} ou Mg^{2+} , cela modifie la géométrie : les atomes s'assemblent en octaèdres.



Al^{3+} ou Mg^{2+}

Tétraèdres et octaèdres s'empilent

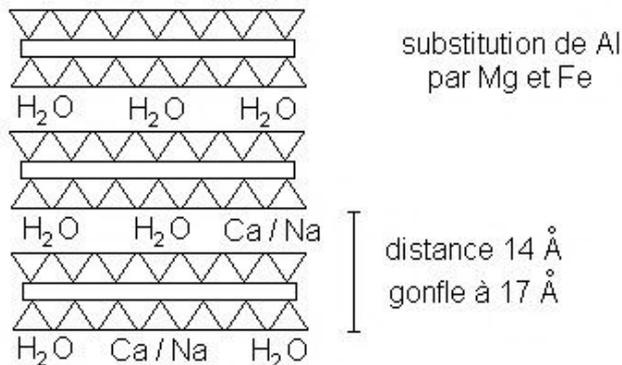


Source : Thèse de El Hachmi, 2013

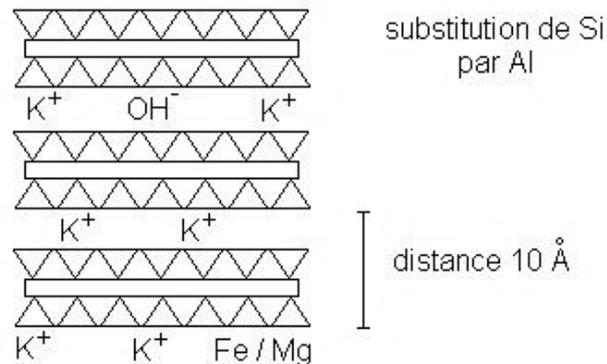
Classification des phyllosilicates : les bisiallites

Les argiles de type TOT sont des empilements de tétraèdre-octaèdre-tétraèdre : seule change la composition entre les feuillet

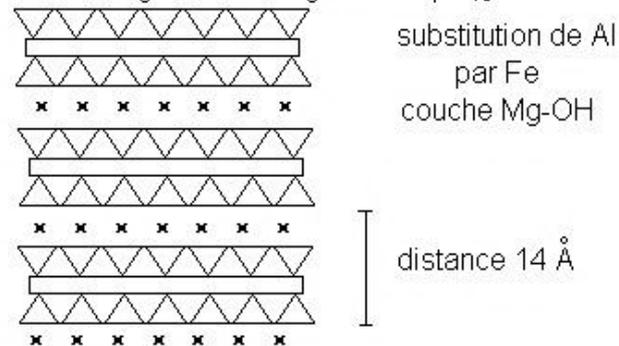
SMECTITES $2 \text{Al}_2\text{O}_3, 8 \text{SiO}_2, 2 \text{H}_2\text{O}, n \text{H}_2\text{O}$
(Montmorillonite) $(\text{Mg}, \text{Ca}) \text{O}, \text{Al}_2\text{O}_3, 5 \text{SiO}_2, n \text{H}_2\text{O}$



ILLITE $\text{K Al}_2(\text{OH})_2, (\text{Al Si}_3(\text{O}, \text{OH})_{10})$

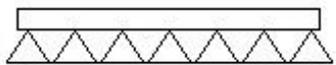


CHLORITE $\text{Mg}_5(\text{Al}, \text{Fe})(\text{OH})_8(\text{Al}, \text{Si})_4 \text{O}_{10}$

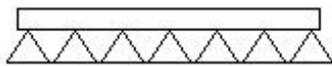
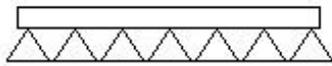


Classification des phyllosilicates : monosiallite et allite

KAOLINITE $\text{Al}_2\text{O}_3, 2\text{SiO}_2, 2\text{H}_2\text{O}$



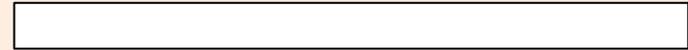
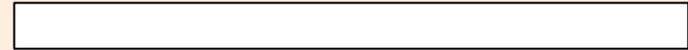
couche octaédrique
couche tétraédrique



distance inter-
réticulaire: 7 Å

GIBBSITE

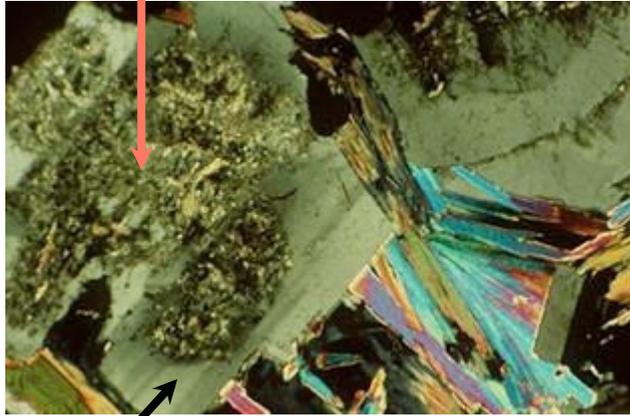
Octaèdres seulement



La kaolinite est une argile de type TO,
empilement de tétraèdre-octaèdre :
c'est un monosiallite

La gibbsite est une argile de type
allite, de formule $\text{Al}(\text{OH})_3$.

L'argilisation en climat tempéré



argile

feldspath



orthose = minéral I^{aire}

eau = solution
d'attaque



illite = minéral II^{aire}

entraînés en solution

Cette hydrolyse peu poussée est une bisiallisation.

Bilan de l'altération du granite en climat tempéré

Minéral primaire du granite	Minéral après hydrolyse en climat tempéré
Quartz	Quartz
Muscovite	Muscovite
Orthose	Illite
Biotite	Illite ou chlorite
Albite	Smectite
Anorthite	Kaolinite

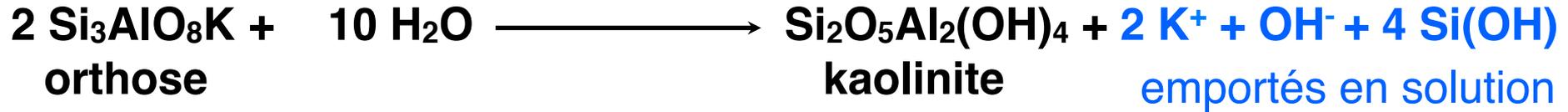
Bilan

En climat tempéré, les phénomènes d'hydrolyse sont modérés et n'affectent pas le quartz et la muscovite, qui restent en place sous la forme d'un sable, l'arène granitique.

Feldspaths et micas sont hydrolysés en argiles de type TOT : c'est la **bisiallisation**. De nombreux éléments minéraux comme les Ca^{2+} , Na^+ ... sont emportés par l'eau.

L'argilisation en climat tropical

feldspath \longrightarrow **kaolinite**



Cette hydrolyse poussée est une monosiallisation.

