

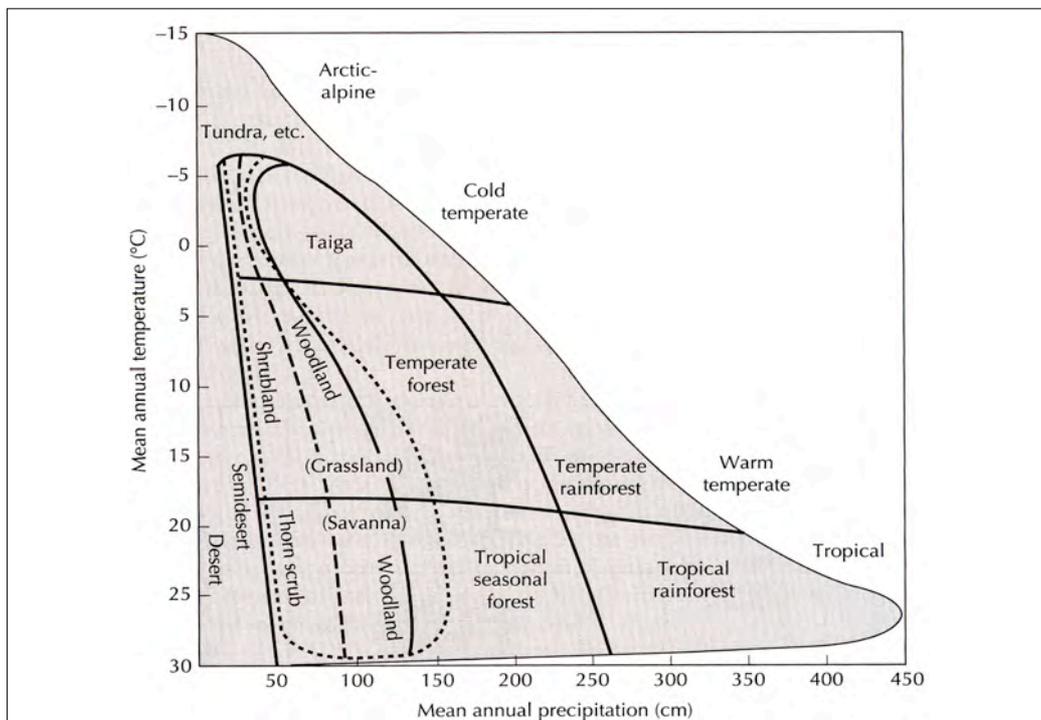
## Climat et surfaces continentales

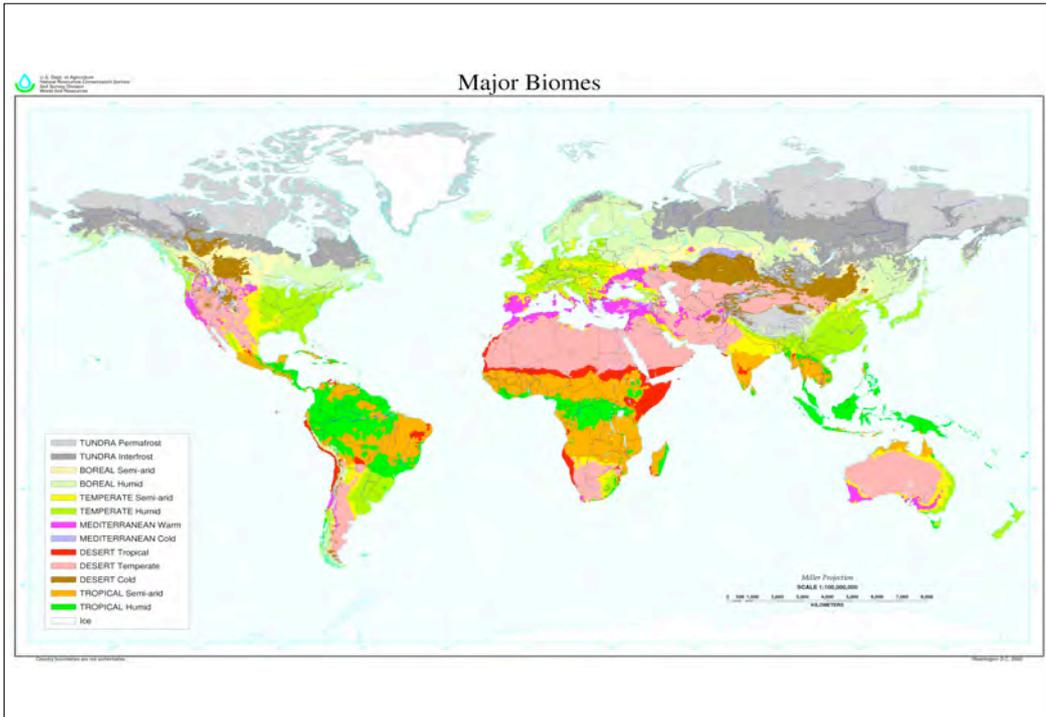
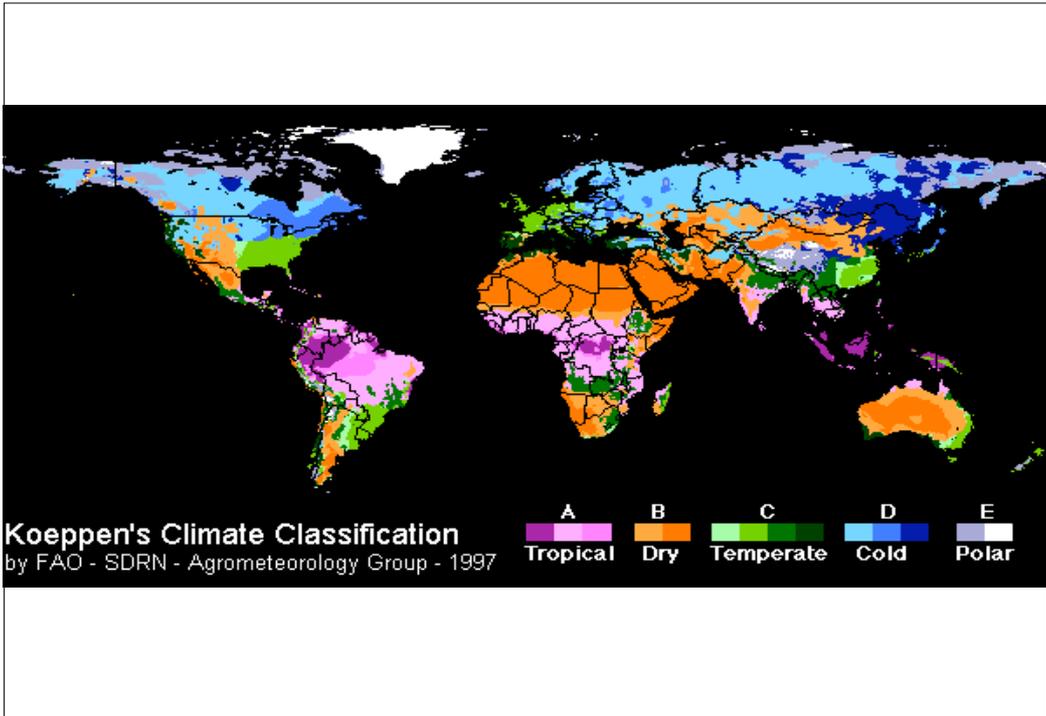
- Les climats de la Terre
- L'altération chimique des roches
- Les paysages de la Terre
- Les vitesses de l'altération chimique

### 1. Les climats de la Terre

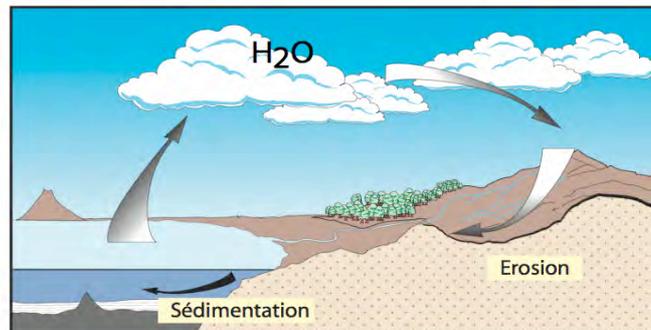
- 1.1.Définition
- importance de la classification des grands types de formation végétales
- Le système climatique. La répartition des végétaux est liée à la répartition des précipitations et des températures.
- Importance des interactions avec la lithosphère et du facteur temps. Successions écologiques

- 1.2. Les zones bioclimatiques
- Le carte des grands biomes
- Clés de répartition





## 2. L'altération des roches: interaction entre l'eau et la lithosphère

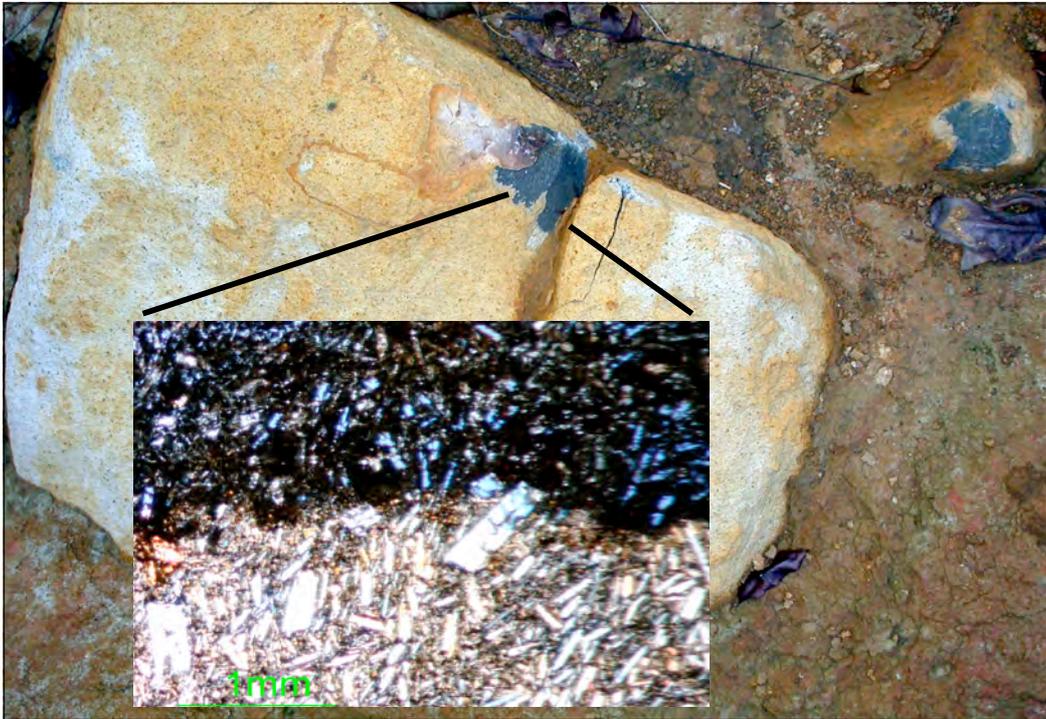


- L'altération, comme point d'entrée de l'écosystème.
- L'altération comme mécanisme de création des sols, les sols sont le support de l'humanité (agriculture, construction).
- L'altération comme régulateur du climat de la Terre

