

Figure 1 : cycle sédimentaire
(in Segarra et al., Ellipses, à paraître)

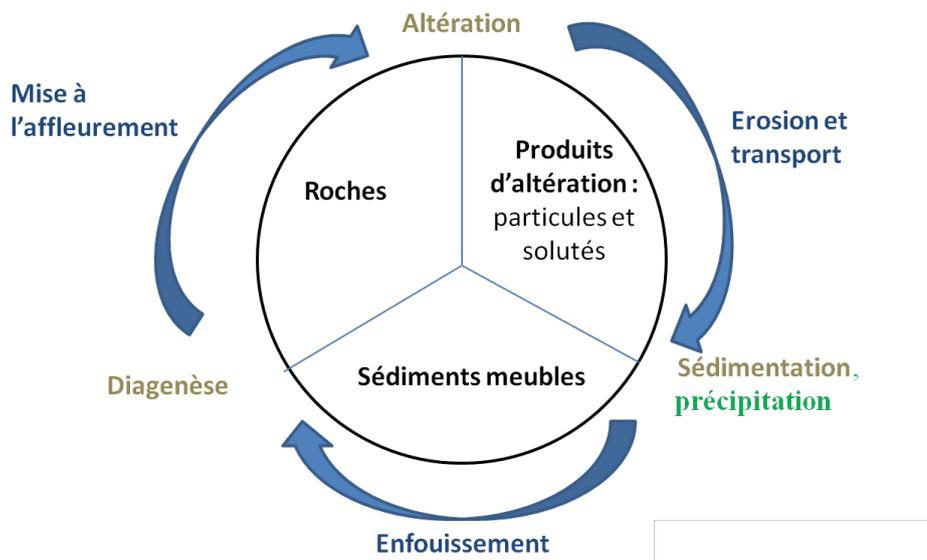
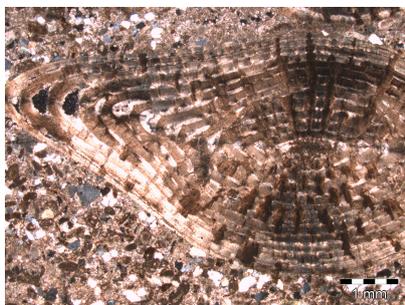


Figure 2 : comparaison de roches sédimentaires



Grès en LPA



Calcaire nummulitique en LPA



Gypse $\text{CaSO}_4, 2(\text{H}_2\text{O})$

Description :

Description :

Description :

Bilan :

Figure 3. a : Exemples montrant l'altération du granite.
(in Segarra et al., Ellipses, à paraître)

- (A) affleurement du granite altéré de Flamanville (Normandie)
- (B) photographies prises au microscope optique en LPA (G x 40) de lames minces correspondant aux emplacements localisés sur l'affleurement de Flamanville
- (C) Extrait de la carte de Condé sur Noireau au 50 000^{ème} sur laquelle les formations superficielles correspondent à l'altérite.