Bilan de l'altération du granite en climat tropical

Minéral primaire du granite	Minéral après hydrolyse en climat tropical
Quartz	Quartz
Muscovite	Illite
Orthose	Kaolinite à gibbsite
Biotite	
Albite	
Anorthite	Gibbsite

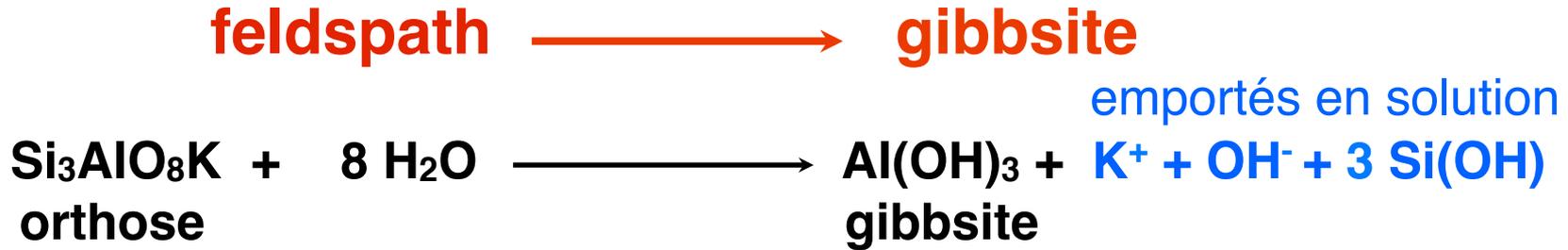
Bilan

En climat tropical, les phénomènes d'hydrolyse sont plus poussés et n'affectent pas le quartz.

Les feldspaths et micas sont hydrolysés en argiles de type TO : c'est la **monosiallisation**.

L'argilisation poussée en climat équatorial

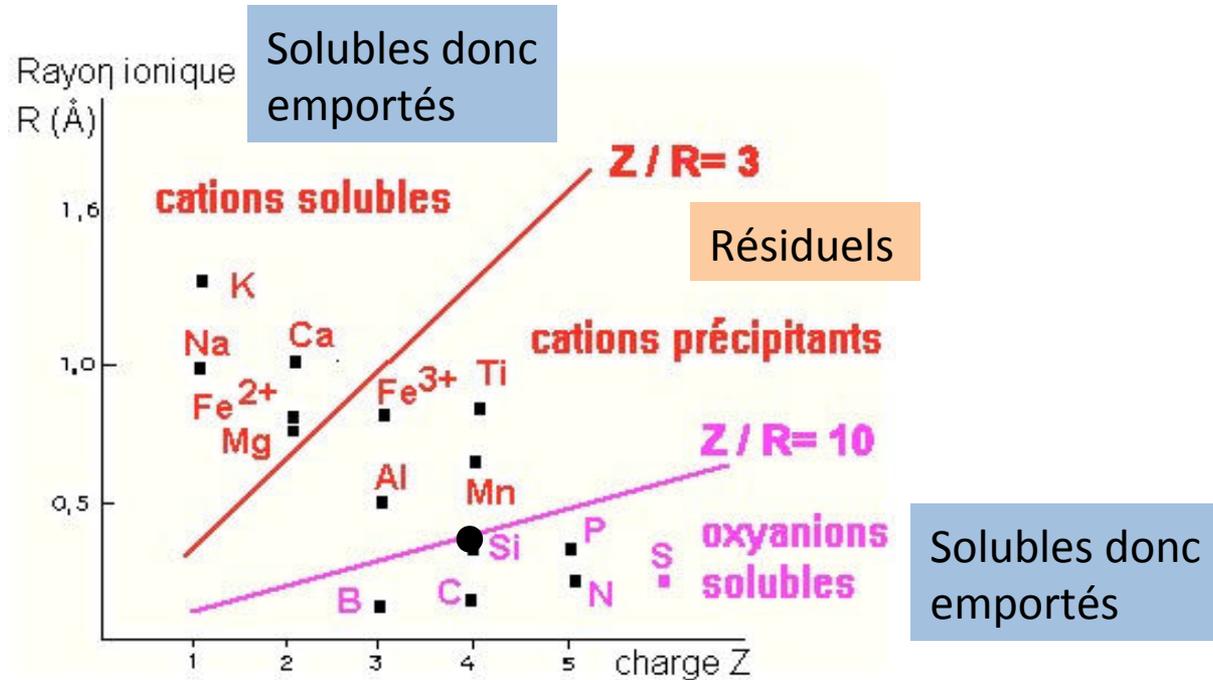
Si le drainage est très fort, toute la silice de la kaolinite est évacuée et il ne reste que la gibbsite, $\text{Al}(\text{OH})_3$, insoluble. Le processus est alors l'**allitisation**.



Cette hydrolyse très poussée est une allitisation. Gibbsite et goethite ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) forment une argile dure en surface : la latérite.

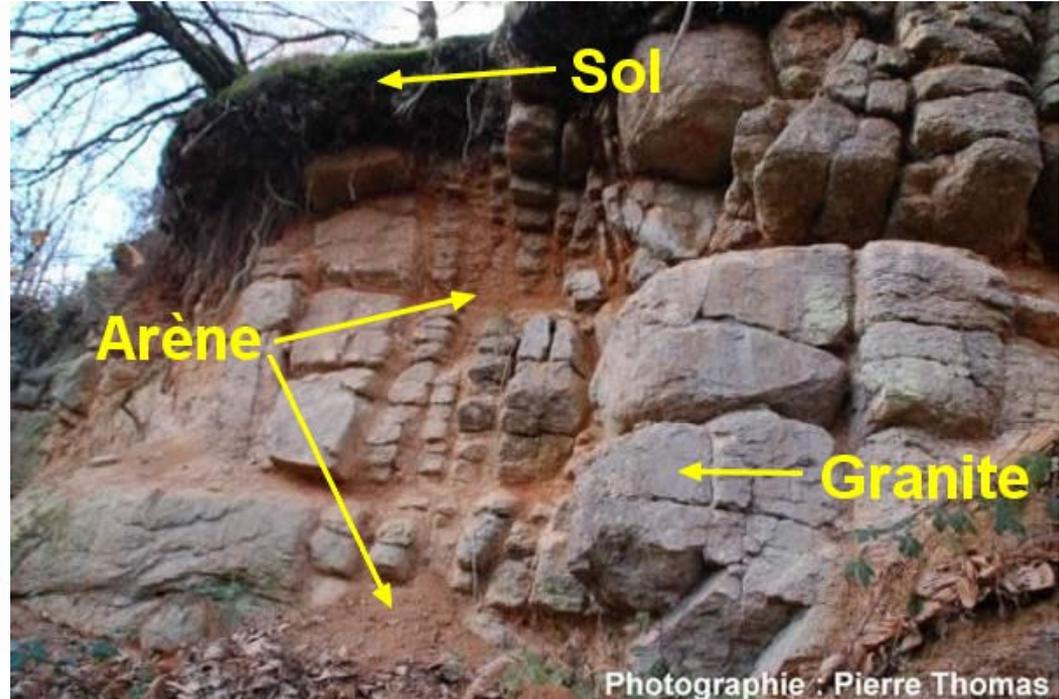
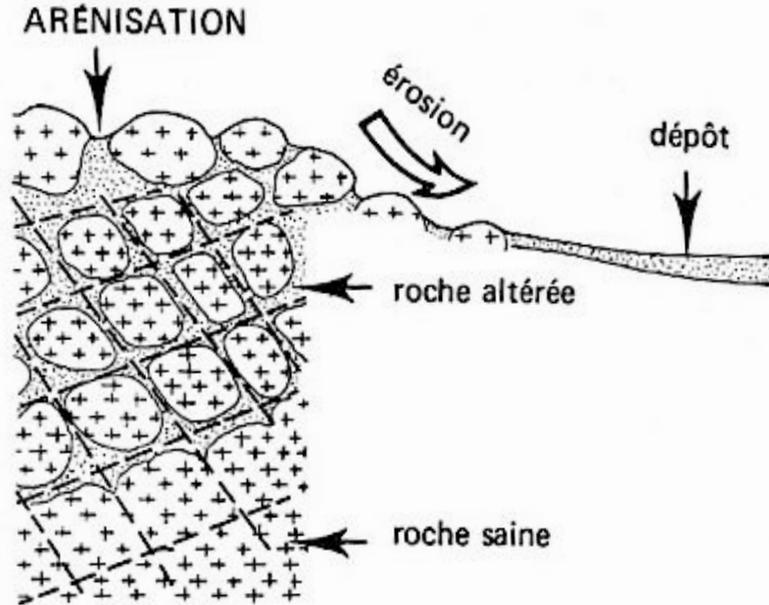
L'eau emporte certains éléments

Le potentiel ionique = Z/r conditionne la mobilité des ions.