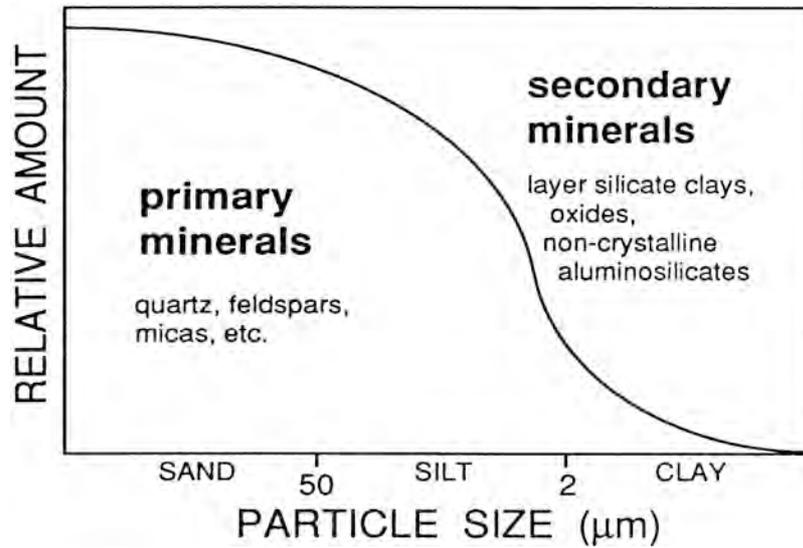
### 2.1 Mise en évidence, profils de sols

Définition de l'altération. C'est l'adaptation des minéraux aux conditions thermodynamiques de la surface terrestre. Eaux, solutions diluées, basse T, basse P. Comparer avec les conditions de mise en place d'un granite ou d'un basalte, d'un calcaire.

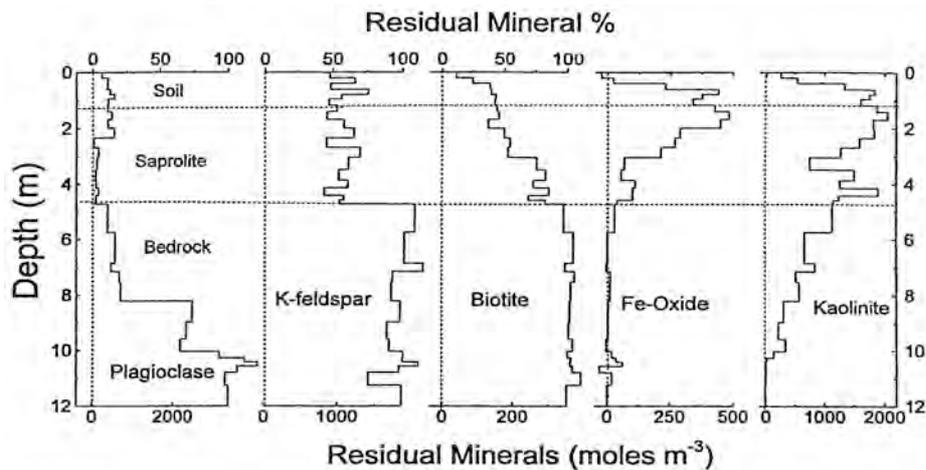
Attention, ce n'est pas qu'un problème de thermodynamique, les cinétiques des réactions d'altération sont lentes en général.



## Aspects granulométriques

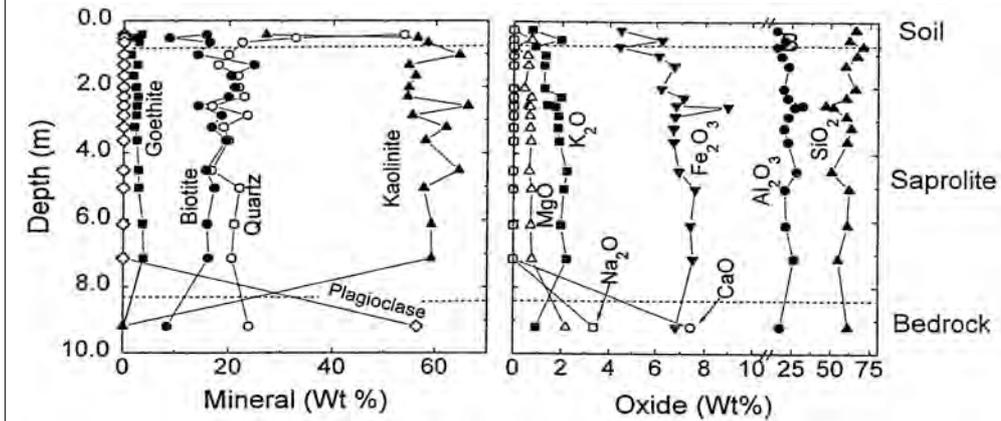


## Aspects minéralogiques

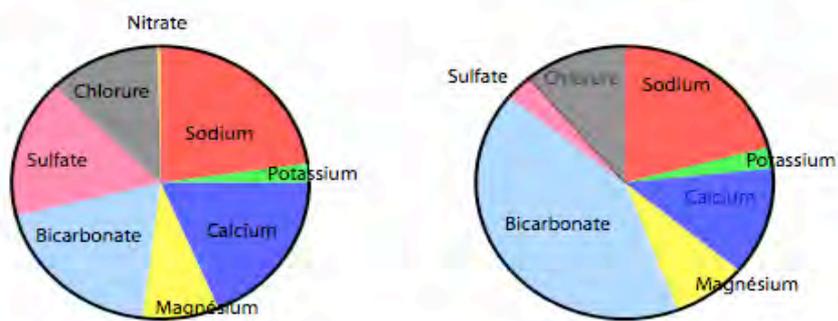


Minéraux primaires (de la roche non altérée et minéraux secondaires) dans le profil de Panola. Régolithe : couche meuble à la surface des planètes. Différence saprolite (roche pourrie) régolite (couverture meuble).

## Aspects chimiques



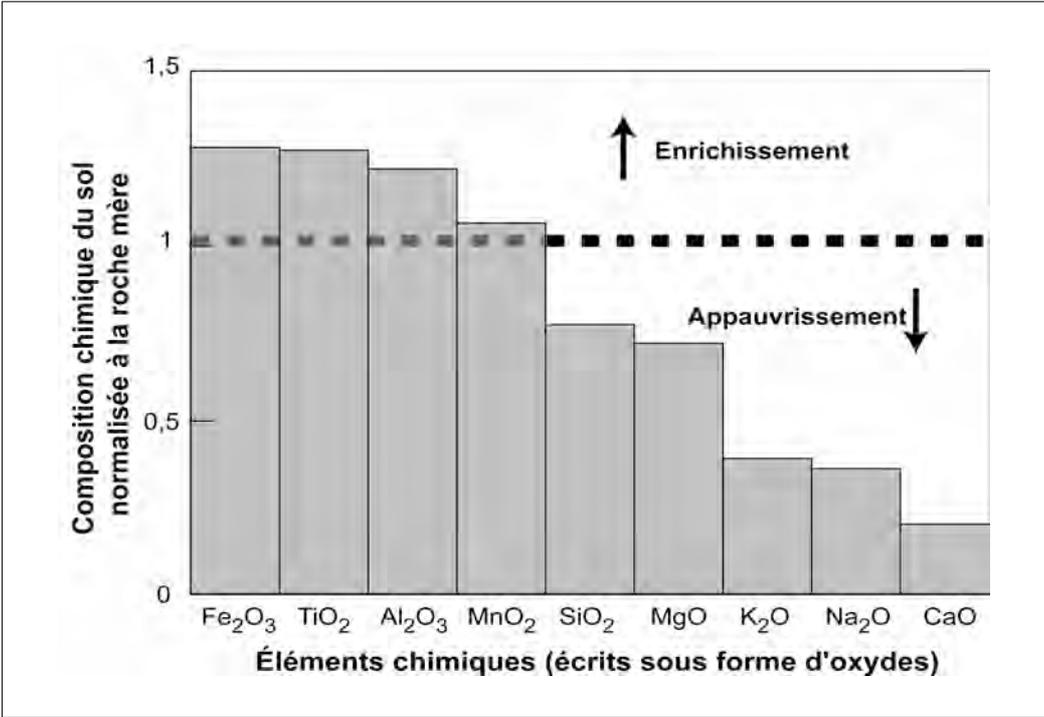
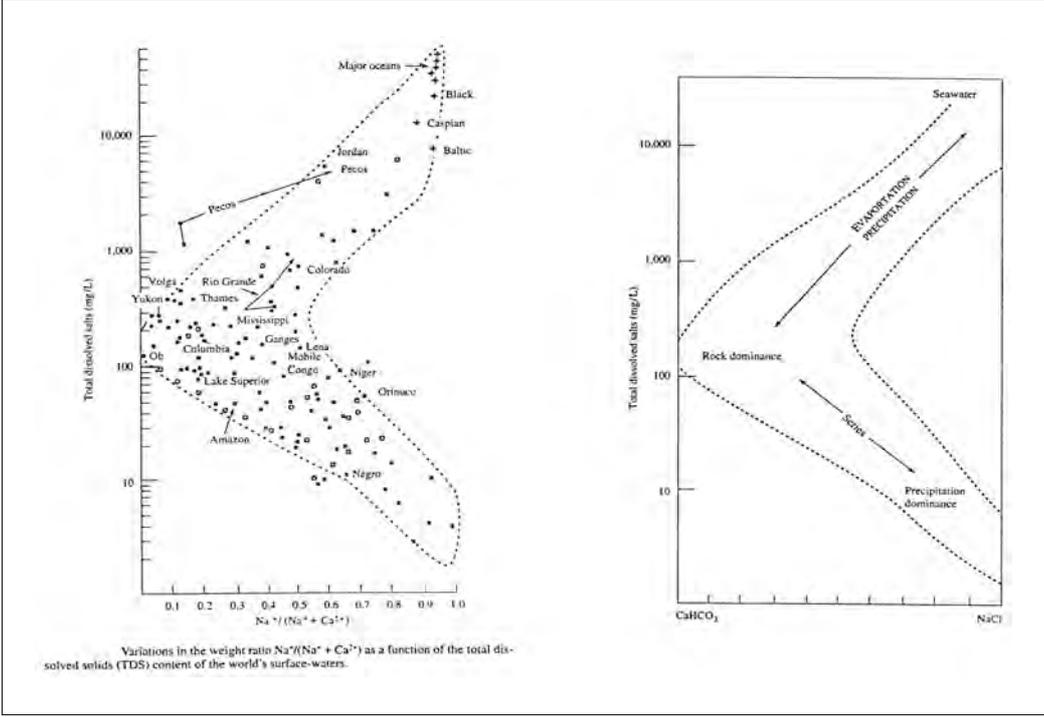
Les éléments chimiques qui aiment l'eau : on les dit solubles.  
Les anions peuvent varier considérablement :