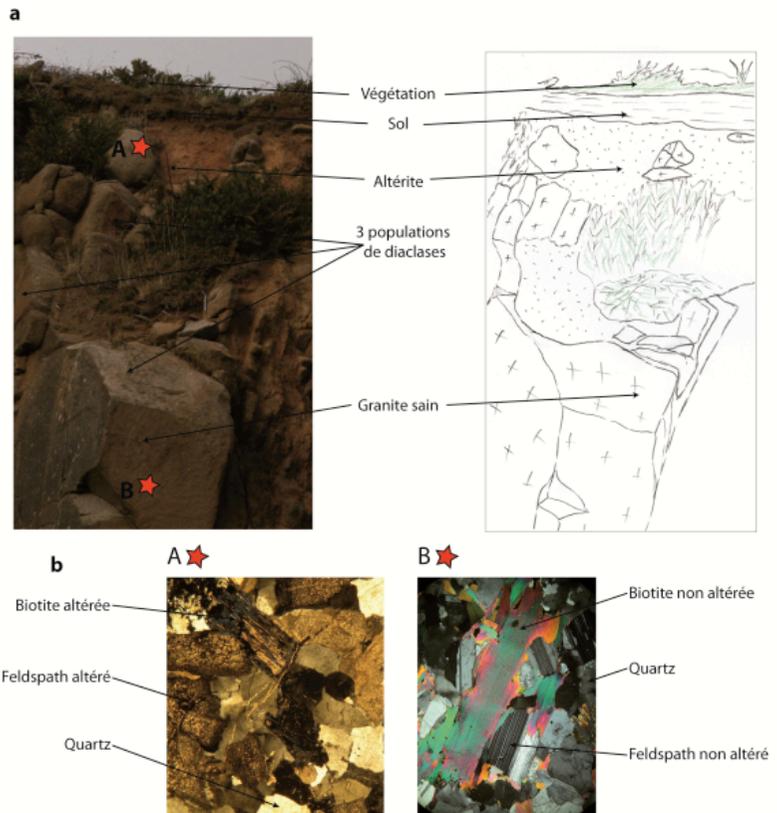


Figure 3.b : altération du granite en boules



Observations (structures observées):

Interprétation (mécanismes) :



Ploumanach',
Baie rose

Figure 4 : La diversité des formes karstiques

Les calcaires dolomitiques ou les dolomies donnent naissance à des reliefs ruiniformes comme dans le cirque de Mourèze au Nord de Béziers (figure 1).



Figure 1 : Cirque de Mourèze



Figure 2 : Gorges du Verdon

Ce type de paysage est dû au caractère poreux de la dolomie permettant une attaque par l'eau. Il en résulte un émiettement qui arrondit les formes et libère des débris de la taille des graviers.

1. Les **canyons** (Gorges du Verdon figure 2, gorge du Tarn)

Il s'agit de vallées à flancs raides, l'essentiel de l'érosion ayant lieu au fond du lit.

Les rivières sont **allogènes** c'est à dire que leur source est ailleurs. C'est le cas du Tarn qui vient de la Lozère. Si le fond est argileux donc imperméable, la vallée s'élargit en "reculant". La vallée se termine en cul de sac et prend le nom de **reculée** au niveau de laquelle on trouve souvent une source dite vaclusienne qui sape la vallée par érosion régressive.

2. Les **lapiez**: cisèlures à la surface des roches calcaires

3. Les **avens**: entonnoirs s'ouvrant à la surface du plateau (gouffre de Padirac dans les causses du Quercy).

Les fissures élargies par la dissolution plus les éboulements résultant conduisent à la formation de grottes.



Figure 3 : lapiaz (La Clusaz)



Figure 4 : gouffre



Figure 5 : Doline

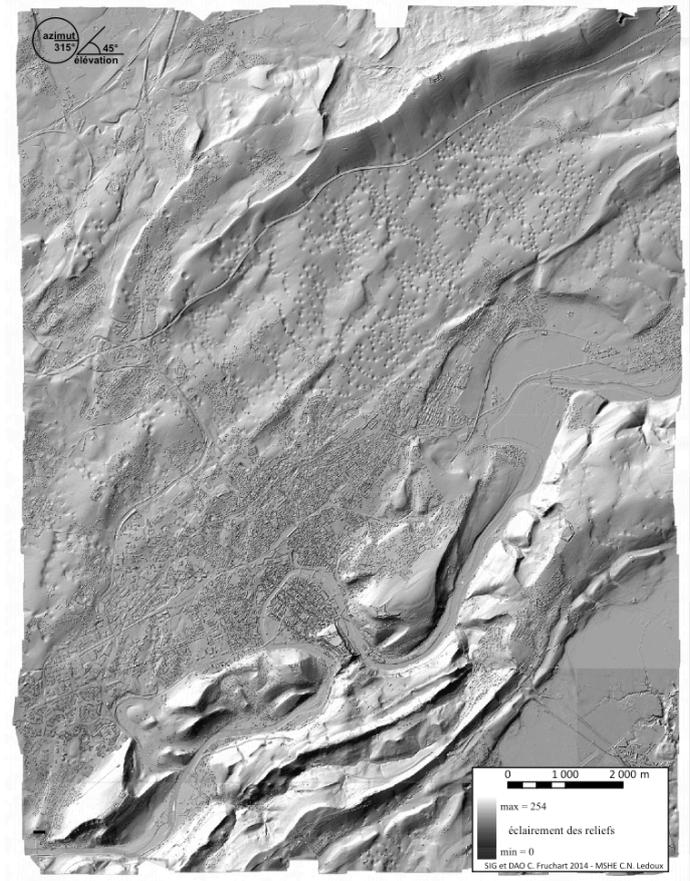
4. Les **dolines**: Dépression de forme ovale, de quelques mètres à 200 m de profondeur.

