

III) ALTÉRATION DES ROCHES

L'altération désigne toute **modification des propriétés physico-chimiques des minéraux**, et donc **des roches**, par les **agents atmosphériques**. Elle a généralement pour effet de **rendre les roches moins cohérentes** ce qui **facilite leur désintégration**.

L'altération se déroule à la surface de la croûte terrestre et peut être classée en deux catégories : **l'altération mécanique** et **l'altération chimique**.

Il est à noter que **l'eau joue un grand rôle** dans les processus d'altération, à la fois mécanique et chimique.

III-1) ALTÉRATION MÉCANIQUE = DÉSAGREGATION MÉCANIQUE

L'altération mécanique conduit à la **désagrégation des roches en débris** (fragments, morceaux) **mono-minéraux** (composés d'un seul minéral) ou **poly-minéraux** (composés de plusieurs minéraux) de taille variable.

Cette **désagrégation dépend** d'une part des **caractères liés aux roches** elles-mêmes et d'autre part aux **facteurs liés à l'environnement** dans lequel évoluent ces roches.

→ Caractères liés à la roche :

- Nature lithologique de la roche (grès, argiles, calcaire, granite, ...)
- Caractéristiques physiques (dureté, texture, structure, porosité, ...).

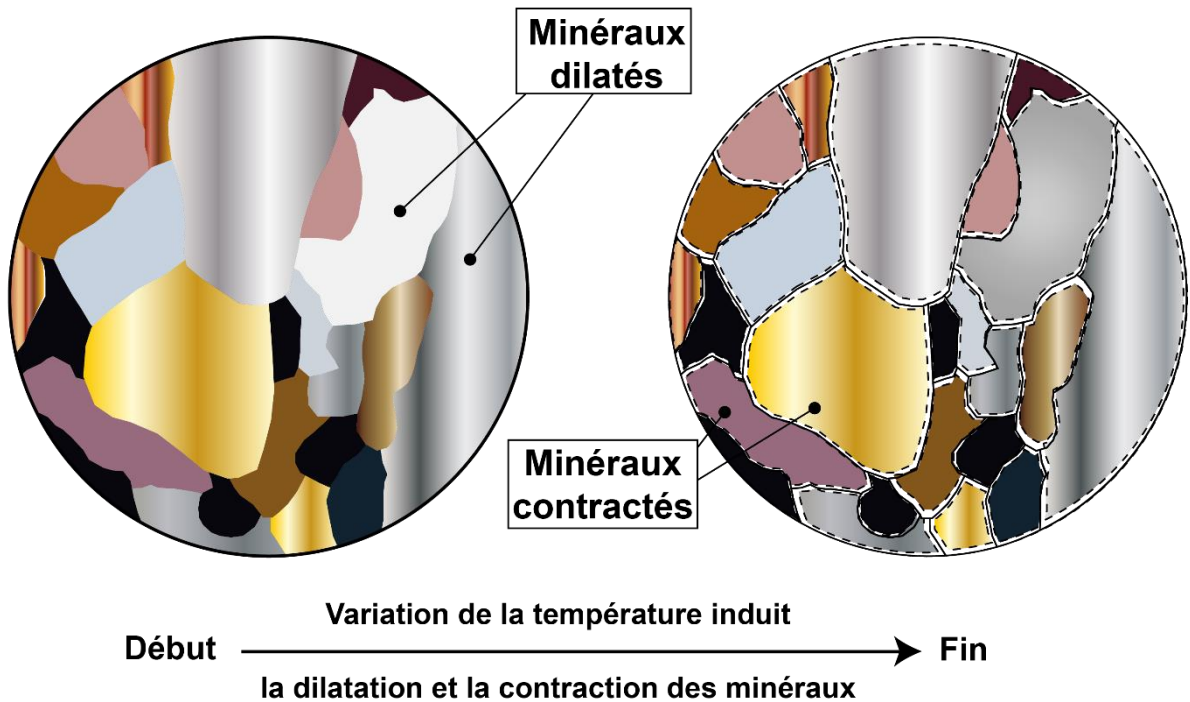
→ Facteurs liés à l'environnement :

- Climat (température, précipitation, humidité, ...)
- Topographie (pente)
- Durée d'exposition aux agents de désagrégation.

L'altération mécanique se manifeste par plusieurs processus :

III-1-1) Thermoclastie : (*thermo* → *chaleur* ; *clastie* → *fragmentation* = *éclatement*).

Elle correspond à la **désagrégation mécanique** des roches **sous l'effet de fortes variations de la température**. En effet, les dilatations et contractions différentielles des minéraux conduisent à la désagrégation des roches.

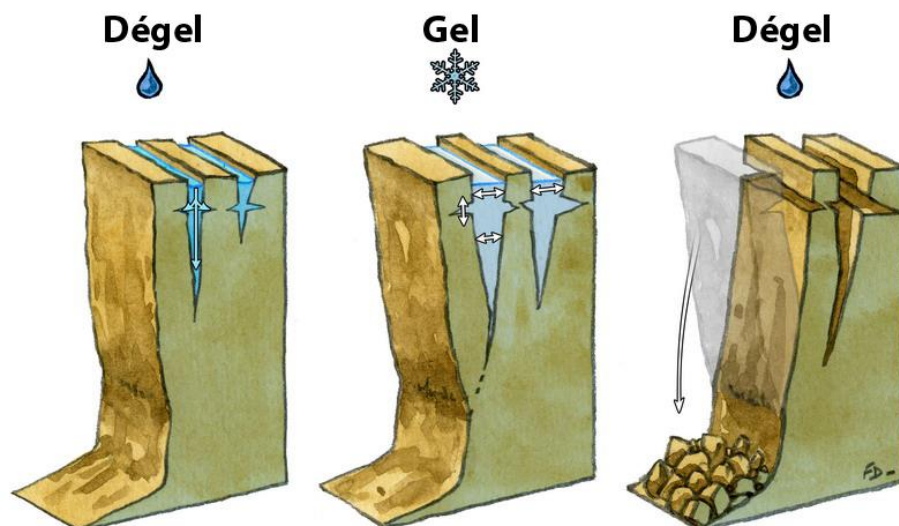


La répétition des cycles de **dilatation - contraction** des minéraux d'une roche sous l'effet de **l'augmentation - diminution** de la **température**, conduit à la désagrégation de la roche.

III-1-2) Gel-Dégel = Gélifraction = Cryoclastie (*cryo* → *froid* ; *clastie* → *éclatement*).