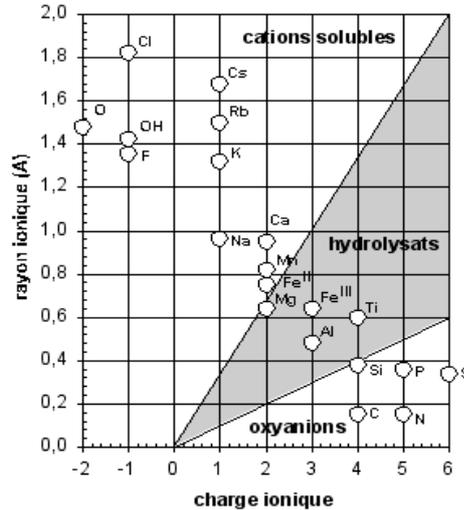
Rivière du Lorrain

Rivière du Précheur





## Diagramme de Goldschmidt



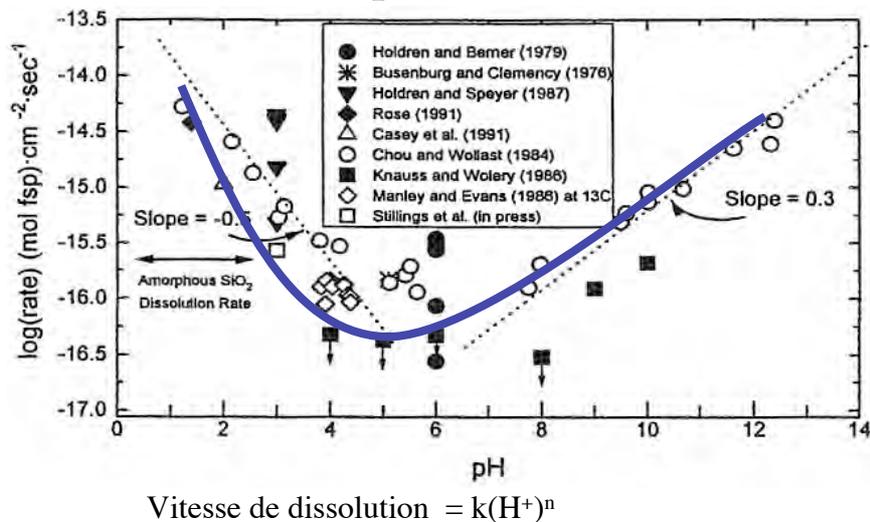
## Bilan

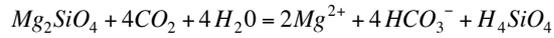
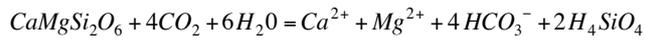
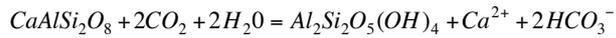
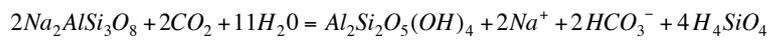
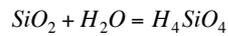
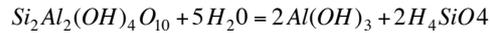
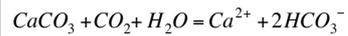
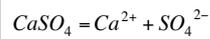
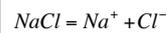
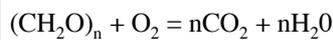
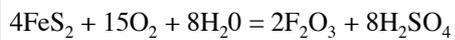
- L'altération, un tri chimique et minéralogique. Éléments solubles peu nombreux, ils migrent dans l'eau de ruissellement. Éléments insolubles, ils se retrouvent enrichis dans le sol (le résidu d'altération)
- Tous les minéraux n'ont pas la même sensibilité à l'altération, il y a une séquence d'altérabilité (séquence de Goldschmidt).
- L'altération chimique, c'est l'adaptation des minéraux des roches aux conditions thermodynamiques de la surface terrestre : solution aqueuses diluées et acides, basse température et pression de 1 bars, oxygène et matière organique.
- Toutefois, le simple fait qu'un granite existe à l'affleurement prouve que les réactions d'altération sont lentes, elles prennent du temps.
- Le diagramme de Goldschmidt classe les insolubles et les solubles. La plupart des éléments chimiques sur Terre sont insolubles, ils n'aiment pas l'eau!

## 2. 2. Les réactions chimiques de l'altération

- Ce n'est pas l'eau qui altère ce sont les protons en milieu acide et les groupements OH en milieu alcalin.
- L'altération en condition expérimentale de minéraux montre des courbes en cloche pour les vitesses de dissolution en fonction du pH. Lois de puissances avec la concentration en protons.

### Altération de plagioclase en conditions expérimentales

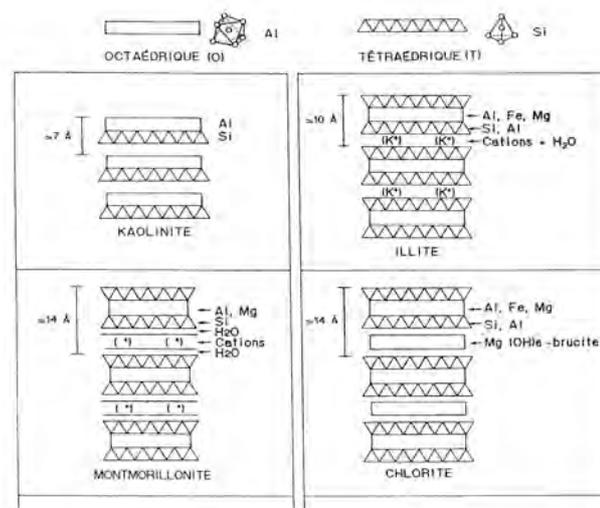


**Réaction d'altération de l'olivine****Réaction d'altération des pyroxènes****Réaction d'altération de l'anorthite en kaolinite****Réactions d'altération de l'albite en kaolinite****Réaction d'altération du quartz****Réaction d'altération de la kaolinite en gibbsite****Réactions d'altération des carbonates****Réactions d'altération des roches salines****Réactions d'oxydation (sulfures et matière organique)**

## Minéraux secondaires des sols : argiles et oxyhydroxydes. Calcite et gypse dans les environnements confinés.

Minéral	Composition
Hematite	$Fe_2O_3$
Goethite	$HFeO_2$
Gibbsite	$Al(OH)_3$
Kaolinite	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$
Smectite	$(1/2 Ca, Na) Al_3MgSi_8O_{20}(OH)_4 \cdot nH_2O$ (average composition)
Vermiculite	Basically biotite or muscovite composition with $K^+$ replaced by hydrated cations
Calcite	$CaCO_3$
Opaline silica (not a mineral)	$SiO_2 \cdot nH_2O$
Gypsum	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$

## Principaux minéraux argileux



Interactions eaux-roches

Sols terrestres

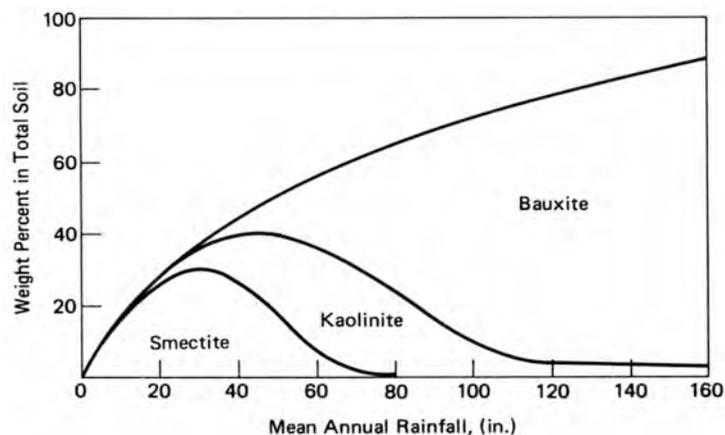
Cinétique de l'altération

## Formation des minéraux argileux

- ✓ L'héritage : cas des roches sédimentaires argileuses, illites, chlorites.
- ✓ Hydrolyse faible : on forme des argiles de type 2/1 : Montmorillonite, Illite, Vermiculite riches en cations basiques en position interfoliaire (Mg, K, Ca). On perd peu de silice. **BISIALLITISATION.**
- ✓ Hydrolyse plus poussée : les cations basiques sont éliminés, la silice est entraînée. On forme des argiles de type 1/1: **MONOSIALLITISATION.**
- ✓ Hydrolyse totale : silice et cations n'existent plus. On forme de la gibbsite. **ALLITISATION.**

*L'idée est que plus l'altération est poussée, plus les cations partent des réseaux cristallins. Lorsque les cations sont tous partis et que l'altération continue, la silice, moins soluble, part et on forme des oxydes de fer et d'aluminium.*

## Rôle de la quantité d'eau sur la formation des minéraux secondaires des sols



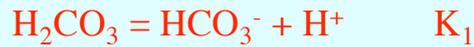
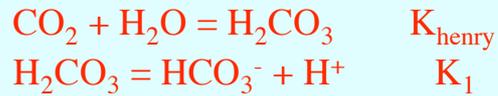
Interactions eaux-roches

Sols terrestres

Cinétique de l'altération

## Source des protons sur Terre

✓ L'acide carbonique et l'acide sulfurique



pH = 5 à la  
teneur de 370  
ppmV pour une  
eau de pluie

- La plupart des réactions d'altération sont appelées des hydrolyses, car c'est l'action des protons sur le minéral qui se déstabilise. Il y a échange de protons contre des cations :  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$
- On définit aussi l'acidolyse lorsque les conditions de pH sont très basse (acide sulfurique) et la complexolyse lorsque des acides organiques (capables de complexer l'Al et le Fe) contribuent à détruire les minéraux. On trouve des acides organiques en abondance dans certains environnements comme les podzols en région tempérée, les marais tropicaux (Rio Négro) et dans les régions arctiques car la matière organique se dégrade mal. Ces termes ne sont pas d'une grande utilité car ils ne décrivent pas les processus. Mais ils doivent être connus.