5. Les **Poljés**: plaines karstiques fermées

La rivière peut s'enfoncer dans un gouffre ou **ponor**. Si les pluies sont abondantes, le ponor peut fonctionner à l'envers comme une source remontante.

Résurgence du Lison

Dolines



Grotte des Moidons

Reculée des Planches

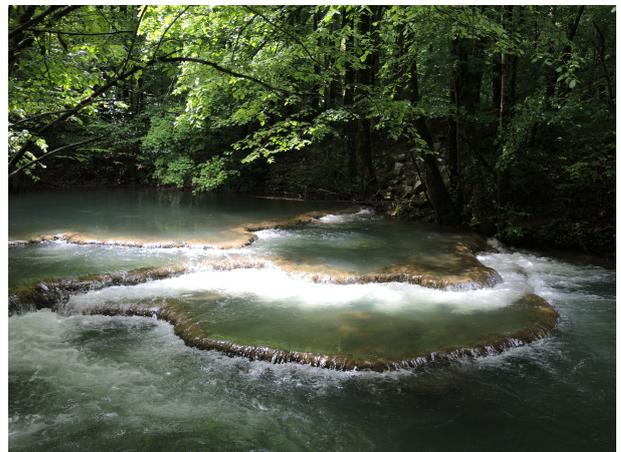
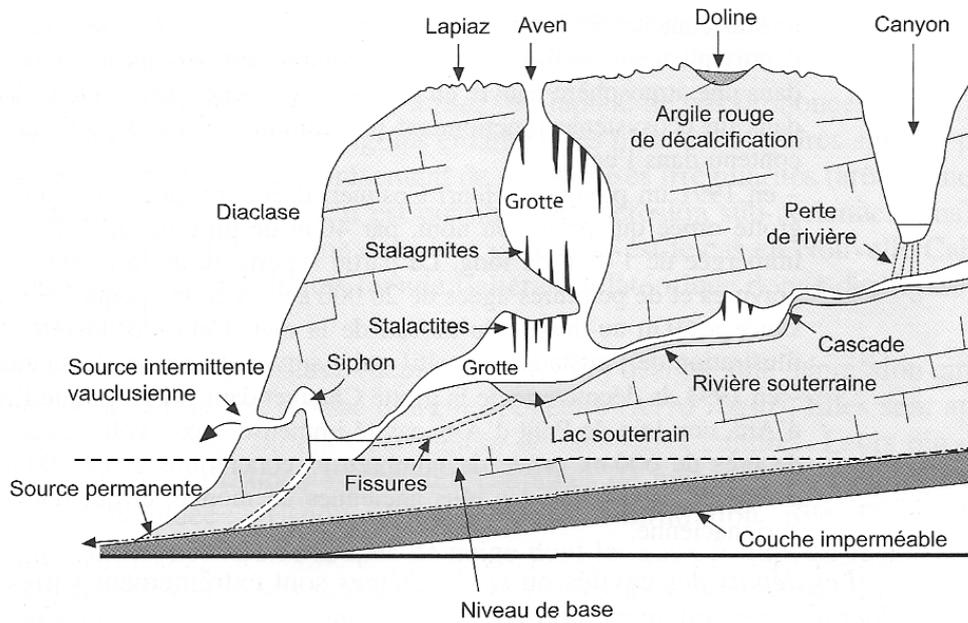


Figure 5 : morphologie karstique (in Pomerol et al., Dunod, 2005)



Quelques aspects de la morphologie karstique.
 Au-dessus du niveau de base karstique, la zone d'écoulement libre, aérée, est appelée *zone vadose*.