Ce type de désagrégation mécanique caractérise les régions où la température varie autour de 0°C notamment les zones périglaciaires.

Les fissures dans les roches s'élargissent à cause de **l'alternance du gel-dégel** jusqu'à ce que les roches se fracturent.

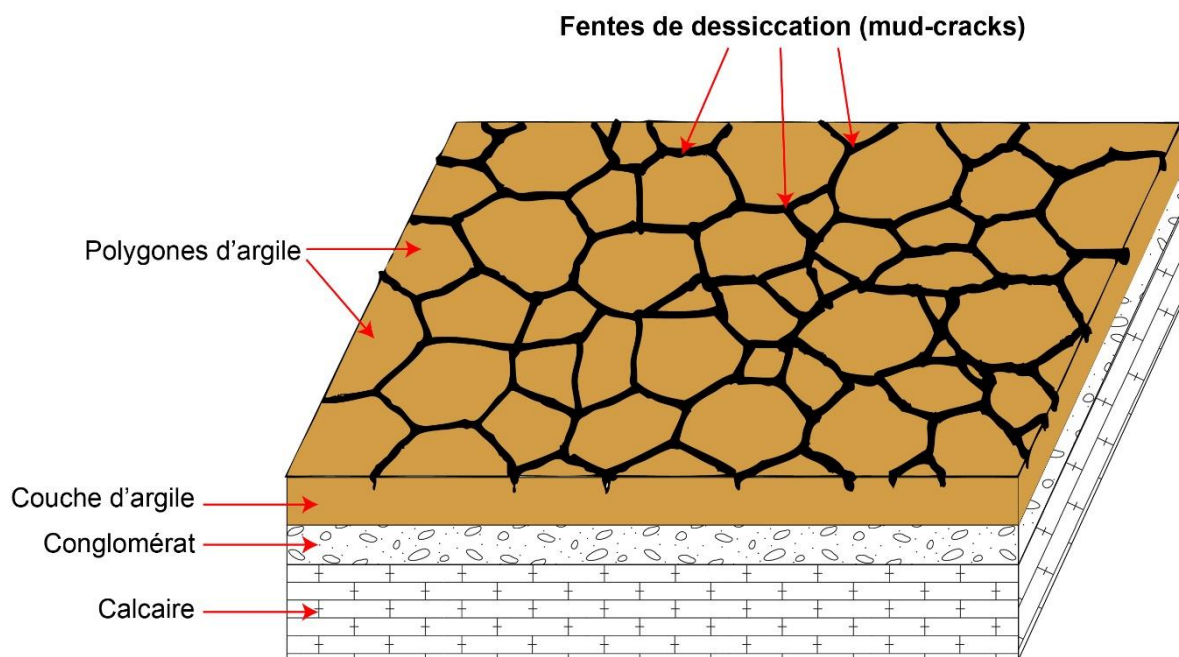


Pendant le **dégel**, l'eau remplit les fissures. Pendant le **gel**, l'eau devient une glace augmentant ainsi de volume. Cette augmentation de volume de la glace exerce des **forces** « *flèches blanches sur la figure* » sur les parois des fissures qui **s'allongent** et **s'élargissent** progressivement. Si ce cycle de **gel-dégel** continue, la roche finit par se **désagréger** en **morceaux** de petite taille.

III-1-3) Hydroclastie (*hydro* → eau ; *clastie* → fragmentation = éclatement).

C'est un processus d'altération mécanique qui conduit à la fragmentation des roches ou minéraux par des **variations cycliques de teneur en eau** lors de phases de **dessiccation/humectation**.

L'hydroclastie intéresse les roches qui contiennent **les minéraux gonflants** telles que **les argiles**.



En **période humide**, l'eau est **absorbée** par les **minéraux gonflants** présents dans les **sols argileux** provoquant ainsi une **augmentation du volume**.

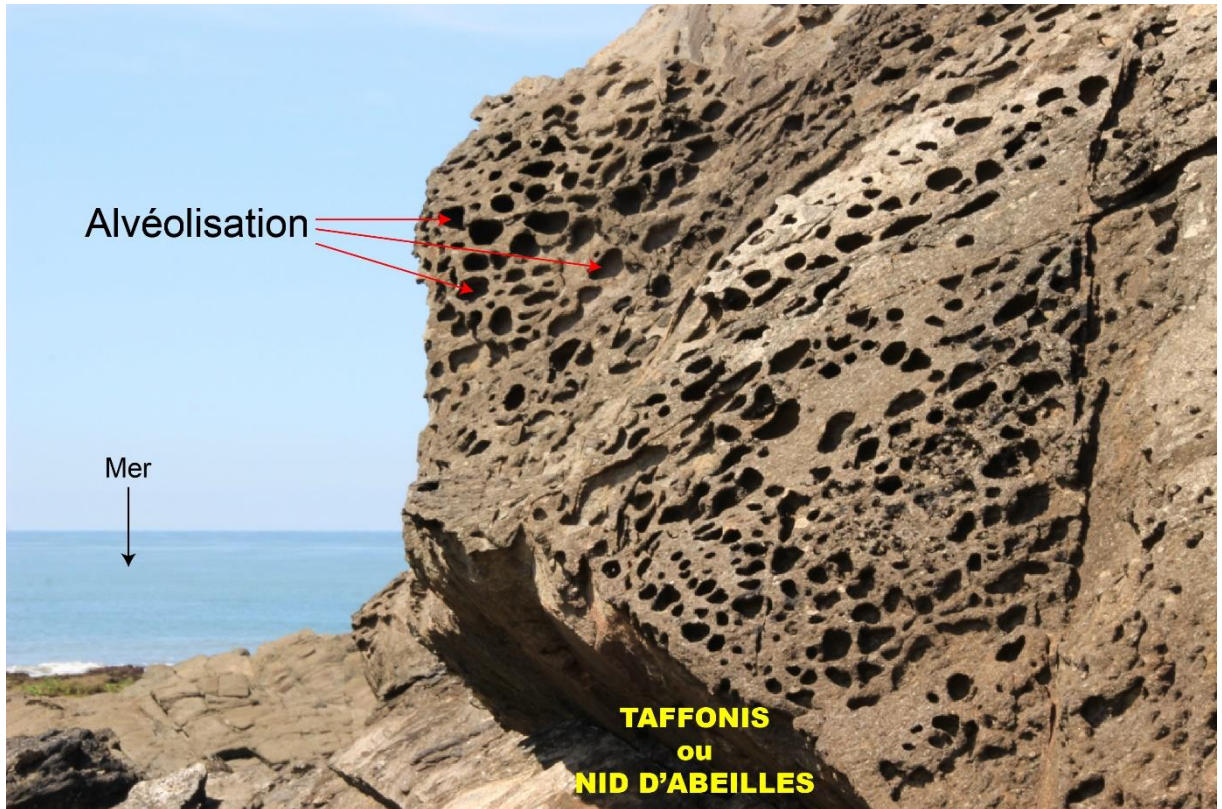
En **période sèche**, ces **sols argileux** deviennent **secs** à cause de l'évaporation de l'eau provoquant ainsi une **diminution de volume**.