Il s'opère alors un tri géochimique.

Le paysage granitique en climat tempéré



Le paysage granitique en climat tempéré

Un chaos de granite se forme lorsque l'arène est emportée.

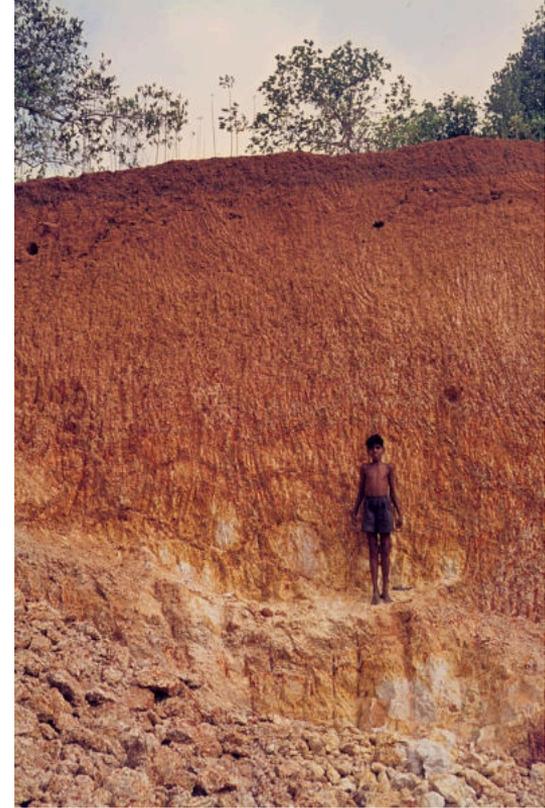


Ploumanac'h

Paysage granitique en climat tropical



Madagascar



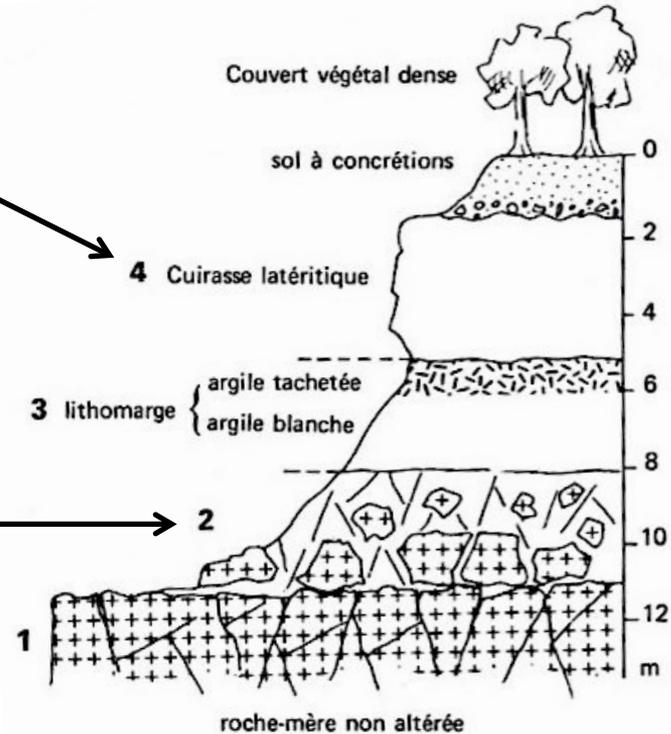
Source : <http://eduterre.ens-lyon.fr>

Le paysage granitique en climat tropical

$\text{Al}(\text{OH})_3$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$, kaolinite (argile)
Absence totale de Na, K et Ca

Kaolinite tachetée par des oxydes

Granite dissocié : désagrégation
mécanique

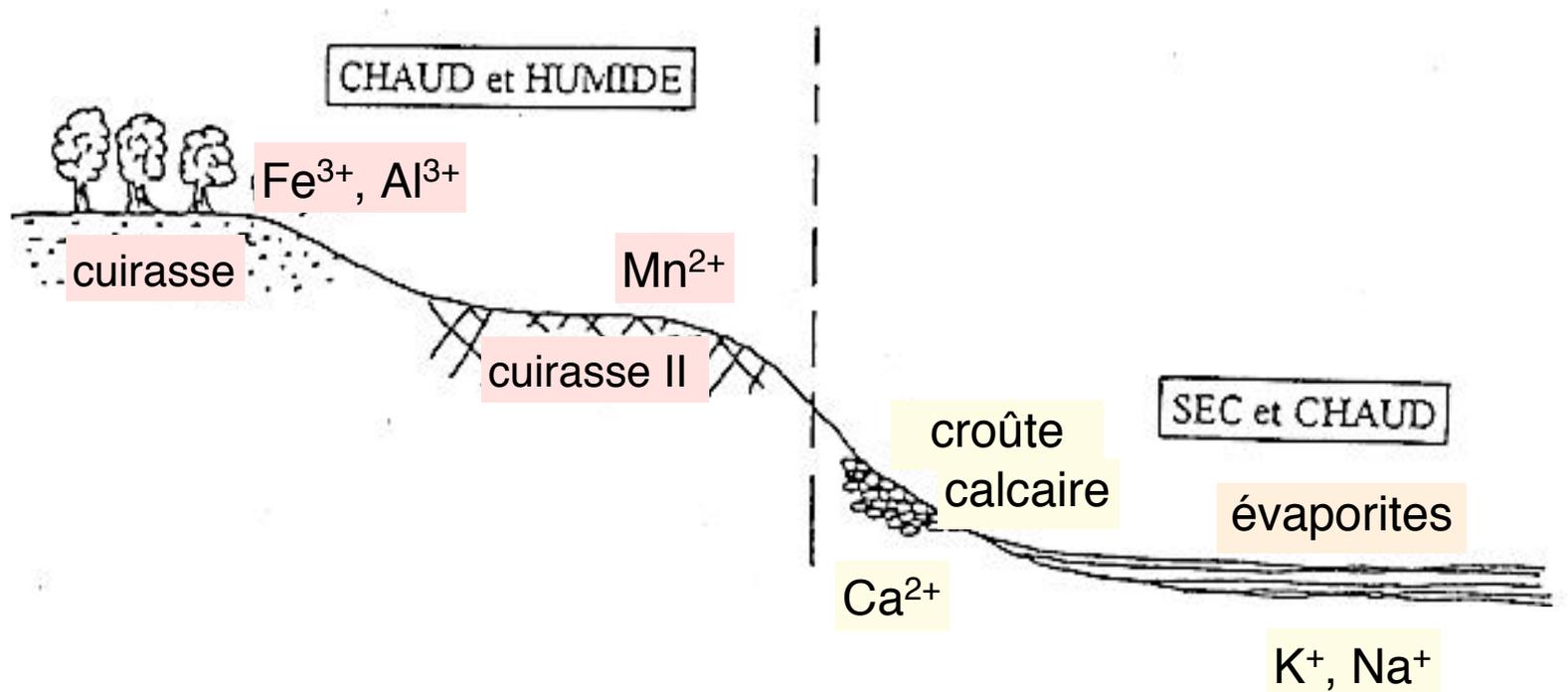


Les bauxites, ressources en aluminium



La diversité des couleurs est due à la variation de la quantité d'oxydes de fer contenus dans la bauxite, composée majoritairement de gibbsite $\text{Al}(\text{OH})_3$