- La plupart des réactions d'interaction eau-roche sont des réactions d'échange de protons contre des cations.
- Les réactions redox (car l'atmosphère est oxygénée) et de complexation (car la surface de la Terre est riche en MO) jouent également un rôle, mais moins important. Par exemple la biotite (mica noir) s'oxyde en oxydes de fer et argiles.

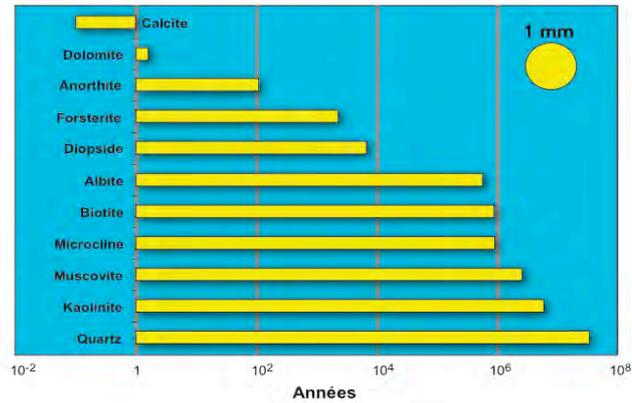


## 2.3. Les facteurs de l'altération

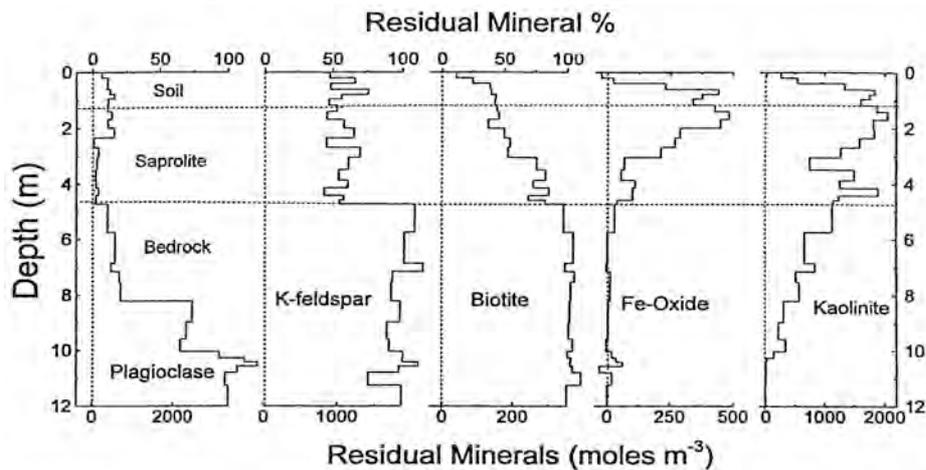
- Le type de minéral
- La température
- La concentration en solutés dans la solution
- La vie, les bactéries et les champignons
- La production d'acidité, donc de CO<sub>2</sub>.

- Synthèse de 20 années d'études expérimentales sur la dissolution des minéraux (attention, altération = dissolution + précipitation de phases secondaires).
- Les vitesses de réaction sont très variables et peuvent être très lentes. Le Qtz et le zircon sont des minéraux indestructibles et ils passent au travers des cycles d'érosion-sédimentation.
- En accord avec des observations de terrain (Goldschmidt, 1938).

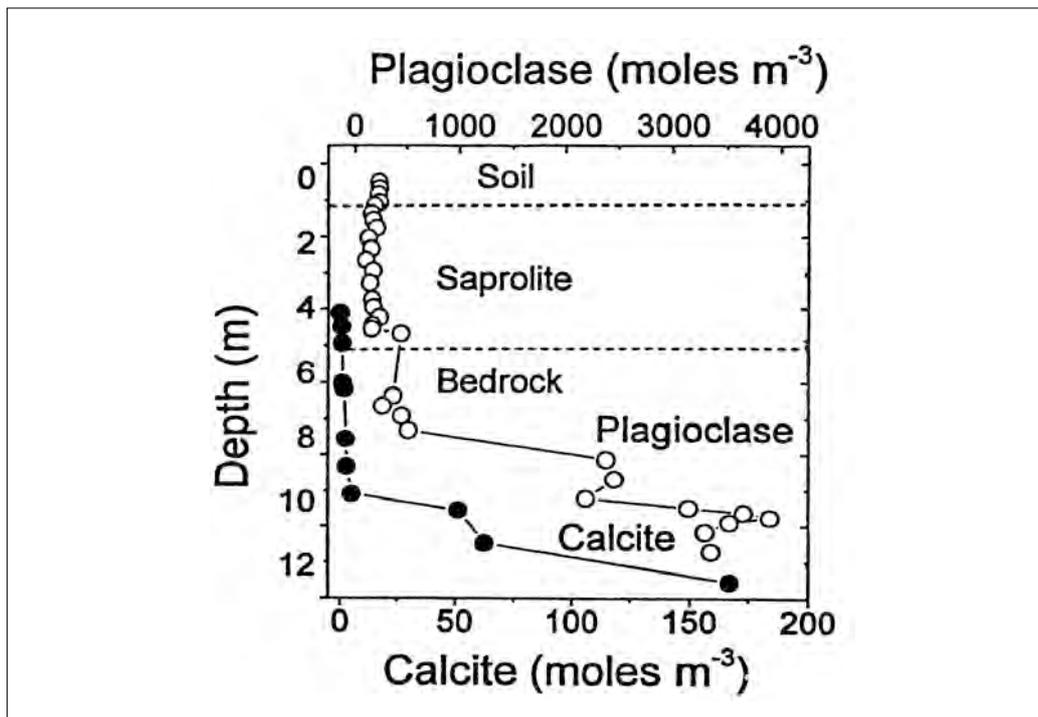
## Le type de minéral : durée de vie à pH = 5 d'un cristal de 1 mm de diamètre