Des **fentes de dessiccation (mud-cracks)** apparaissent sur la surface du sol argileux en dessinant souvent des **polygones**.

III-1-4) Haloclastie (*halo* → sel ; *clastie* → fragmentation = éclatement).

C'est un processus **d'altération mécanique** lié à la **crystallisation de sels** dans les **fissures**, les **cassures** et les **pores (vides) au sein des roches**.

L'**haloclastie** est **efficace** dans les **zones côtières** et dans les **déserts** (milieux très riches en sels).



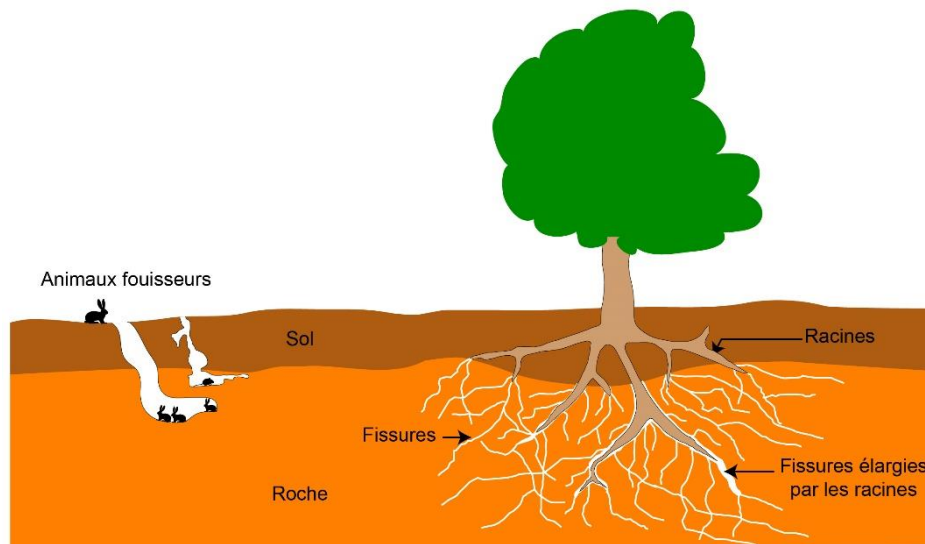
L'**eau de mer** chargée en **sels** pénètre dans la **roche**. Lorsqu'il y a **évaporation** de cette eau, les **sels cristallisent** dans les fissures, les diaclases et surtout le réseau de pores. Les cristaux de **sels exercent** alors une **pression** importante sur les **parois** des pores entraînant une **rupture des roches**.

La **répétition de ce cycle** entraîne une **alvéolisation** : apparition des **alvéoles** = **petites cavités de taille mm à cm**. L'ensemble des alvéoles forme un **taffonis** ou **nids d'abeilles**.

III-1-5) Les êtres vivants

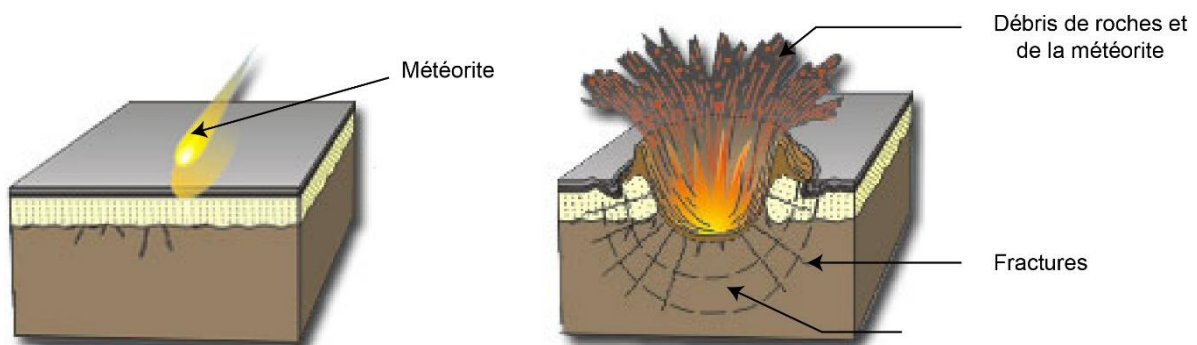
Certains êtres vivants présentent une **action mécanique** et participent dans la désagrégation des roches :

- Croissance des végétaux supérieurs ont une action destructrice par l'expansion de leurs racines qui peuvent écartier les fissures.
- Les animaux fouisseurs (Taupes, Marmottes, Courtilières, Termites, Fourmis, ...) qui creusent des terriers dans les roches meubles, ou peu consolidées.
- Les activités humaines manifestées par le creusement des tranchées de routes, de tunnels, de carrières, de galeries souterraines ; la déforestation, les labours, etc. participent dans la désagrégation mécanique.



III-1-6) Impact des météorites

Les météorites sont des corps rocheux ou métalliques venant de l'espace et entrant en collision avec la Terre formant ainsi des cratères. Les grandes météorites forment de grands cratères accompagnés d'immenses fractures et cassures, mais aussi du broyage des roches terrestres.



III-2) ALTÉRATION CHIMIQUE

III-2-1) Le rôle important de l'eau dans l'altération chimique

L'altération chimique est un **mécanisme** qui conduit à la **dégradation** des **minéraux** et des **roches** sous les **conditions** environnantes **répandues** à la **surface de la Terre**.

L'altération chimique est plus **dominante** que l'altération mécanique. L'**eau** y joue un **rôle très important** grâce à la structure de sa molécule en **dipôle électrique** : un pôle portant des charges (+) et un autre pôle portant des charges (-).

La molécule d'eau est une molécule **non linéaire**, les atomes d'hydrogène sont liés par des **liaisons covalentes** à l'atome d'oxygène faisant ainsi un **angle** de **104.45°**.