Le devenir des ions



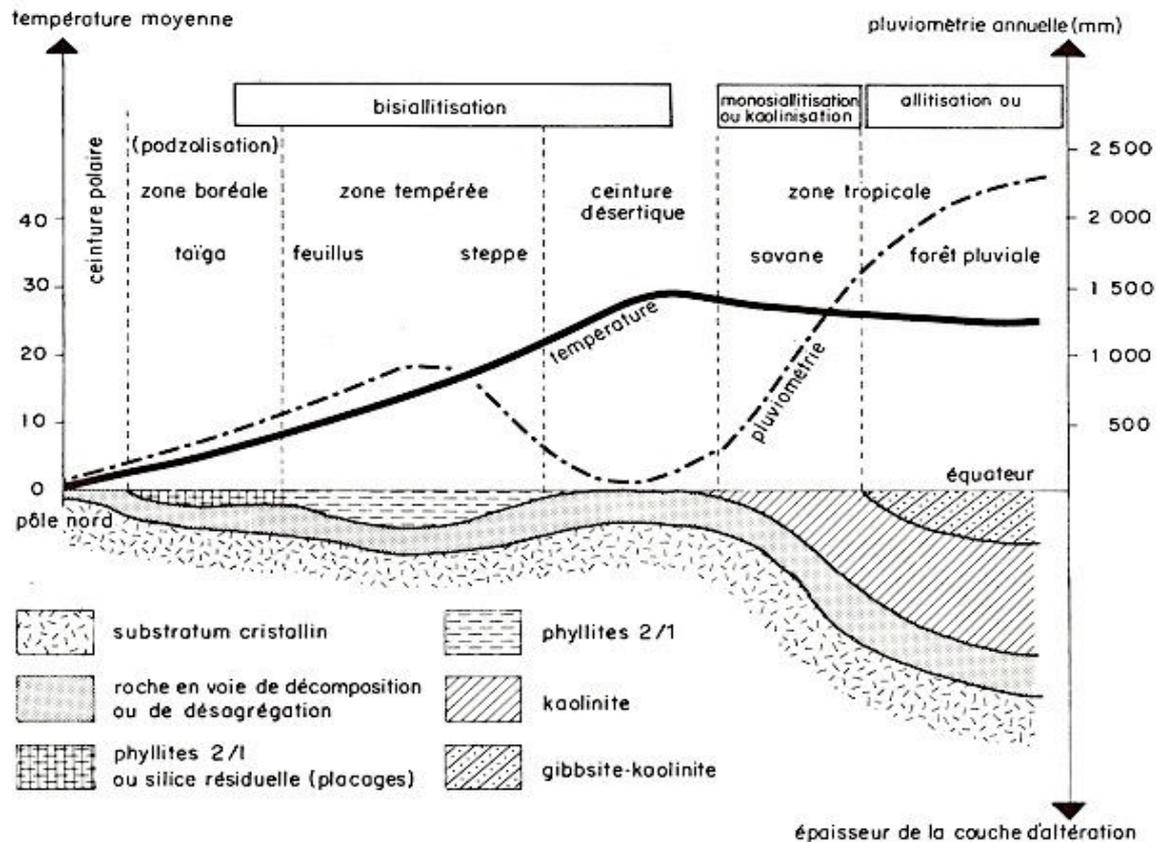
Il s'opère un tri géochimique.