Figure 6 : Effet de la lithologie sur l'altération
Panorama du Lac du Salagou
 (in Segarra et al., Ellipses, à paraître)



Figure 7 : Effet de la température sur la désagrégation des roches

La falaise de grès du canyon Bryce (Utah) subit une intense désagrégation mécanique. Pendant 8 mois de l'année, la température moyenne est inférieure à 0 °C la nuit et supérieure à 0 °C le jour.



Quel rôle cela joue-t-il dans la désagrégation ?

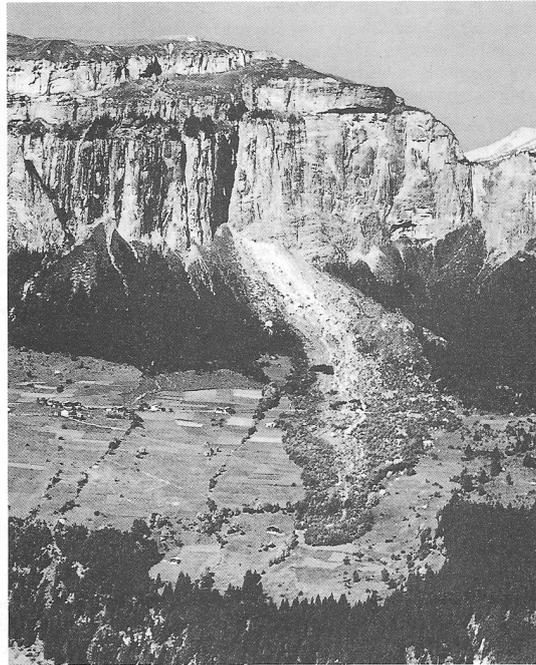
.....
.....
.....
.....

En montagne :



Figure 8 : Mécanismes dépendant de la gravité

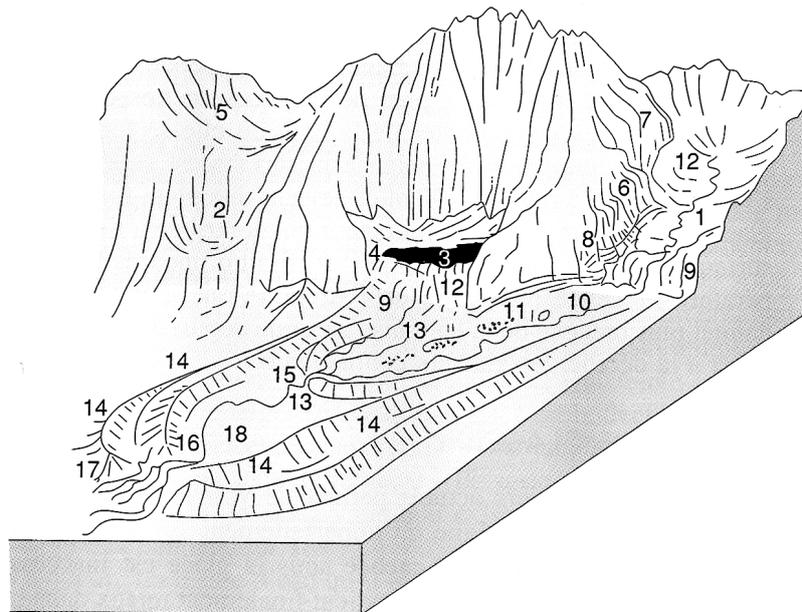
Un exemple d'éboulement (in Pomerol et al., Dunod, 2005)



L'éboulement du Flimsenstein (Suisse) en 1939.
Remarquer la cicatrice de décollement du pan de la falaise verticale et l'énorme chaos rocheux étalé à son pied. Les matériaux ne sont pas classés : des blocs de plusieurs dizaines de m³ voisinent avec des graviers. Le phénomène est très brusque et les destructions considérables (cliché *Swissair*).

Figure 9 : rôle des glaciers

a. Reliefs glaciaires (in Pomerol et al., Dunod, 2005)



1 : auge glaciaire, 2 : cirque, 3 : lac de cirque ou d'ombilic, 4 : verrou, 5 : limite de polissage du glacier, 6 : paroi de vallée en U, 7 : épaulement (en cas de vallées emboîtées), 8 : cannelures, 9 : gradin, ressaut de vallée, 10 : terrain glaciaire, 11 : drumlin, 12 : roche moutonnée, 13 : moraine de fond, 14 : moraine de « poussée » et vallum morainique, 15 : moraine de « retrait » ou moraine terminale, 16 : gorge, 17 : esker, 18 : kames.

b. Glacier , Canada



Lateral and terminal moraines of a valley glacier, Bylot Island, Canada.