Les **molécules d'eau** sont liées **entre elles** par des **liaisons hydrogène** résultant des interactions électrostatiques entre les pôles positifs et les pôles négatifs. La **polarité** de la **molécule d'eau** lui facilite de **se diviser en proton H^+ et en hydroxyde OH^-** , ce qui lui confère une grande force de **dissociation ionique**.

L'eau est aussi un **solvant puissant** qui dissout facilement les solides ioniques en formant des **sphères de solvation** autour des ions dissous.

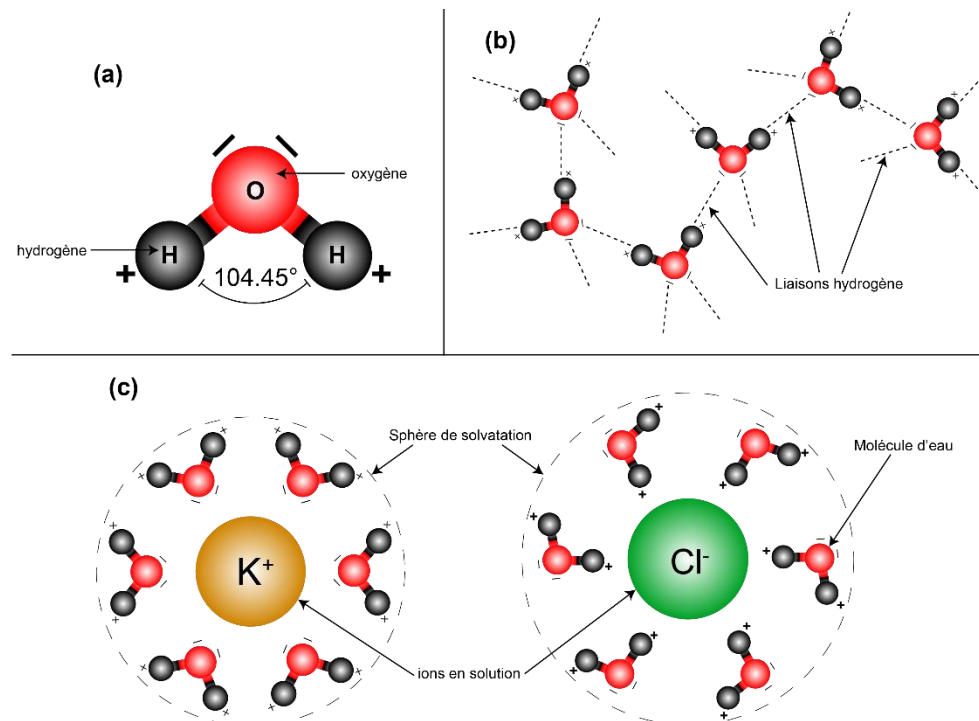


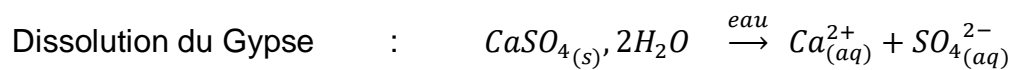
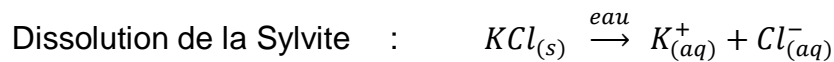
Figure : (a) Dipôle électrique de la molécule d'eau. (b) Liaisons hydrogène liant les molécules d'eau entre elles. (c) Sphère de solvation autour des ions K^+ et Cl^- en solution, les charges négatives de l'atome d'oxygène s'alignant avec les charges positives des cations (K^+), et les charges positives des atomes d'hydrogène s'alignant avec les charges négatives des anions (Cl^-).

III-2-2) Principales réactions d'altération chimique

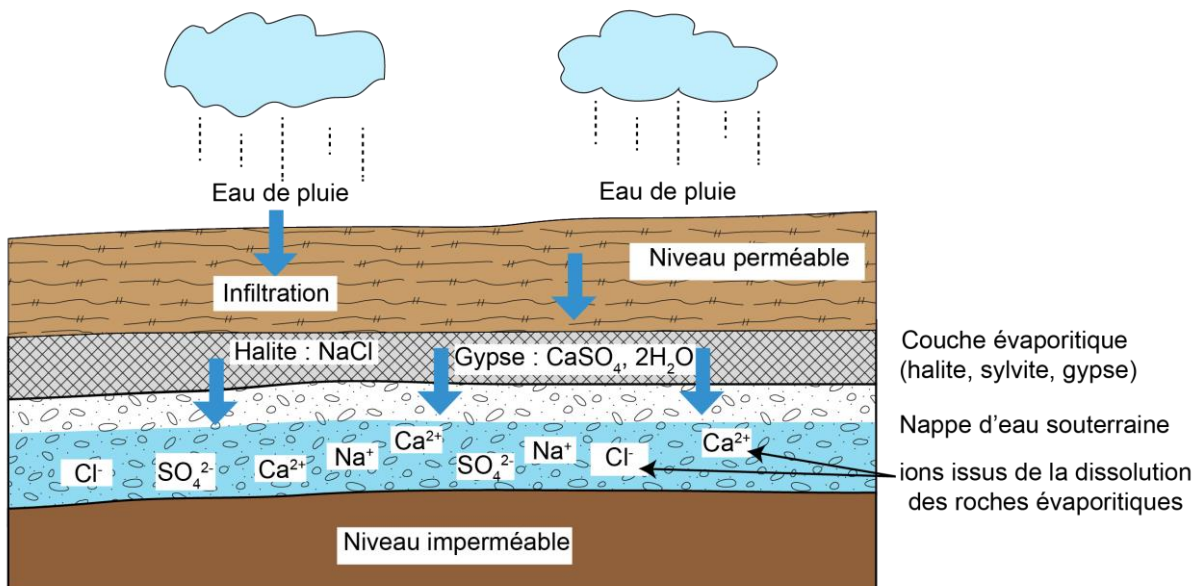
L'altération chimique se manifeste par 5 processus :

a) Dissolution

Ce processus simple intéresse les **roches évaporitiques** telles que l'Halite, la Sylvite, le Gypse, etc. Les **éléments chimiques** présents dans ces roches **passent en solution** sous forme d'**ions aqueux (aq)**.