Exploitation de la latérite

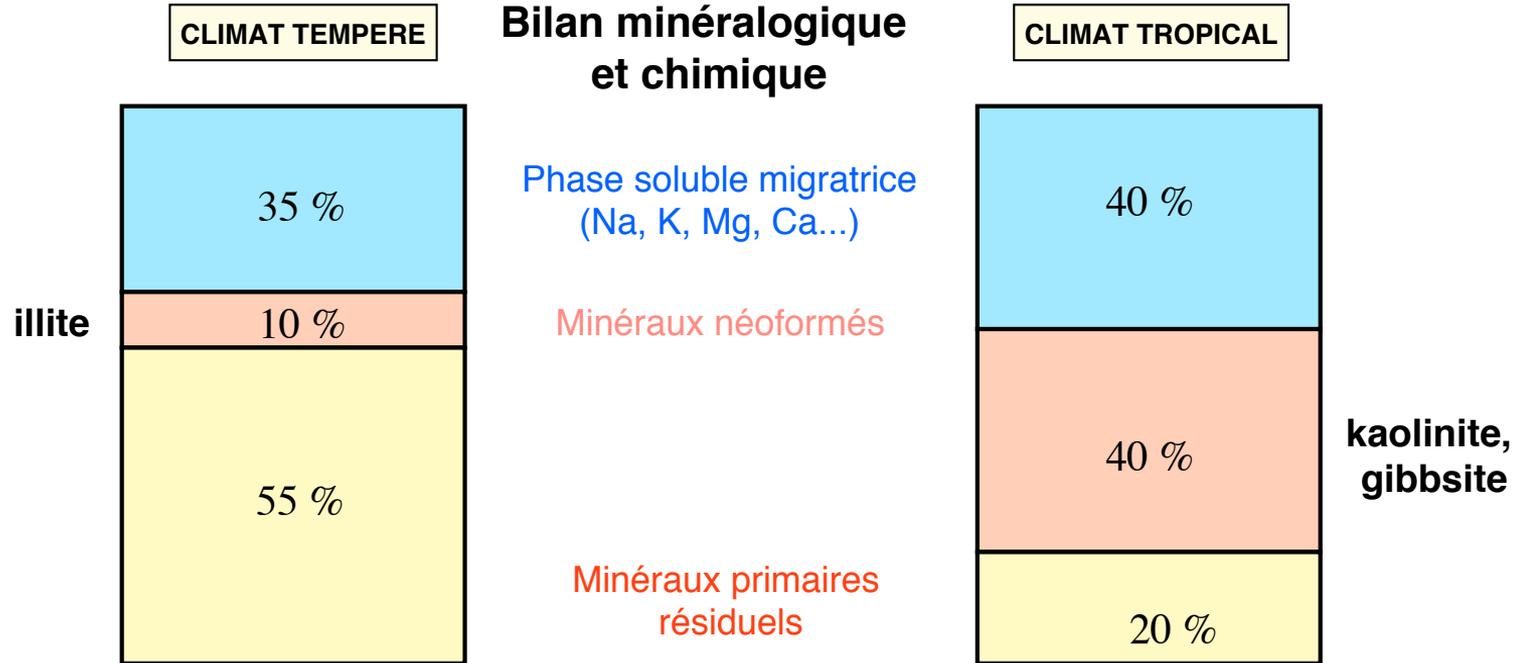


Exploitation de latérite au Burkina Faso

Altération et climat



Effet du climat



2. Les processus d'altération

2.3. L'altération chimique des roches calcaires

La dissolution des carbonates



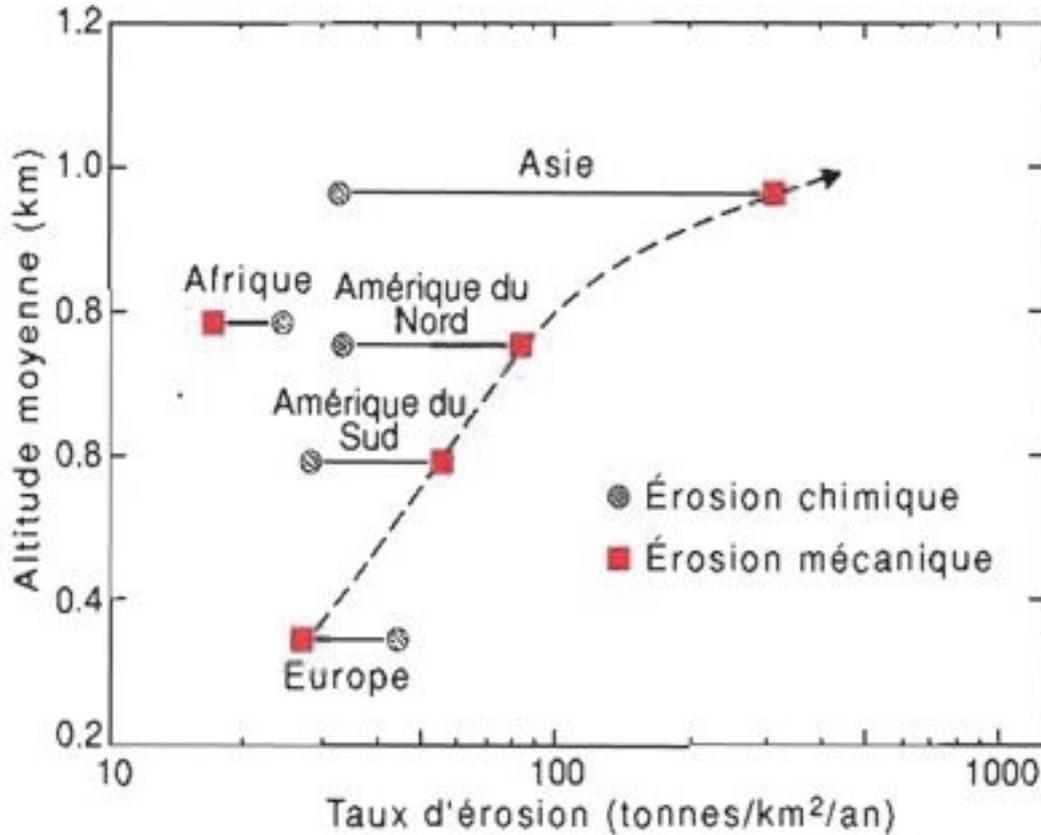
calcite



aragonite



BILAN



La désagrégation mécanique est corrélée à l'altitude moyenne, sauf pour l'Afrique (peu d'eau donc de cryoclastie).

L'altération chimique présente peu de variations entre les continents.

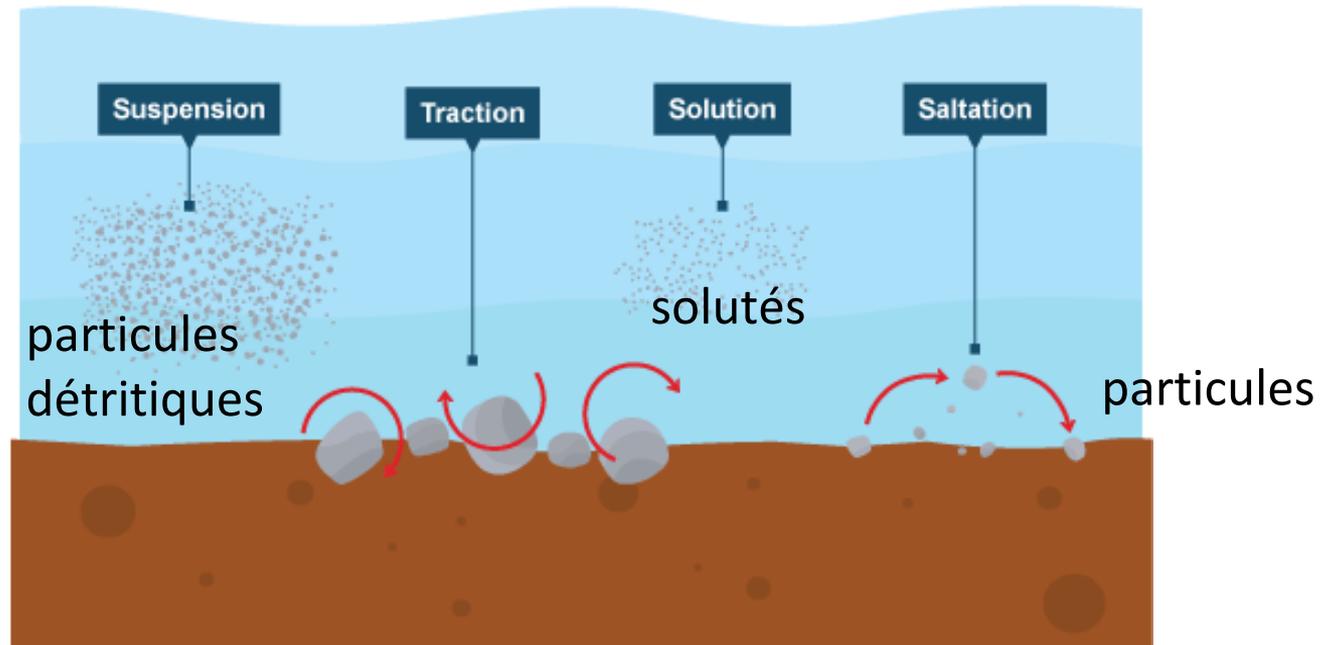
L'Europe présente de faibles reliefs donc peu d'altération mécanique.