Figure 10 : dissolution du CO₂ dans l'eau

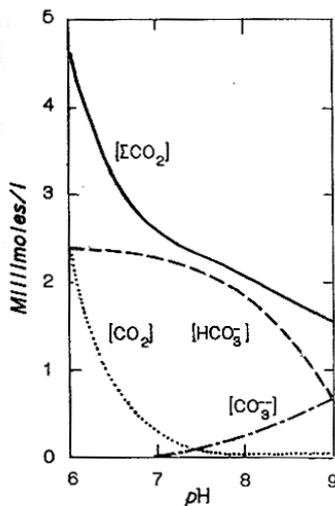
a. Equation de dissolution du CO₂ :



Avec : $\text{H}_2\text{CO}_3 \leftrightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$ pKA = 6,1

$\text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \leftrightarrow \text{CO}_3^{2-} + 2\text{H}^+$ pKA = 10,3

b. Influence du pH sur les formes du CO₂ (in Cojan et Renard, Dunod, 2006)



Forme majoritaire à pH acide :

.....

Forme majoritaire à pH basique :

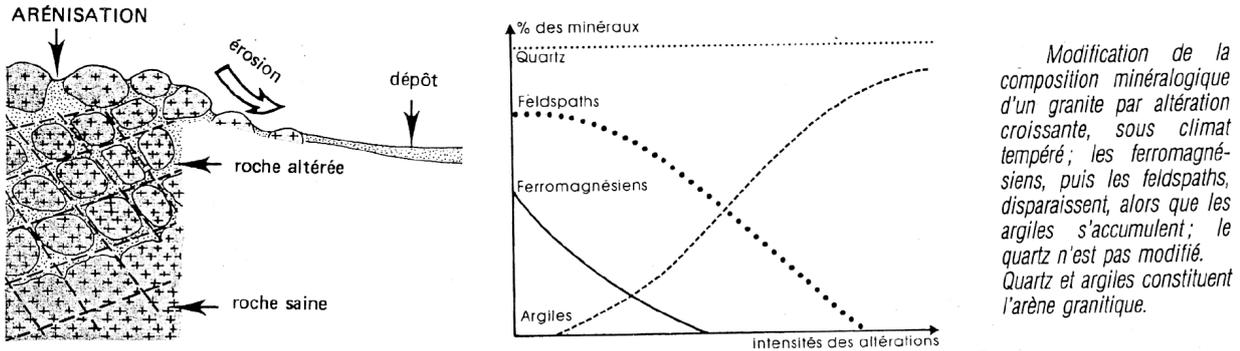
.....

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., 1963).

Figure 11 : altération d'un granite : disparition des feldspaths et apparition d'argiles
(in Nathan, 1ère S)



Décrire le graphique et l'interpréter (en utilisant le doc 13):

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Figure 12 : Bilan de l'altération du granite en climat tropical (chaud, humide et drainant).

(in Peycru et al., Dunod)