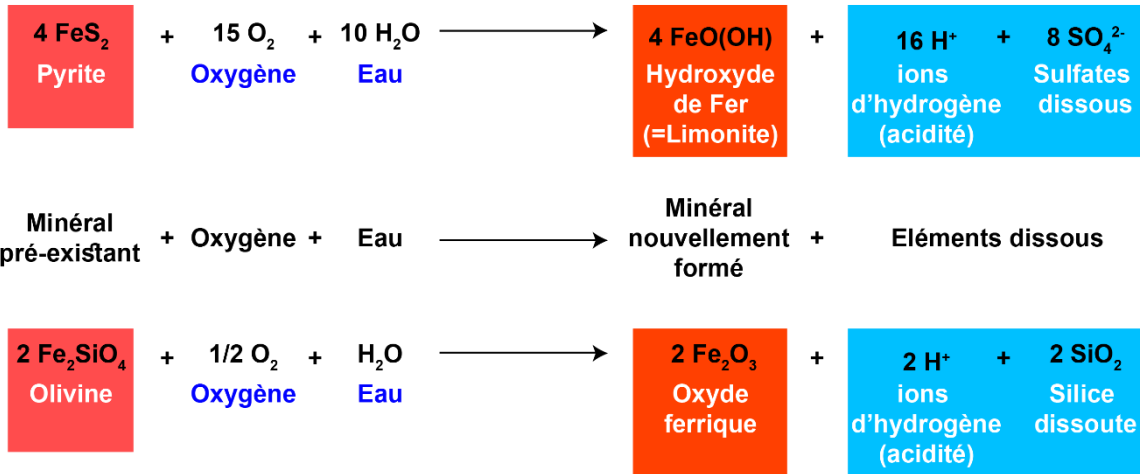
La **dissolution des roches évaporitiques** par les eaux de pluie est responsable de la **salinisation** (= augmentation du taux de sels) des eaux de nappes d'eau souterraine.



b) Oxydation et réduction

L'**oxydation** intéresse surtout les **minéraux contenant du Fer** qui passe du **fer ferreux Fe²⁺** (état réduit) au **fer ferrique Fe³⁺** (état oxydé).

Exemples de certains minéraux contenant du fer : Pyrite, Olivine.



L'**oxydation** est caractérisée par des **taches de couleur rouge, orange, jaune** qui apparaissent comme des **taches de rouille**.



Oxydation des minéraux ferreux contenus dans les schistes (tache jaune)



Paysage d'oxydation de roches (surfaces oranges)

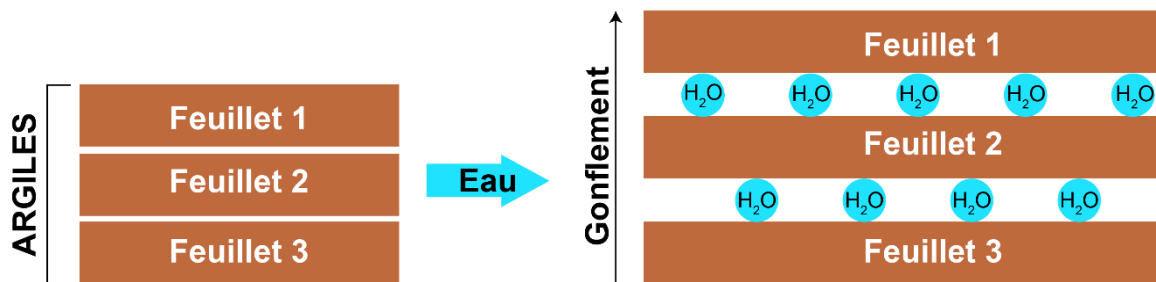
La **réduction** (processus opposé à l'oxydation), **correspond au passage du fer ferrique Fe³⁺ moins soluble au fer ferreux Fe²⁺ plus soluble**.

Contrairement à l'oxydation, la **réduction** reste un processus **moins répandu** dans la nature ; elle intervient dans les milieux pauvres en oxygène.

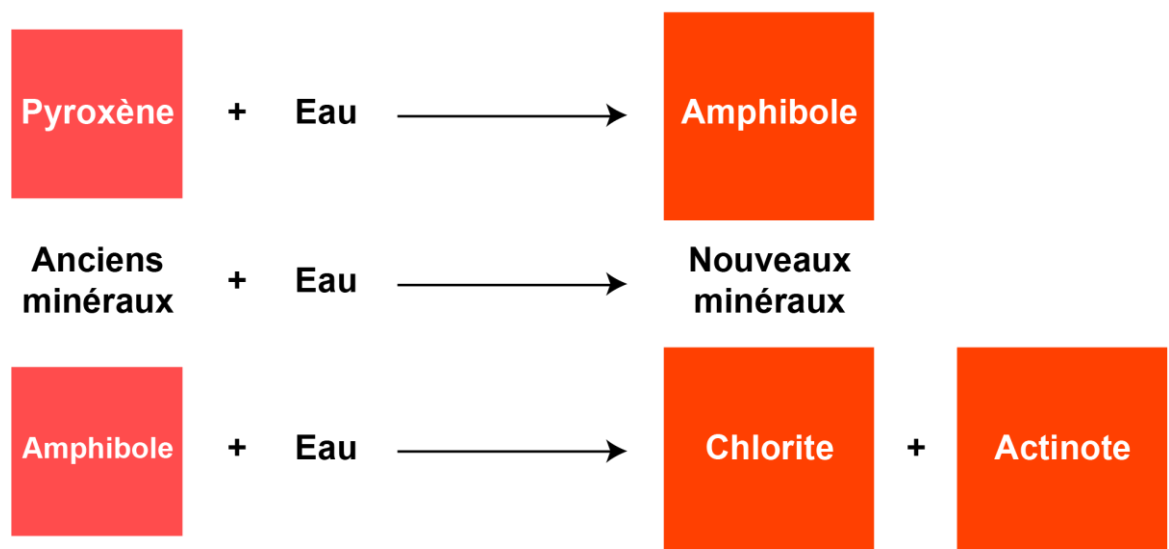
c) Hydratation

L'hydratation est définie comme un **ajout** (incorporation) de **molécules d'eau** à certains minéraux, ce qui produit un **gonflement** et favorise par conséquent la destruction de la roche.

L'**hydratation** concerne particulièrement les **minéraux argileux**. Ceci est dû à leur **structure en feuillets (couches)**. En effet, pendant l'hydratation les molécules d'eau s'injectent entre les feuillets conduisant au gonflement des minéraux argileux.