3. Érosion et transport de matière

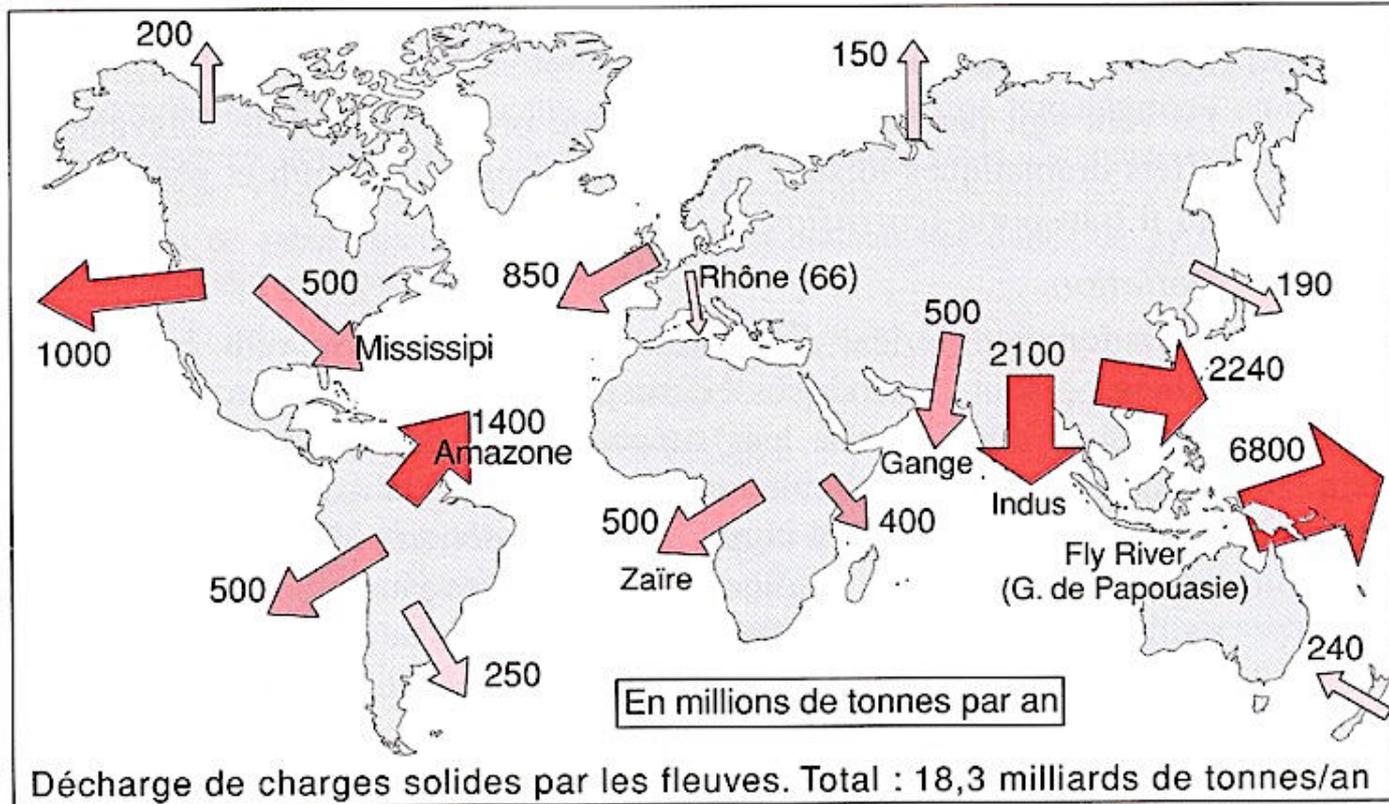
3.1. Flux de particules et flux de et solutés

La matière transportée

Apport de matière aux océans par les fleuves :
18,3 Gt.a⁻¹ de particules détritiques + 4,2 Gt.a⁻¹ de soluté



La charge des fleuves en particules détritiques



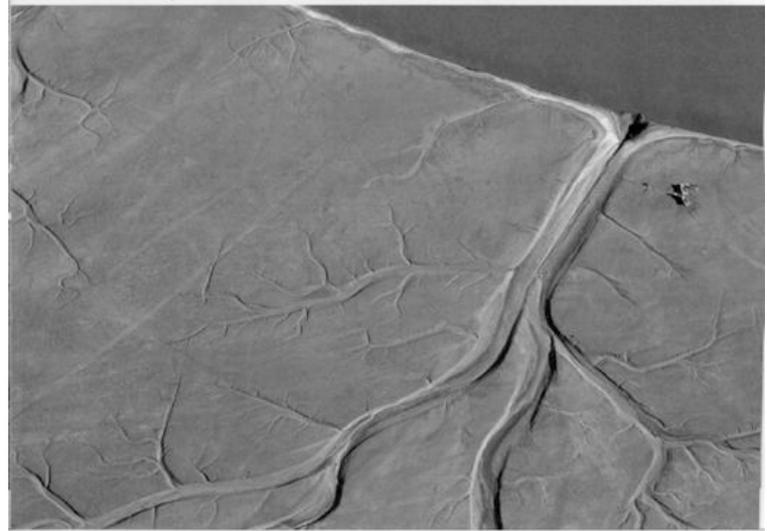
La charge des fleuves en particules détritiques

Les différences observées selon les zones peuvent s'expliquer par :

- le rôle de l'**altitude moyenne**
- le **climat** qui favorise ou non l'altération
- la **nature des roches** dans la zone de drainage. Par exemple, le Huangfuchuan, un affluent du Fleuve Jaune, draine un bassin loessique de 3 200 km² et évacue chaque année 53 000 tonnes de sédiments par km².
- les **activités anthropiques** : la construction de barrages provoque une diminution du débit des fleuves et de la charge transportée

L'estuaire du Colorado... à sec !

- Charge actuelle du Nil = 8% de sa valeur avant la construction du barrage d'Assouan
- Charge actuelle du Rhône = 5% de la charge mesurée au 19^{ème} siècle.
- Cas extrême = Colorado qui n'apporte plus ni eau, ni sédiments alors qu'en 1930, il déversait annuellement 125 à 130 Mt.a⁻¹ de sédiments dans le golfe du Mexique.



Embouchure du fleuve Colorado au Mexique, ou plutôt le lit du fleuve asséché sur environ 50 km depuis 40 ans.

Les solutés présents dans les fleuves

Table 4.5 Average composition of river waters by continents^a (mg/l)

Continent	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Σ _i ^b
Africa	12	5.25	2.15	3.8	1.4	3.35	3.15	26.7	45.8
North America	7.2	20.1	4.9	6.45	1.5	7	14.9	71.4	126.3
South America	10.3	6.3	1.4	3.3	1	4.1	3.5	24.4	44
Asia	11	16.6	4.3	6.6	1.55	7.6	9.7	66.2	112.5
Europe	6.8	24.2	5.2	3.15	1.05	4.65	15.1	80.1	133.5
Oceania	16.3	15	3.8	7	1.05	5.9	6.5	65.1	104.5
World	10.4	13.4	3.35	5.15	1.3	5.75	8.25	52	89.2

Notes:

a The concentrations are exoreic runoff with human inputs deducted

b Σ_i is the sum of the other materials

Source: Adapted from Meybeck (1979)

Effet du climat

Les eaux fluviales sont principalement riches en Ca^{2+} et HCO_3^- et SO_4^{2-} .

De manière générale, la charge soluble des fleuves dépend essentiellement :

- de la **nature des roches** des régions traversées ;
- de la **zone climatique** (bien visible pour la silice).