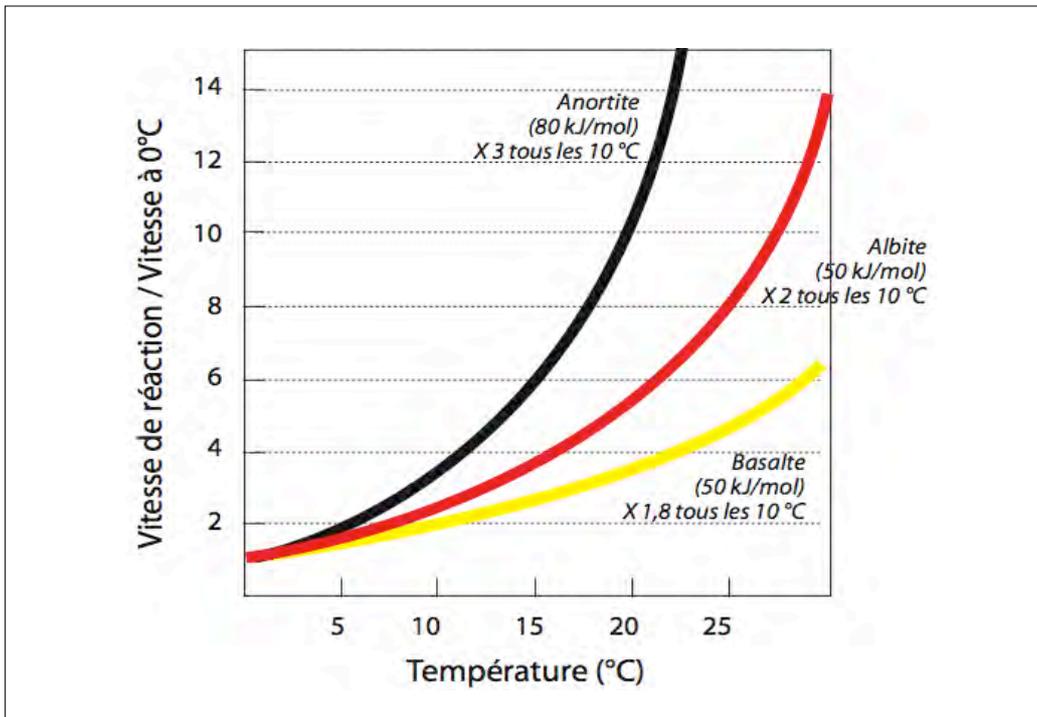
## Aspects minéralogiques



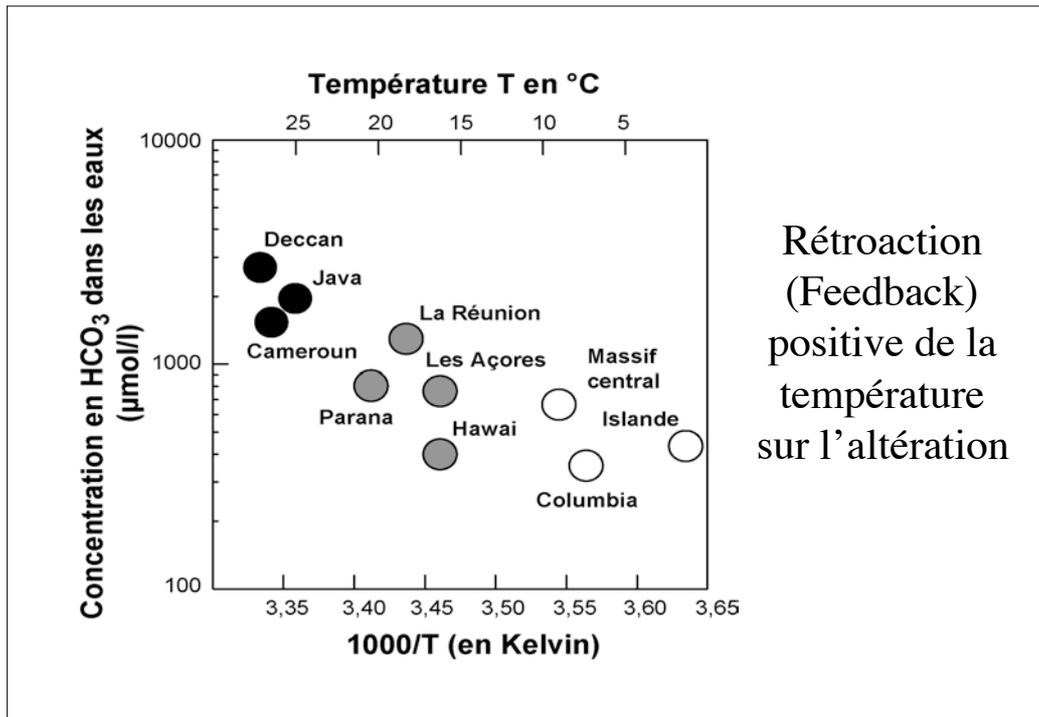
Minéraux primaires (de la roche non altérée et minéraux secondaires) dans le profil de Panola. Régolithe : couche meuble à la surface des planètes. Différence saprolite (roche pourrie) régolite (couverture meuble).



- Les études expérimentales montrent que la température active la vitesse de dissolution des minéraux, selon une loi d'Arrhénius,
- $V = V_0 \times e^{(-E_a/RT)}$  où  $E_a$  est l'énergie d'activation de la réaction, elle donne la sensibilité de la réaction à la température.
- Granite :  $\times 2$  tous les  $10^\circ\text{C}$

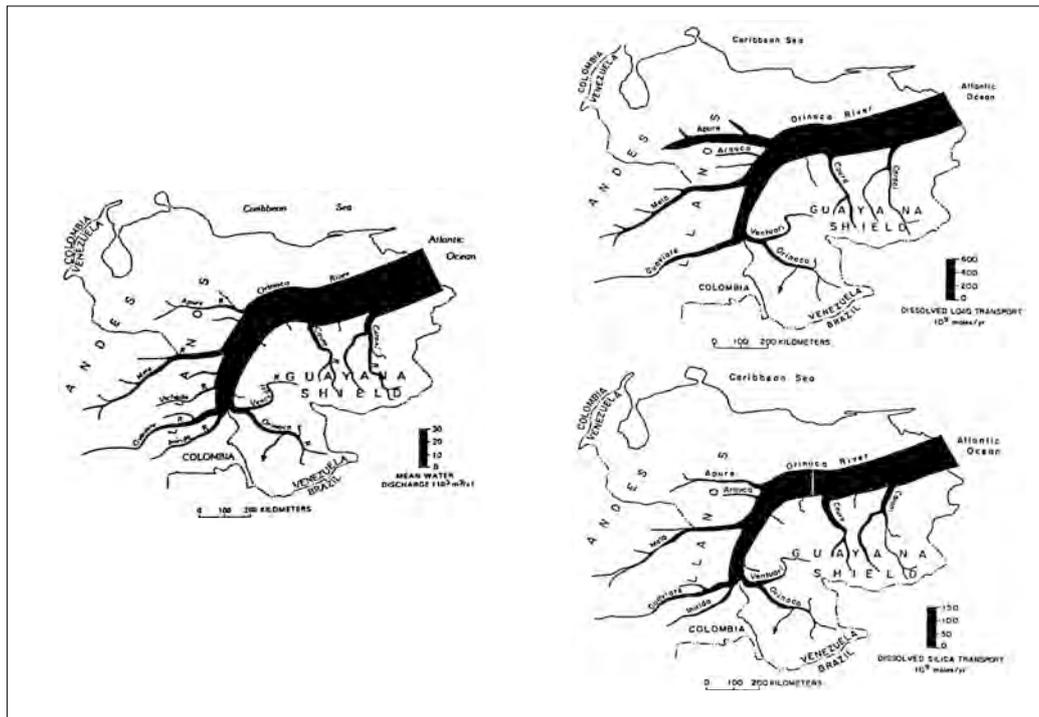


- La loi d'Arréhnus se retrouve lorsqu'on examine les vitesses d'altération des basaltes (en étudiant par ex. les rivières ne drainant que des basaltes soumis à différents climats). Ce n'est vrai pour les granites ou les calcaires car d'autres paramètres rentrent en jeu.
- Plus le climat est chaud, plus l'altération es basaltes est efficace. Confirmation de l'approche exp.



## L'eau

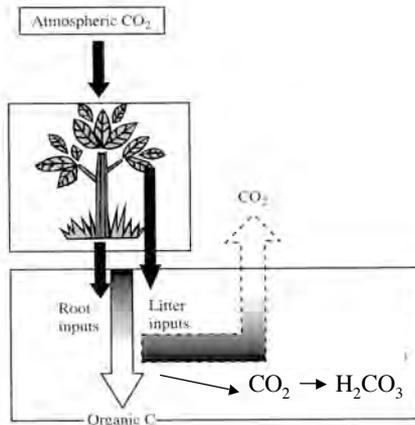
- IL faut de l'eau pour altérer ! C'est une évidence. Au Sahara, pas d'altération.
- Néanmoins il faut que cette eau circule. Sinon, on atteint vite la saturation vis-à-vis des minéraux constitutifs de la roche et les vitesses de dissolution s'annulent.
- Donc, il faut de l'eau circulante.
- Conséquence : des sols trop épais gênent l'altération, même si la température est élevée (Congo par ex, Guyane).



## Le gaz carbonique

- C'est la source essentielle d'acidité.
- Il est produit par les végétaux (respiration des racines) et la décomposition dans les sols de la matière organique morte.
- Dans les sols, la pression partielle de  $\text{CO}_2$  atteint souvent 100 fois celle de l'atmosphère.
- Si le sol n'est pas gorgé d'eau, le  $\text{CO}_2$  s'échappe, sinon il se dissout et baisse le pH de la solution de sol, il est alors capable d'altérer les minéraux.
- Remarque : le  $\text{CO}_2$  qui se dissout est faible par rapport à celui qui part dans l'atmosphère. L'essentiel du C qu'un écosystème photosynthétise repart dans l'atmosphère lors de la respiration des parties aériennes et souterraines ou de la décomposition de la matière organique morte du sol. Sinon, vu les flux, la quantité de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère chuterait très vite.

## Dynamique de la matière organique dans le sol



Productivité brute (GPP) =  
Productivité nette (NPP) +  
Respiration des parties  
aériennes et souterraines  
(CO<sub>2</sub>) + litière

Litière = décomposition  
(CO<sub>2</sub>) + humus (SOM) +  
érosion

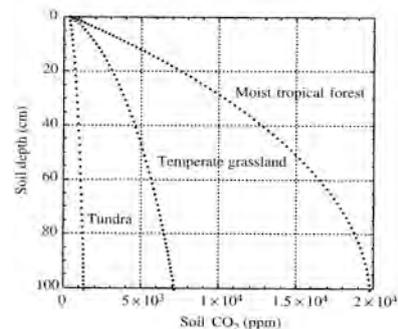
## Dynamique de la matière organique dans le sol

$dC/dt = I - KC$  (I : production de matière organique)

K est fonction de la teneur en N. Haute teneur en N, K grand, donc on forme moins d'humus, et plus de CO<sub>2</sub>. Ex : feuillus.

K dépend de la température : augmente avec la température.

K dépend de la structure du sol, un sol argileux protège la matière organique de la décomposition en l'adsorbant. La présence de Ca empêche la dégradation des MOS.



## Autres rôles de la matière organique dans les sols

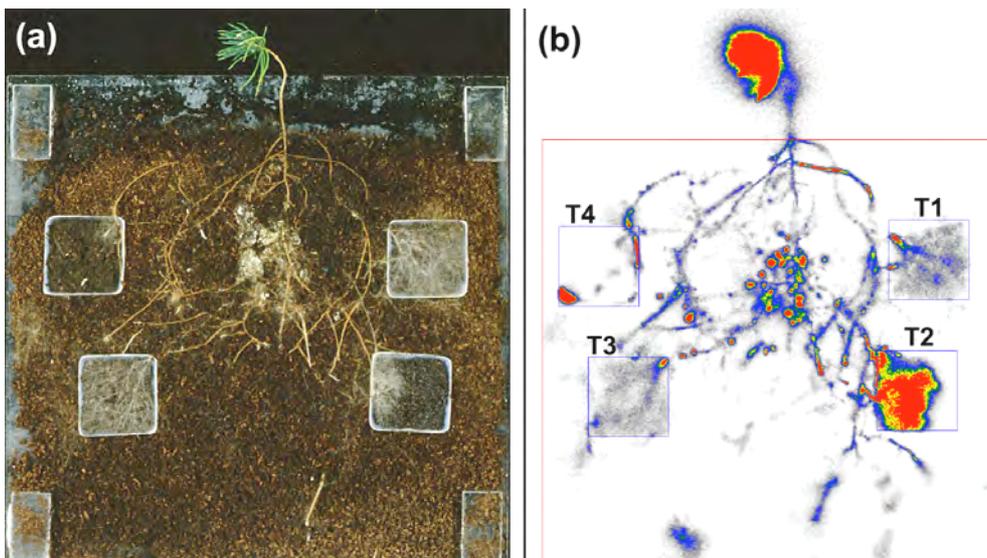
- o Le rôle des racines : mélange (les contraintes dues aux racines peuvent atteindre 15 bars), création de porosité donc expansion volumique.
- o Les racines stabilisent le sol en le protégeant de l'érosion physique.
- o Rôle des mycorhizes dans la création de surface spécifique.
- o Rôle largement inconnu des microorganismes