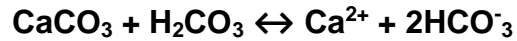


L'**hydratation** entraîne aussi la **transformation** d'**anciens minéraux** en d'autres **nouveaux minéraux**. C'est le cas du Pyroxène et de l'Amphibole.



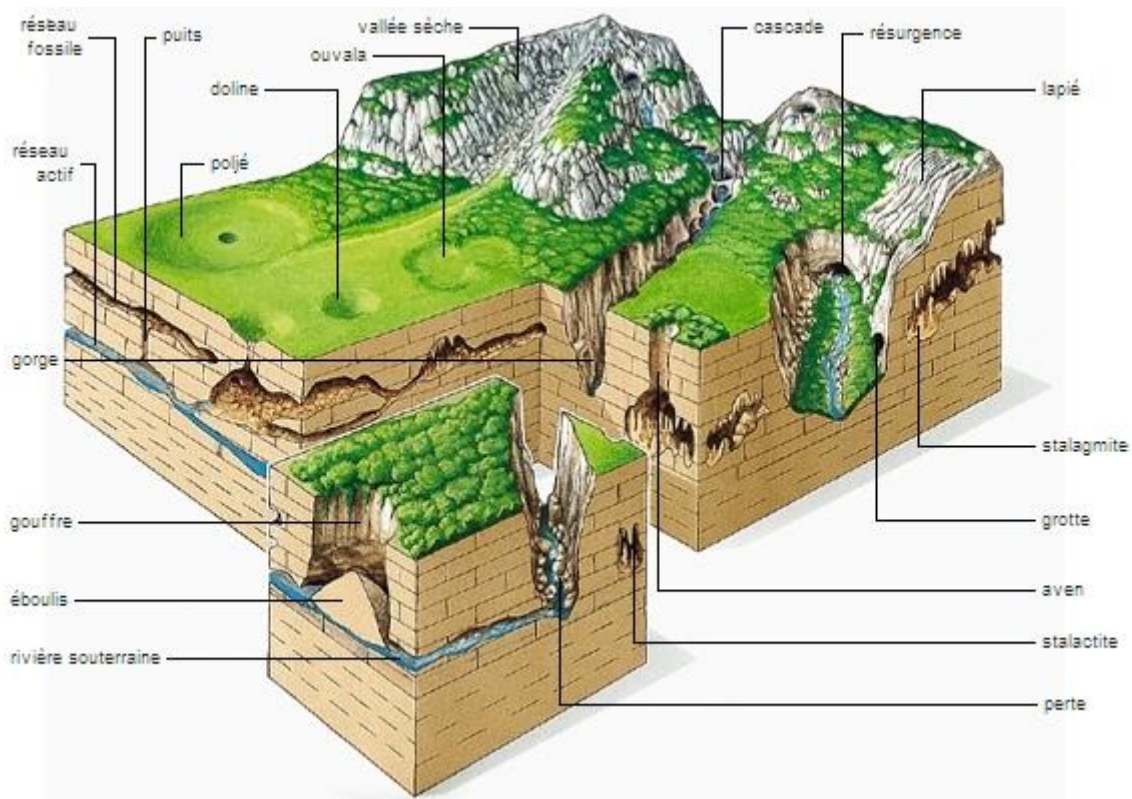
d) Décarbonatation

Elle produit la **solubilisation** des **roches carbonatées** (calcaire $[CaCO_3]$ et dolomie $[CaMg(CO_3)_2]$) sous l'action de l'**acide carbonique** H_2CO_3 issu du mélange du $CO_2 + H_2O$.



Il en résulte des paysages particuliers appelés **paysages karstiques** ou **KARST**.

Un **karst** est un **type de relief** dû à la **décarbonatation des roches carbonatées** sous l'effet des **eaux de pluies chargées en gaz carbonique (CO_2)**. Dans un karst, on distingue des **formes de surface** et des **formes souterraines**.



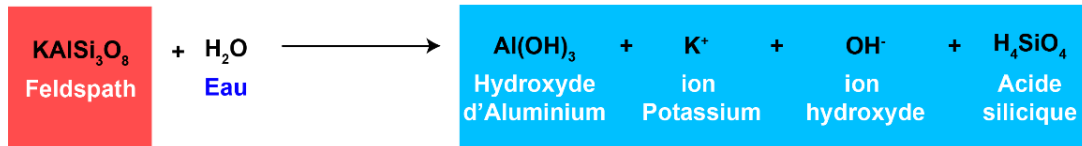
Formes de surface : Lapiès, Poljé, Doline, Ouvala, Vallée sèche, Cascade, Gorge, Canyon.

Formes souterraines : Aven, Gouffre, Galerie, Grotte, Stalactite, Stalagmite, Colonne, rivière souterraine, lac souterrain,

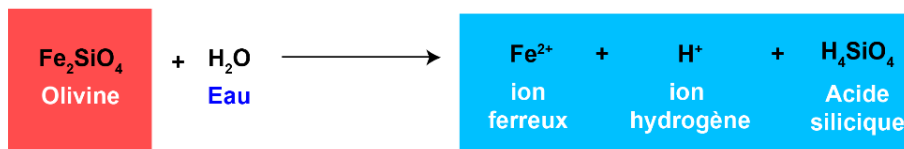
e) Hydrolyse

L'**hydrolyse** correspond à la **destruction** des minéraux par l'eau. Elle peut être :

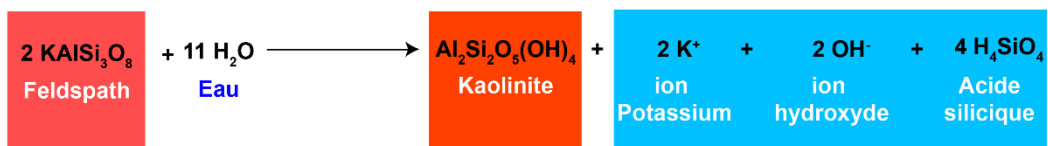
- **Hydrolyse totale** lorsque le minéral est **détruit complètement** et donne des **ions, hydroxydes**, etc.



Minéral + Eau → Éléments en solution



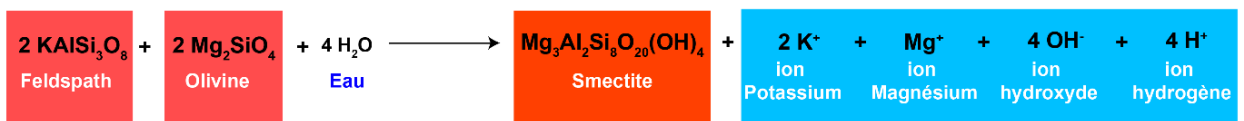
- **Hydrolyse partielle** lorsque la **destruction** du minéral est **incomplète** et donne directement des **argiles**.