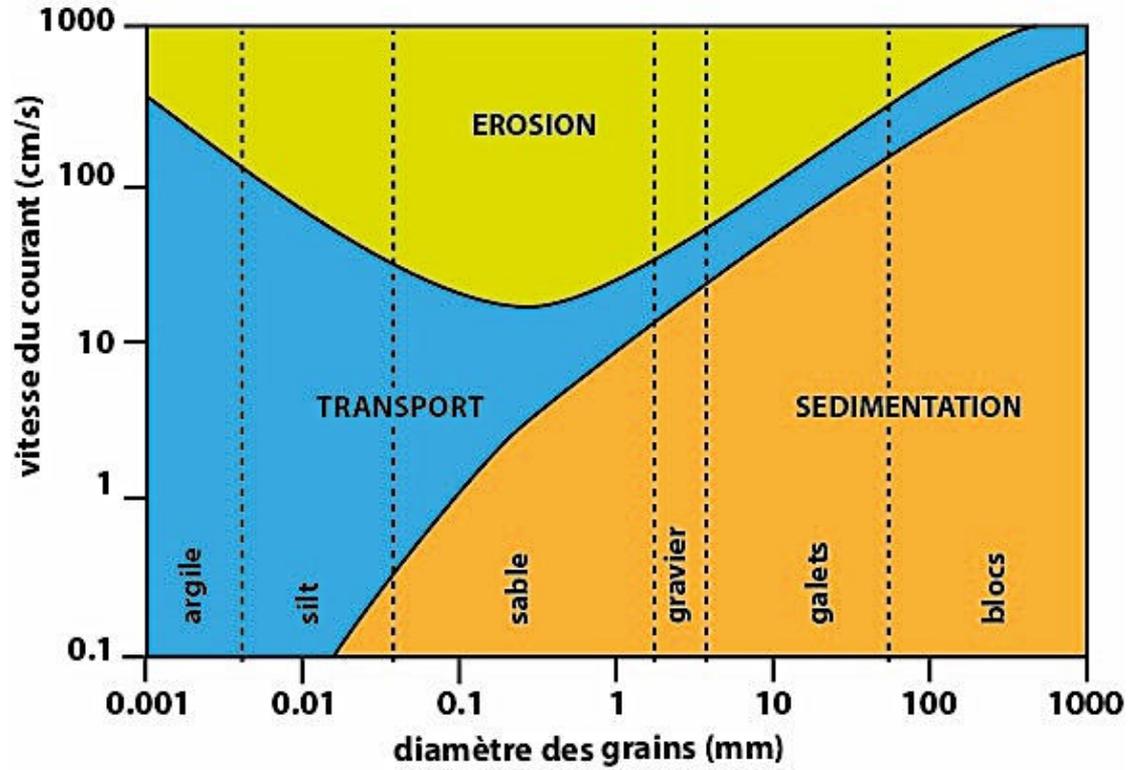
L'altération des carbonates ne dépend pas du climat : l'effet climatique n'est donc pas observable pour Ca^{2+} et HCO_3^- .

Le delta du Gange, une forte charge en sédiments

87



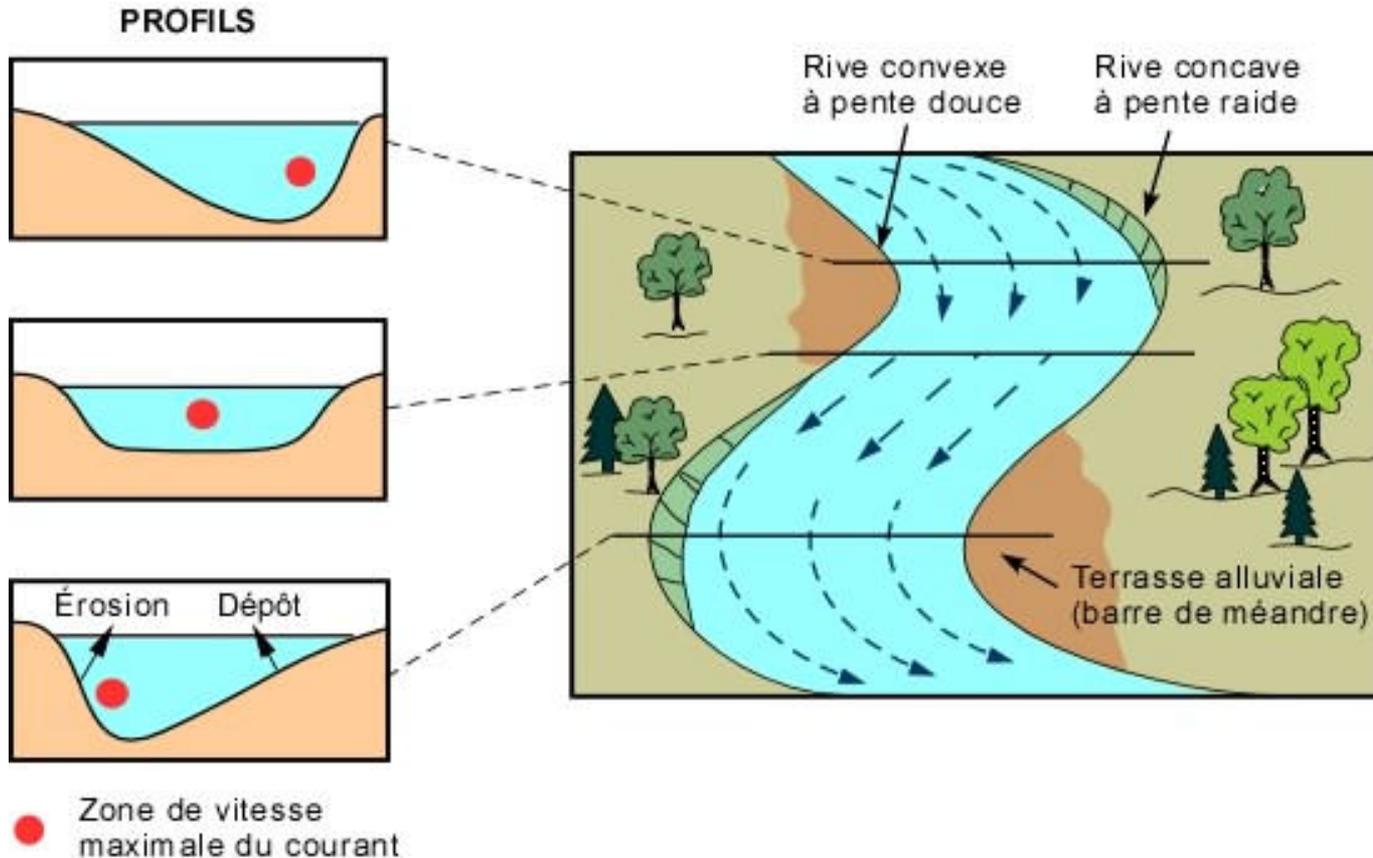
Le diagramme de Hjulstöm



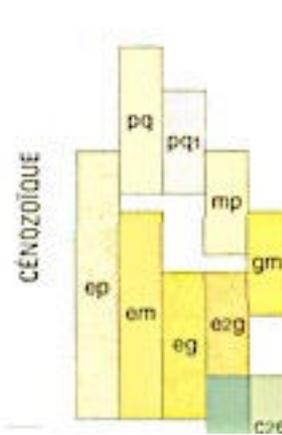
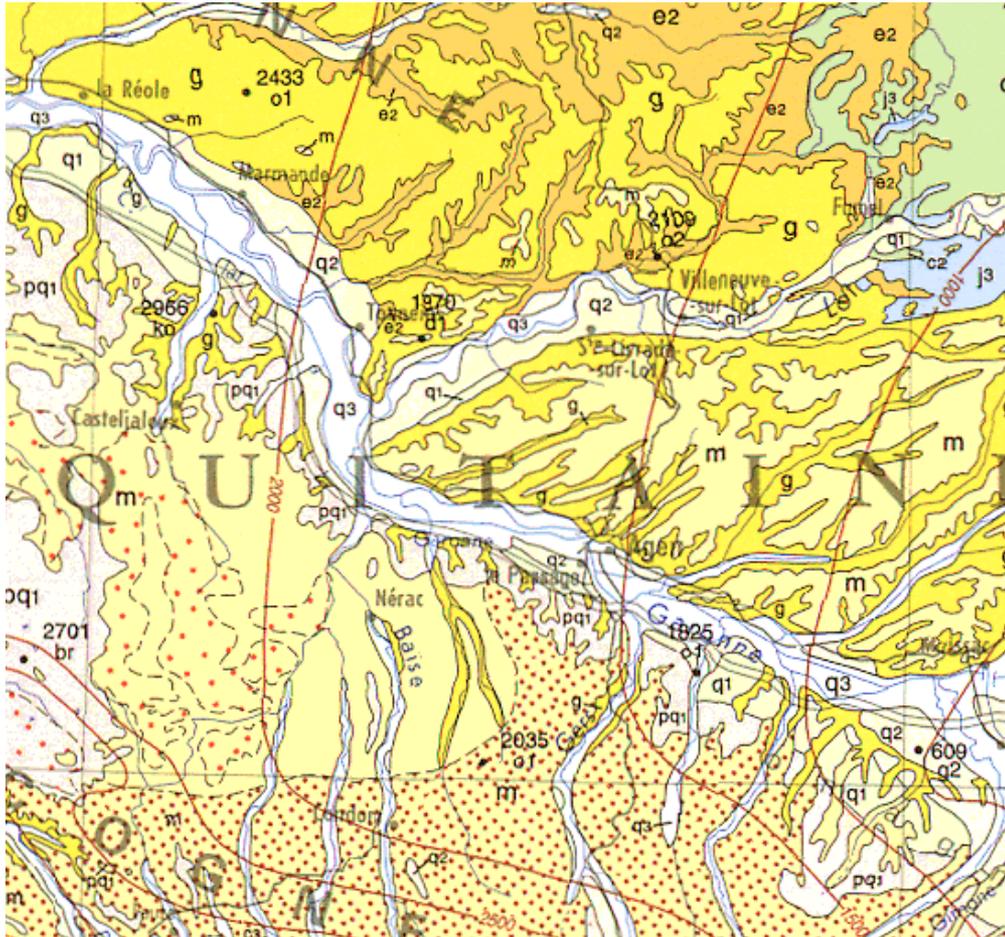
Application à une rivière