Interactions eaux-roches

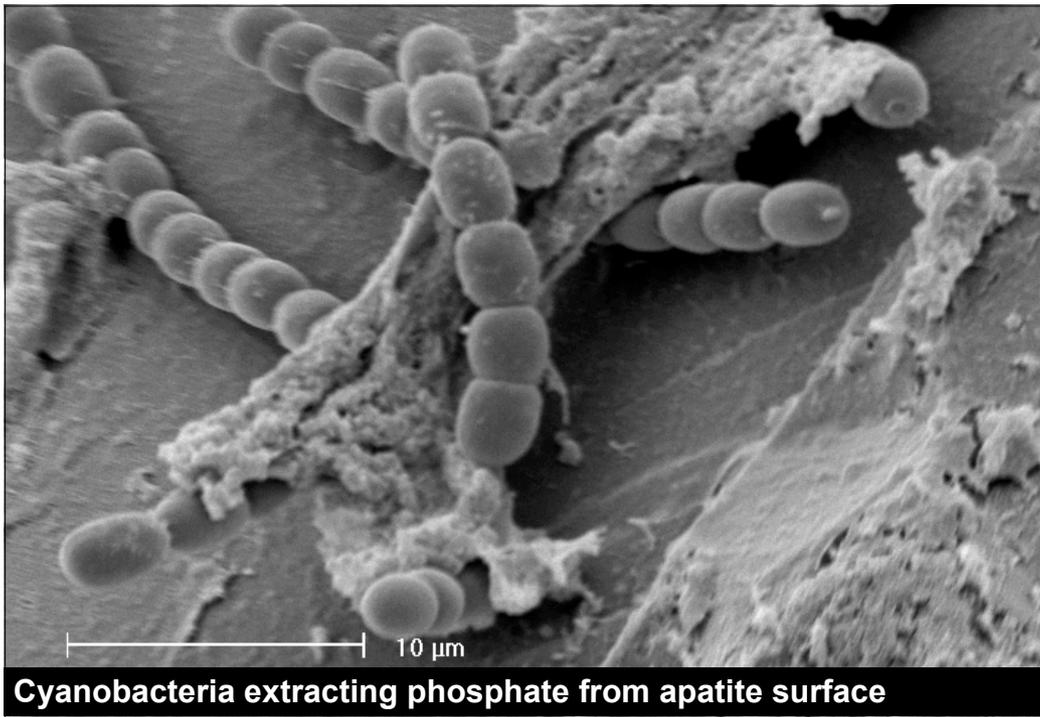
Sols terrestres

Cinétique de l'altération

Réseau de filament mycélien qui augmente considérablement la surface de contact entre la plante et le milieu extérieur.



From Leake et al. Tree Physiol. 21, 2001



## Stabilité physique des sols

- Abordé plus loin dans la cours (partie couplage)
- Une érosion mécanique trop forte ne permet pas la mise en place d'un sol et limite l'altération chimique
- Une érosion trop faible permet à une couverture de matériaux altérés de s'accumuler et finit par gêner le contact eau -roche.
- Il existe une situation intermédiaire optimale
- Mentionner le rôle des glaciers dans la production de surface réactives fraîches très réactives ainsi que l'alternance gel-dégel.

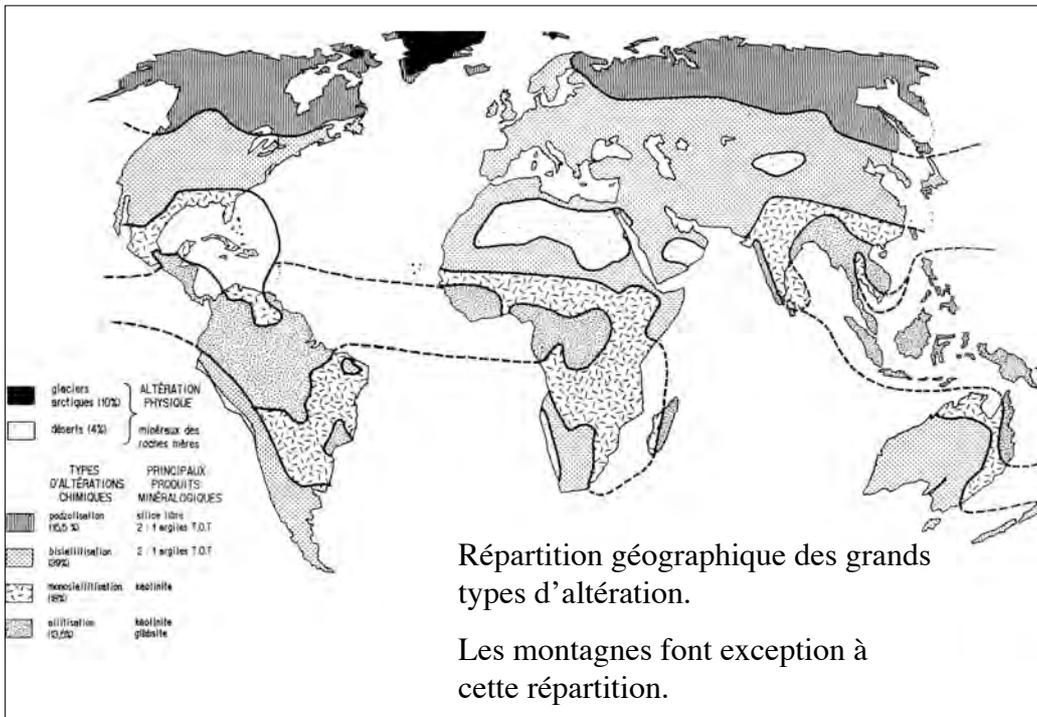
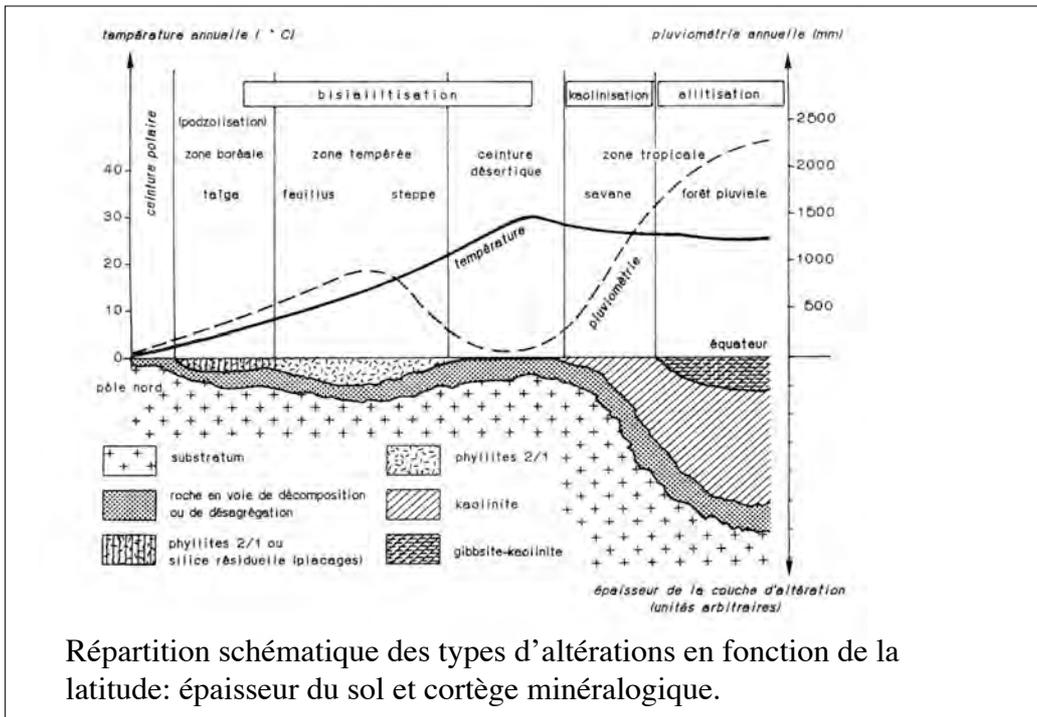
### III. Grands types de sols à la surface du globe

□ Il existe une définition géologique du sol (le régolite) et une définition agronomique. Le sol est étudié par des communautés différentes. Nous n'aborderons pas l'étude agronomique des sols ici.

□

#### Conséquence des facteurs de l'altération

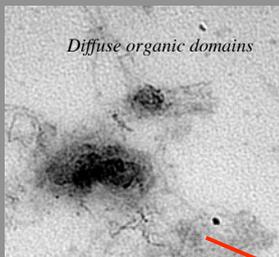
- De la répartition zonale (ie. latitudinale) de ces facteurs résulte la carte des grands types d'altération
- Cette carte incorpore le temps comme facteur essentiel. Une région tectoniquement stable a plus de chance de développer des latérites qu'une région instable car la mise en place d'un sol prend du temps. On est pas obligé de parler du rôle de ce paramètre temps.
- Cette répartition rend également compte des grands biomes.



## Deux grands classiques

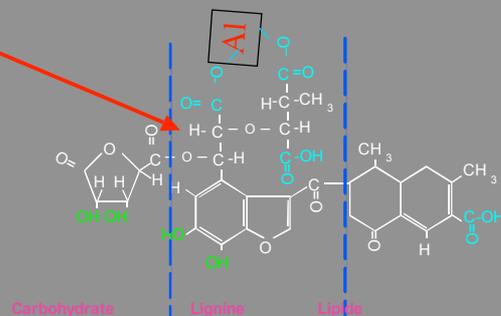
✓Le PODZOL : processus biogéochimiques lents, la matière organique se décompose mal et conduit à une humification importante : complexation de Al et Fe.

✓Sols ferrallitiques : sols des régions tropicales humides: argiles et oxydes de fer, matière organique très vite recyclée (stock de nutriment), très épais. Cas particulier : sols latéritique. Gibbsite. Sols très épais dus à la vigueur de l'altération géochimique.



100

Complexation de l'aluminium par la MO (complexolyse) et destruction des minéraux.