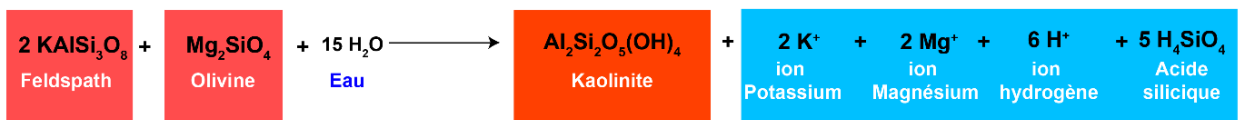
Minéral + Eau → Argile + Éléments en solution

Les argiles issues de l'hydrolyse partielle sont de nature différente selon les conditions du milieu :

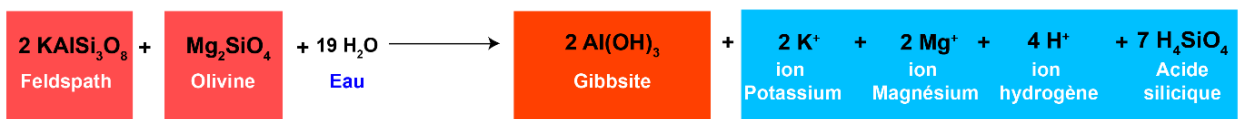
► SOUS CLIMAT ARIDE : L'EAU EST RARE



► SOUS CLIMAT MODÉRÉ : L'EAU EST ABONDANTE



► SOUS CLIMAT HUMIDE : L'EAU EST TRÈS ABONDANTE



III-2-3) FACTEURS CONTROLANT L'ALTERATION CHIMIQUE

a) Résistance du minéral à l'altération

Les minéraux **réagissent d'une façon différente** vis-à-vis des processus d'altération chimique. Certains minéraux sont facilement altérés (**Labile**), d'autres ne le sont pas (**Résistant**).

GOLDISH (1938) a établi l'ordre de résistance des minéraux à l'altération :

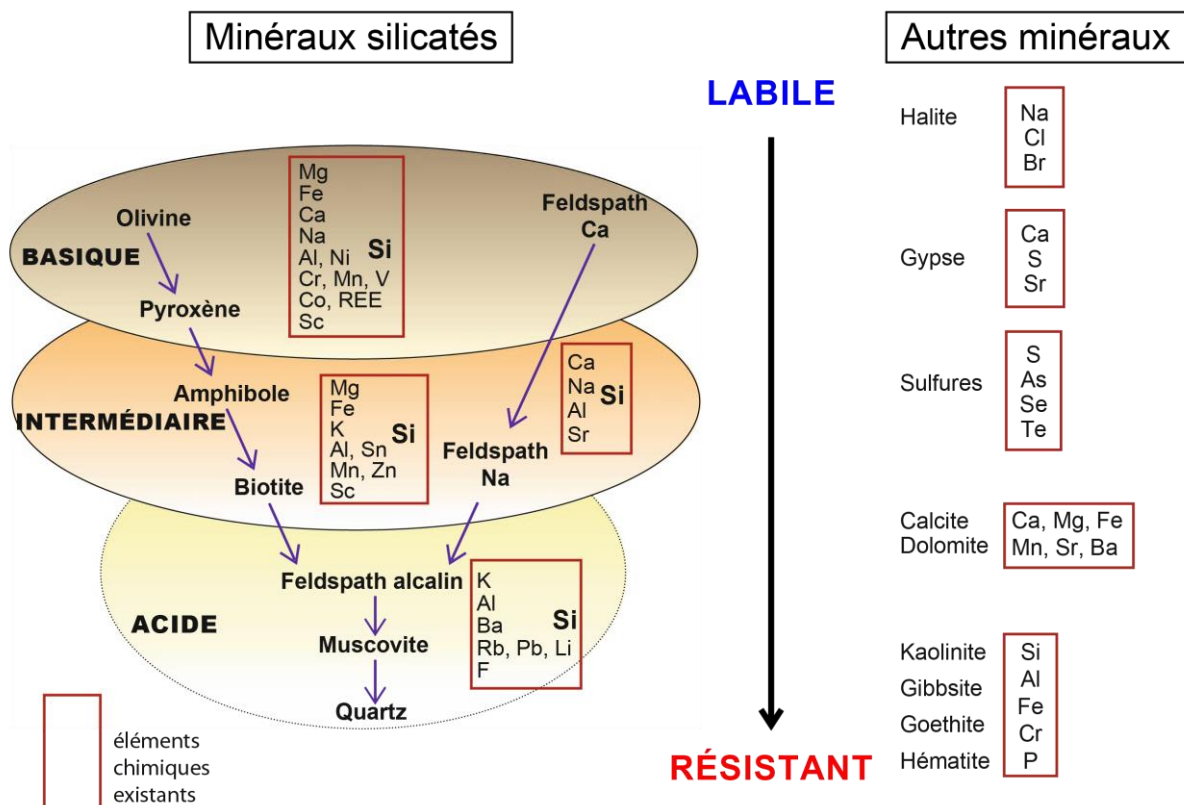


Figure : Ordre de résistance des minéraux à l'altération selon Goldish (1938)

b) Mobilité des ions

La mobilité d'un ion dépend de son rayon (**r**) et de sa charge ionique (**Z**). Le rapport **Z/r** appelé le **potentiel ionique** détermine le comportement des ions. La classification établie par GOLDSCHMIDT distingue 3 groupes d'ions d'après la valeur du **potentiel ionique** :