Profil de vitesse de l'eau dans la rivière



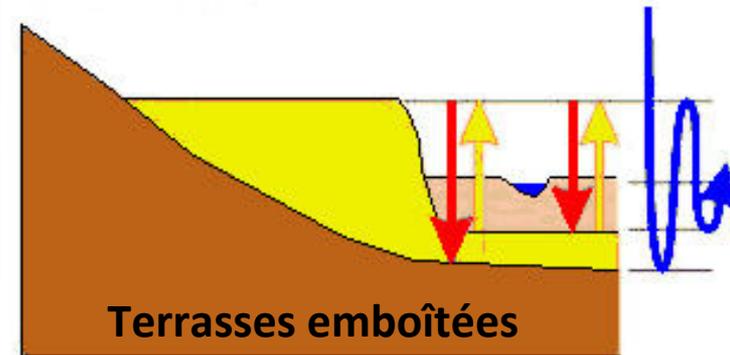
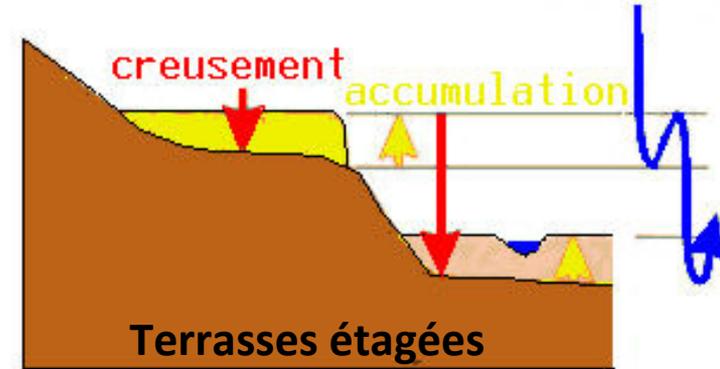
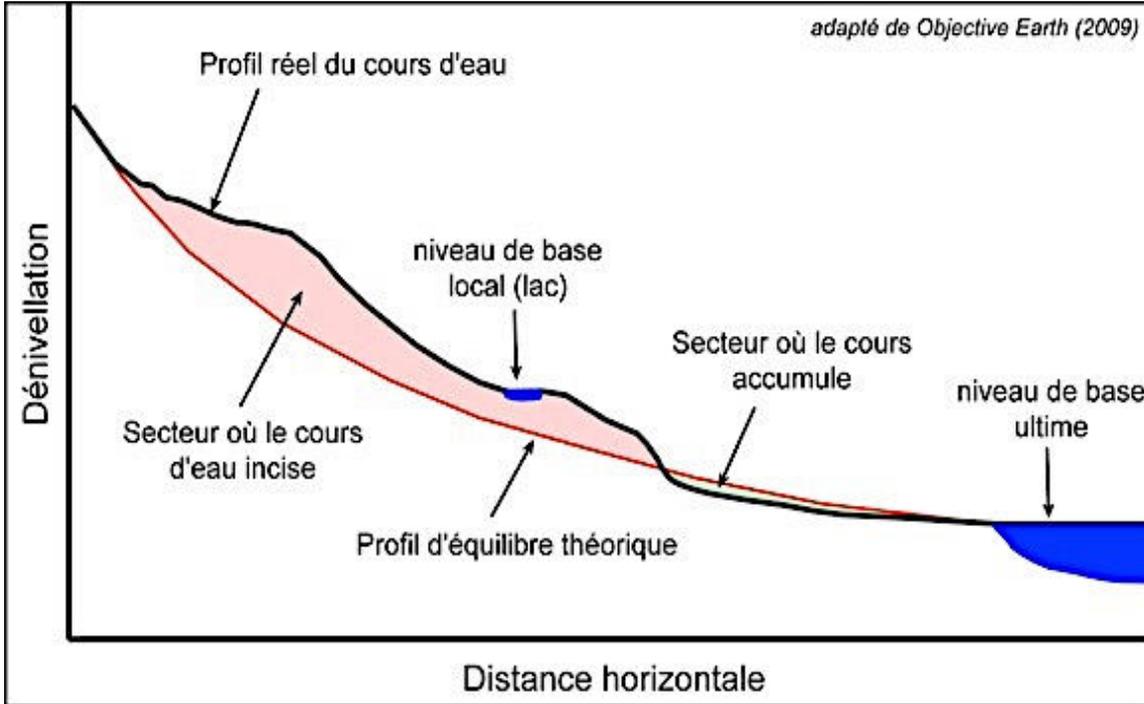
La vallée du Lot



Quaternaire	q2-3	q3	Holocène
		q2	Pléistocène moyen et supérieur
	q1-2	q1	Pléistocène inférieur
		p	Pliocène
		m	Miocène
		g	Oligocène
		e2	Éocène moyen et supérieur
		e1	Éocène inférieur - Paléocène

Les terrasses fluviales

Niveau de base



Le granoclassement



Dans le lit majeur de la Rivière des Galets drainant le cirque de Mafate

Source : <https://phototheque.enseigne.ac-lyon.fr/>

Séquence de granoclassement



Cantley, Québec

Le granoclassement



Granoclassement des produits de destruction de falaise jurassique (Audresselles), en fonction de leur taille (blocs, galets, sable) et de l'énergie disponible pour leur mobilisation.

En contexte de littoral



Cône de déjection
(écoulement gravitaire)

Source : <http://www.geolsed.ulg.ac.be>

Source : <https://svt.etab.ac-lille.fr>

BILAN

L'altération et le transport sont à l'origine d'un tri des éléments :

- tri minéralogique des particules = granoclassement
- tri chimique des éléments : les formations résiduelles n'ont pas la même chimie que la roche-mère et les ions solubles sont emportés par les eaux de ruissellement.

Les phénomènes d'altération sont à l'origine des sols.

L'altération des roches est une pompe à CO₂.

Un paysage martien