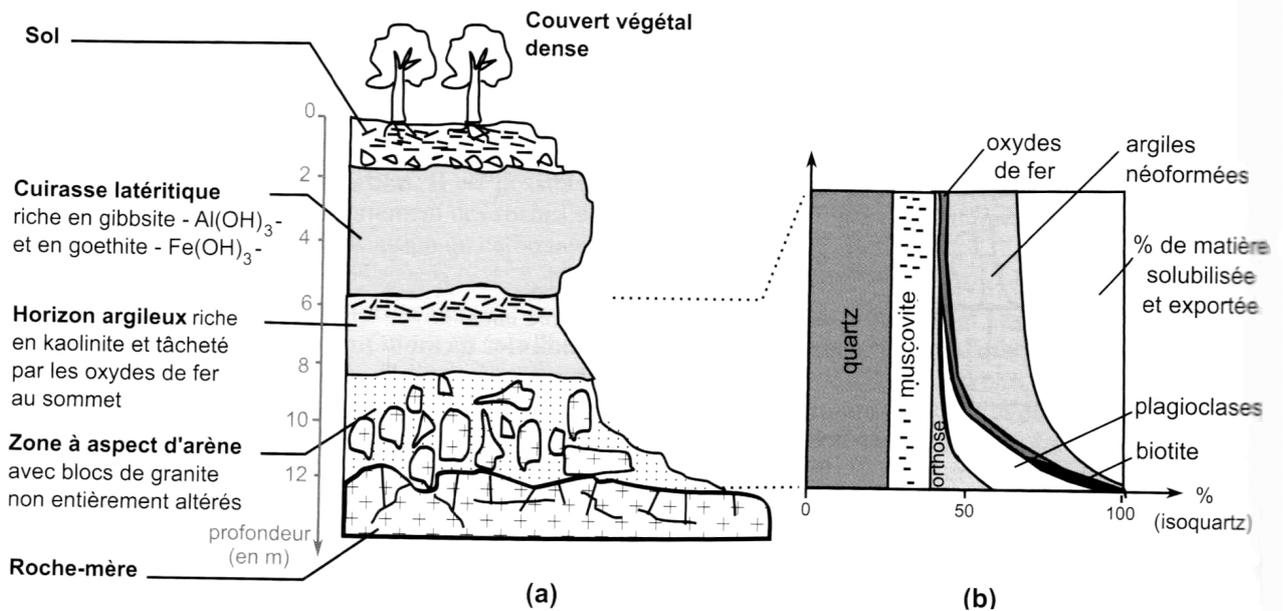


Figure 13 : Photographie d'une bauxite des Baux de Provence (Bouches-du-Rhône)
(in Segarra et al., Ellipses, à paraître)

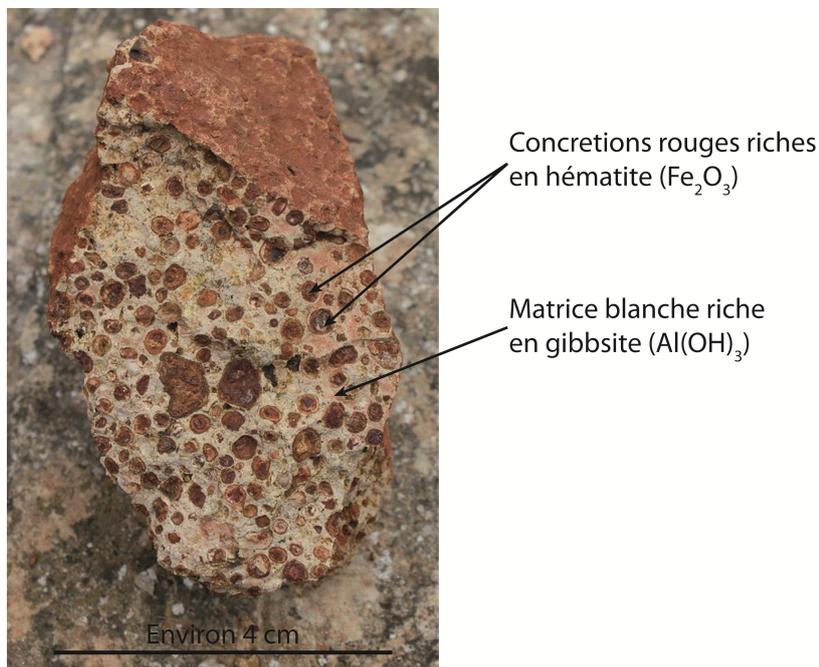


Figure 14 : Diagramme de Goldschmidt
(in Cojan et Renard, Dunod, 2006)