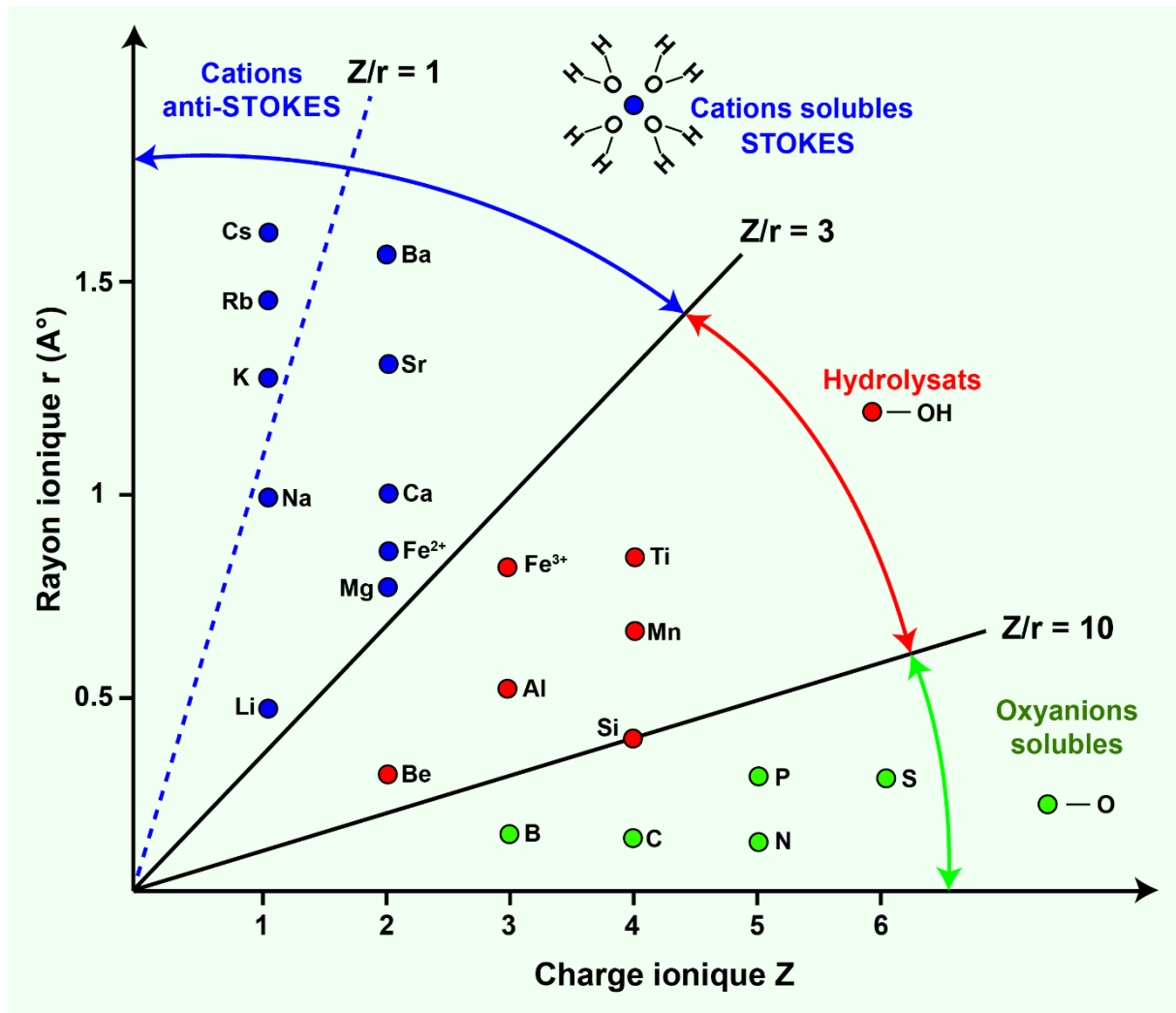


Figure : Diagramme de Goldschmidt (1934)

Le diagramme de GOLDSCHMIDT (1934) qui met en lumière **quatre grande familles d'ions** :

- $Z/r < 1$ = **cations anti-STOKES (assez solubles)** : ce sont des **cations solubles** présentant un gros diamètre et une faible charge, que ne s'hydratent pas (ou peu) mais possèdent une forte affinité pour le réseau cristallin. Ils sont donc moins mobiles que les cations STOKES.
- $1 < Z/r < 3$ = **cations STOKES (solubles)** : ce sont des **cations solubles** présentant un diamètre plus faible qui s'hydratent plus facilement et quittent prioritairement le réseau cristallin. Ils sont donc plus mobiles que les cations anti-STOKES.
- $3 < Z/r < 10$ = **hydrolysats (insolubles)** : ce sont des **cations de diamètre moyen** qui subissent l'hydrolyse et précipitent ensuite rapidement sous

forme d'oxydes. Ils ne sont pas **peu mobiles** car, malgré leur attraction pour l'eau dans un premier temps, ils forment rapidement des précipités insolubles.

- **$Z/r > 10$ = oxyanions (solubles)** : ce sont des ions polyatomique oxydés (ex. CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , PO_4^{2-} , SiO_4^{4-} ...) avec un petit diamètre et une charge élevée qui ont une très forte affinité pour la phase liquide. Ce sont donc les plus mobiles des ions lors de l'altération chimique.

Potentiel ionique	Domaine	Caractéristiques	Eléments	Phase
$Z/r < 3$ Cations solubles	Cations anti-Stokes	$Z/r < 1$, les ions de ce domaine n'ont aucune attraction pour la molécule d'eau et ne sont pas hydratés lors de leur mise en solution du fait d'une taille trop grande par rapport à leur charge.	Cations anti-Stokes K, Rb, Cs	Migratrice (Résiduelle)
	Cations Stokes	$1 < Z/r < 3$, ions hydratés donnant des solutions alcalines qui se combineront avec les oxyanions pour donner les principales roches sédimentaires.	Cations Stokes Ca, Na, Mg mais aussi Ba, Sr, Li, Fe²⁺, Mn²⁺	Migratrice
$3 < Z/r < 10$	Hydrolysats (insolubles)	ions de diamètre moyen, leur hydrolyse provoque la formation d'hydroxydes dont la stabilité en solution est faible.	Al, Fe³⁺, Si mais aussi Be, Zr, Ti, U, Mn⁴⁺	Résiduelle
$Z/r > 10$	Oxyanions (solubles)	ions de petit diamètre de charge élevée qui développent un champ électrique intense et permettent la formation d'anions solubles.	C, P, S, B, N	Migratrice

c) Facteurs externes contrôlant l'altération chimique

- la **concentration en SiO_2** exprimée en concentration d'acide silicique H_4SiO_4 ;
- la **concentration en cations basiques** (Na^+ , K^+ , Ca^{++}) ;
- le **pH** déterminé en particulier par les acides organiques ;
- la **température** dont l'augmentation régit la vitesse des réactions et la possibilité de dissolution des ions dans l'eau ;
- la **vitesse de circulation de l'eau** dans le milieu (drainage) exprimant les conditions de confinement ou de lessivage ;

On peut citer aussi : le **temps de contact**, les **concentrations**, le **drainage**, la **granulométrie**, ...