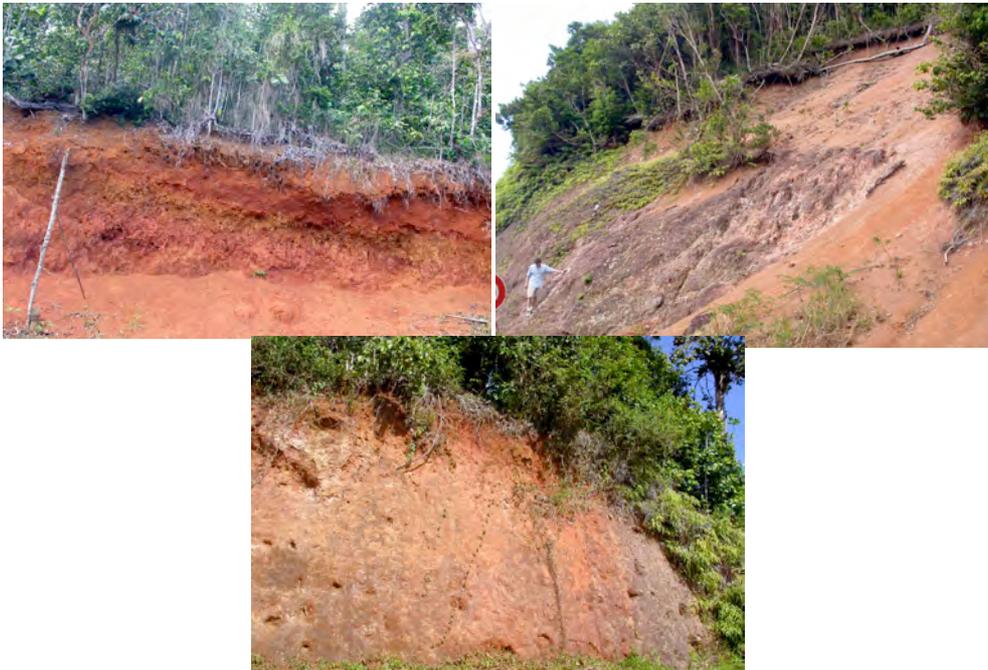
# PODZOLS



Interactions eaux-roches

Sols terrestres

Cinétique de l'altération



## Sol ferrallitique sur calcaire en Chine du Sud



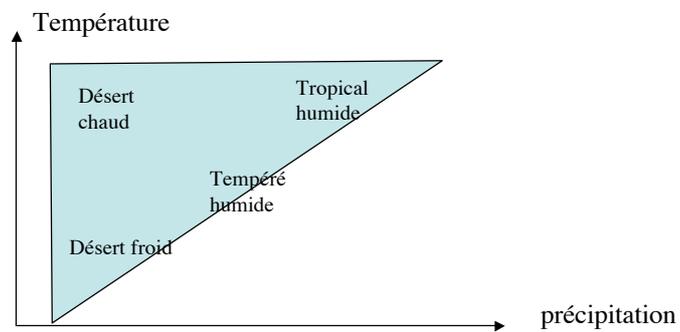
Interactions eaux-roches

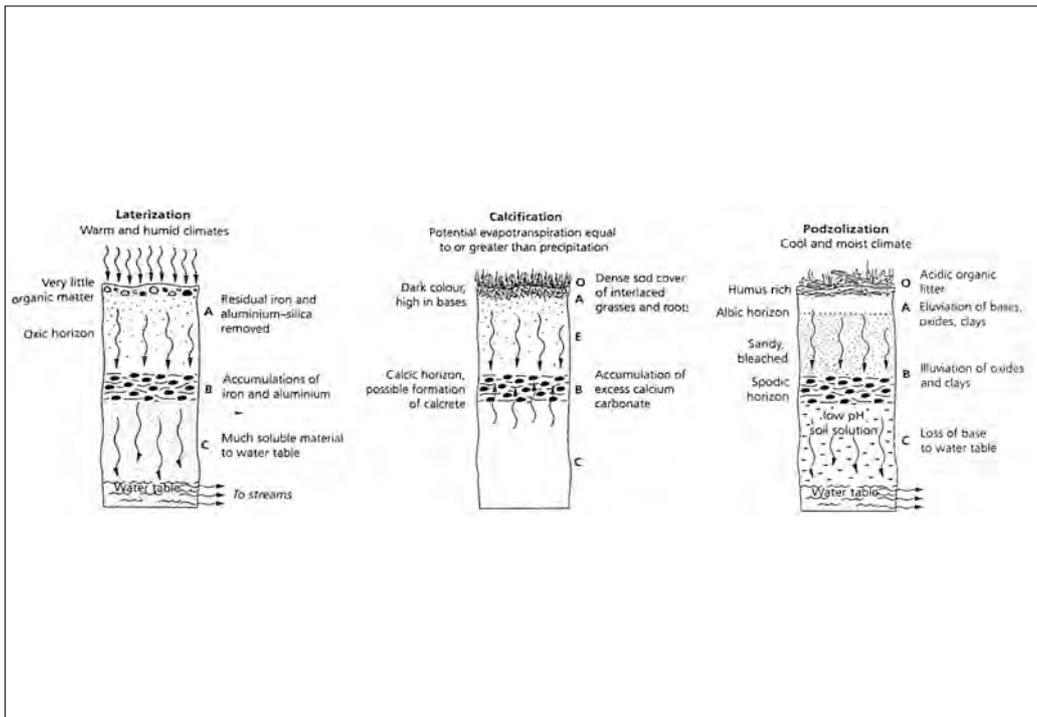
Sols terrestres

Cinétique de l'altération

### 3.2. Classification des sols

- Latérisation : Oxisols et ultisol (moins lessivés): forêts tropicales et subtropicales
- Aridisol et melanisol : régions plus sèches, végétation basse des steppes et régions arides

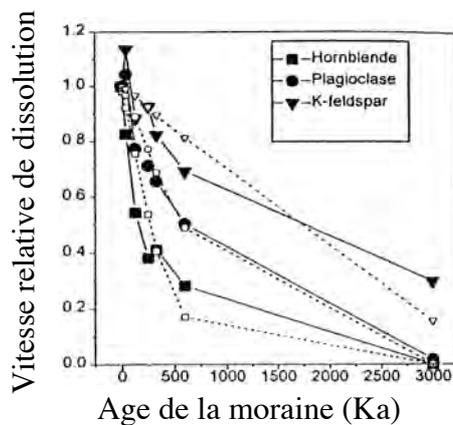
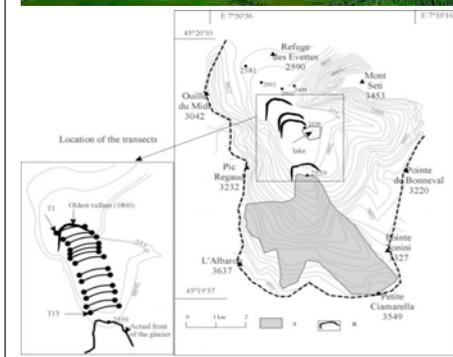




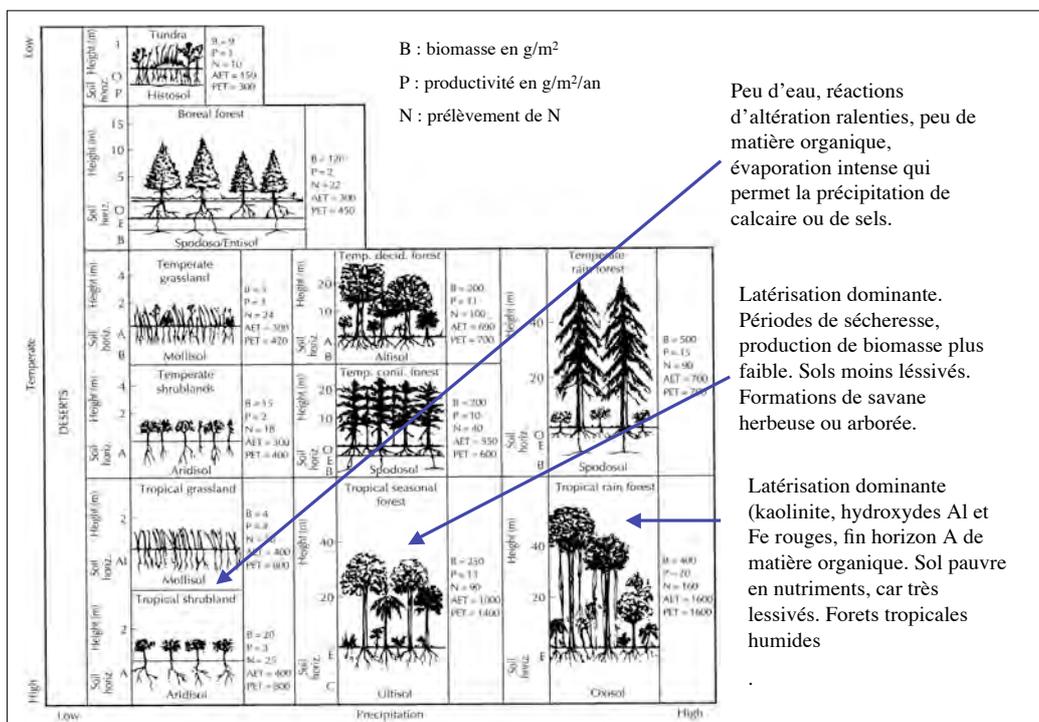
## Variation temporelle des vitesses d'altération

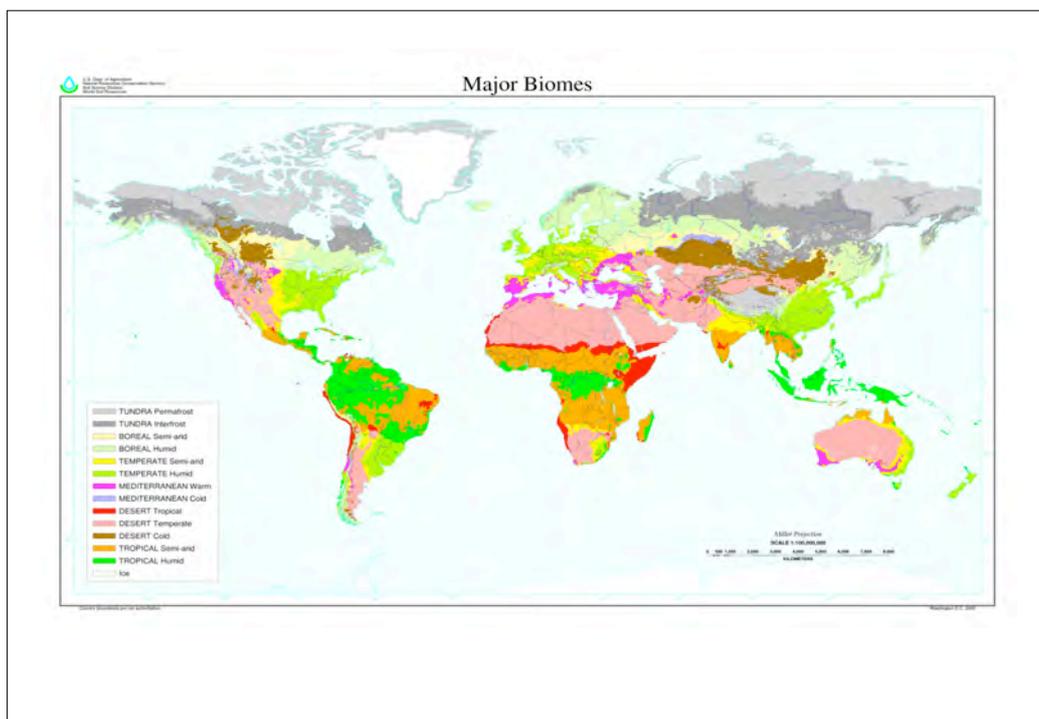
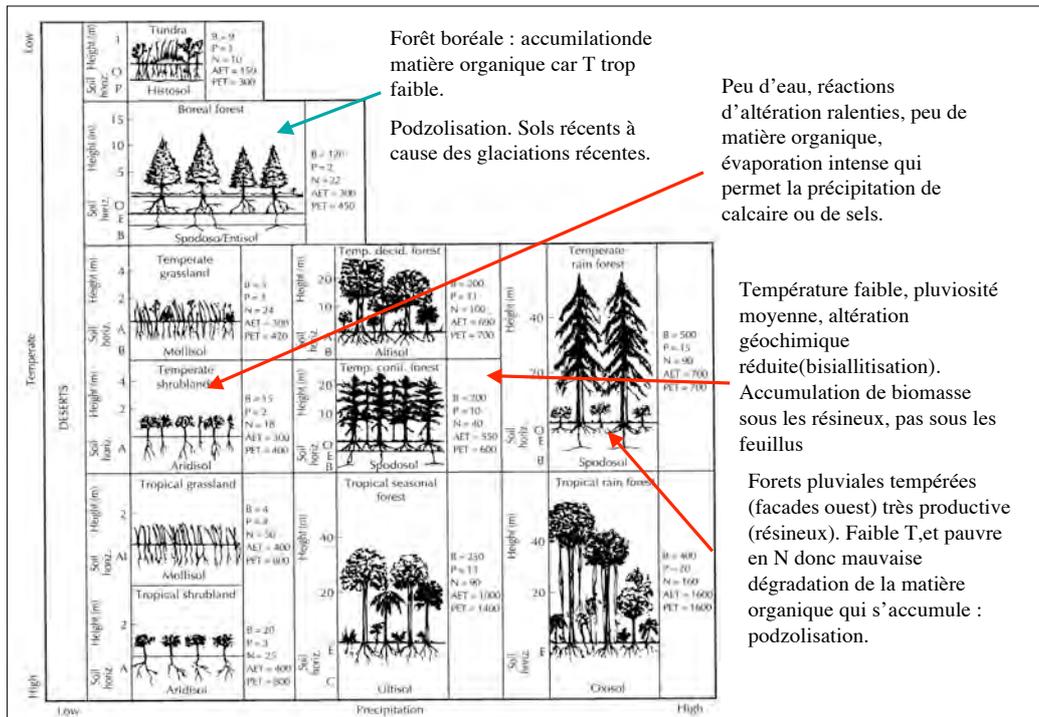


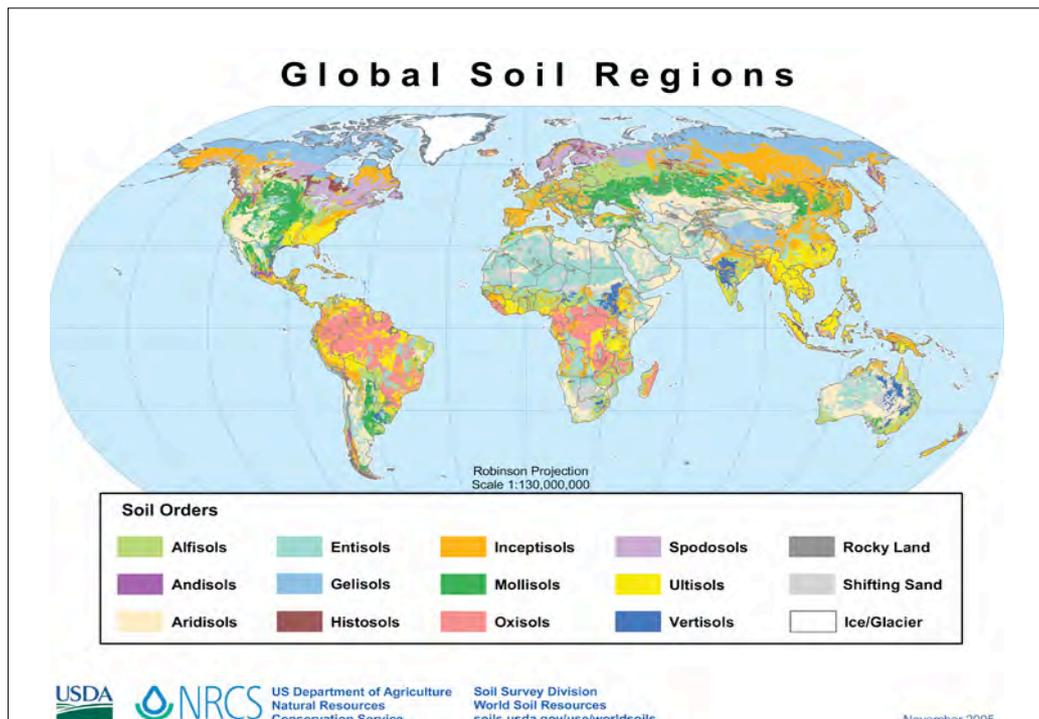
## Etude de chronoséquences glaciaires



- On donne ici quelques aspects de la classification naturaliste des sols. Il ne faut pas chercher de modèle explicatif. Il n'existe pas et ce sont surtout des observations.
- Equation un type de sol = un type d'écosystème. Ceci car les deux sont liés et liés aux conditions climatiques, hydrologique, d'érosion physique, de fonctionnement biologique des sols...
- D'où la correspondance frappante entre la carte mondiale des sols et des biomes (biome= grands types d'écosystème).

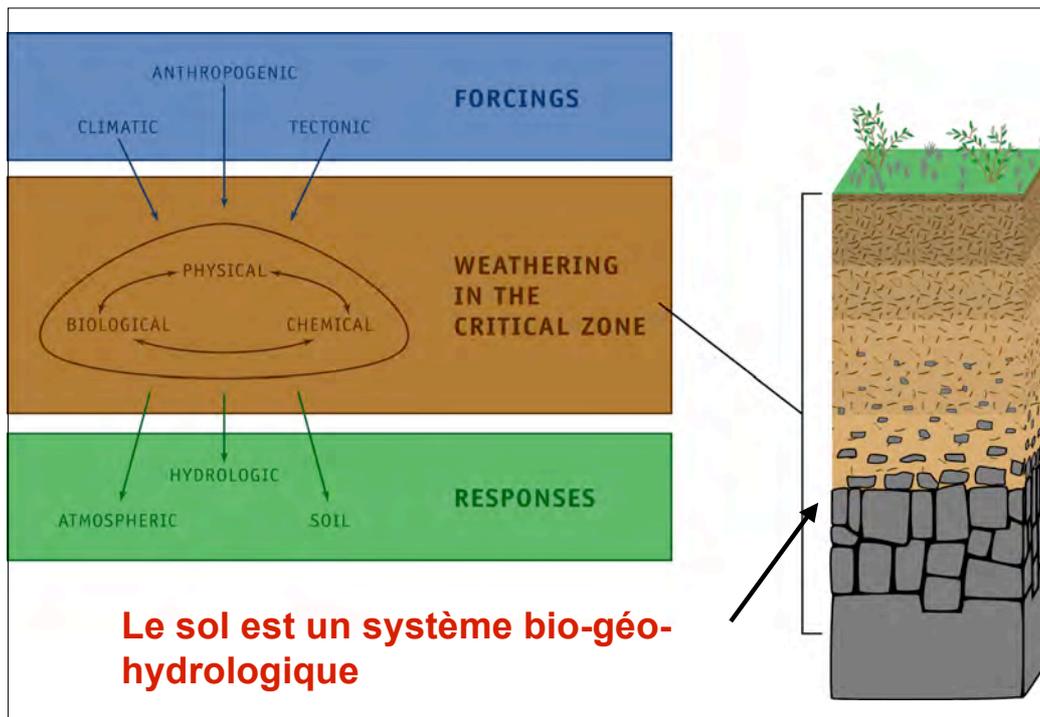






## Conclusion

- Les sol est un réacteur physico-bio-chimique. L'hydrologie, la biologie, la matière organique morte du sol, la porosité/perméabilité, les réactions géochimiques, les surfaces spécifiques et le temps, tous ces facteurs interagissent d'une manière encore mal comprise, mais ce cet équilibre dynamique résulte le sol et sa répartition globale.



## Facteurs forcants

- Le sol est une zone critique complexe, sensible à des forçages naturels (climatique, tectonique) et anthropiques (érosion mécanique, pollution...)
- C'est un milieu fragile, que l'homme dégrade beaucoup plus vite qu'il ne forme
- Le sols est le milieu de vie de l'homme et le point d'entrée des chaînes alimentaires (le Phosphore par ex. provient de l'altération de l'apatite quasi exclusivement).

## Le “weatheing engine” et le changement global ?