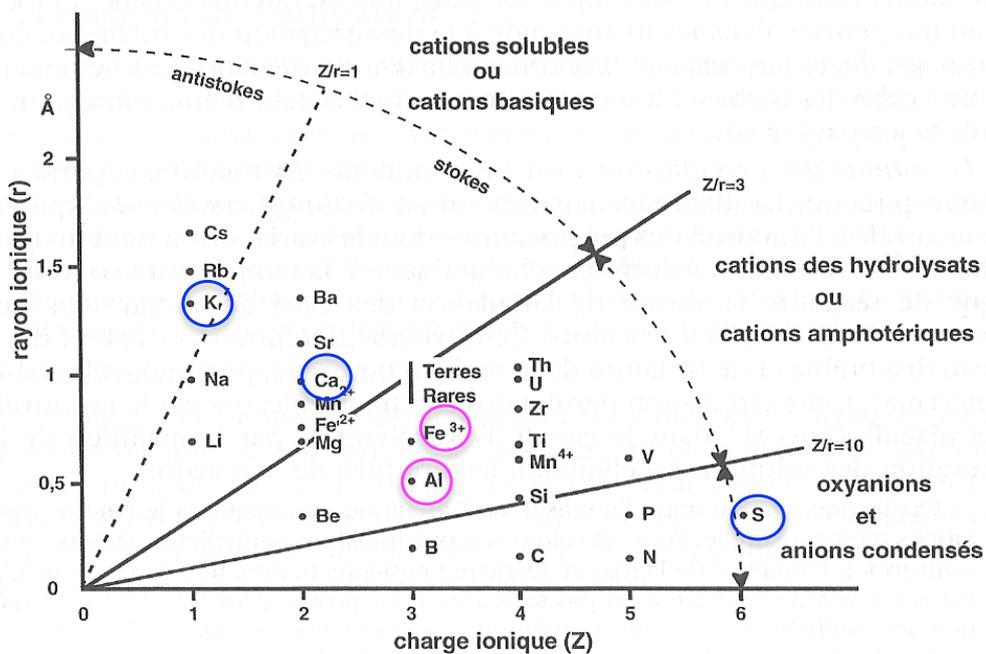


Diagramme de Goldschmidt : classification des éléments chimiques d'après leur potentiel ionique.

Document 15 : Comportements des ions dans l'eau : A SAVOIR par ♥!!!

L'eau est un solvant puissant car la molécule constitue un dipôle électrique capable de créer des liaisons avec les ions. Lorsqu'un minéral silicaté est brisé, les cations deviennent des accepteurs d'électrons et attirent les dipôles d'eau.

L'attraction des cations pour les dipôles H₂O est proportionnelle au **potentiel ionique Q** :

$$Q = Z / r$$

avec Z = charge électrique et r = rayon ionique

En fonction de leur potentiel ionique, on distingue **3 grandes catégories d'ions** :

➤ **les ions à potentiel ionique faible : $Z/r < 3$** : c'est le domaine des **cations solubles** . **On distingue deux classes : ceux dont $Z/r < 1$ et ceux dont $1 < Z/r < 3$.**

Ceux dont $1 < Z/r < 3$ sont entraînés avec les molécules d'eau et passent en solution : **[X, nH₂O]ⁿ⁺** avec n, valence de X

C'est notamment le cas de Na (principal constituant de l'eau de mer), de Ca et de Mg qui seront évacués vers les océans où ils (bio)précipiteront.

Ceux dont $Z/r < 1$: ce sont les ions antistoke. Leur taille étant trop grande par rapport à leur charge, ils ont peu d'attraction pour la molécule d'eau et **ne s'hydratent pas**.

➤ **les ions à potentiel ionique moyen : $3 < Z/r < 10$** : c'est le domaine des **hydrolysats** = domaine des **précipitations d'hydroxydes sous la forme X(OH)_n**. Les cations sont plus attractifs vis à vis de la molécule d'eau : un proton est arraché, l'ion OH⁻ se fixe au cation.

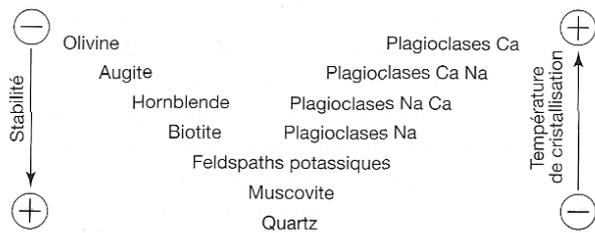
Exemple : Al(OH)₃, Fe(OH)₃ etc...

Les cations précipitent à l'état **d'hydroxydes insolubles** à l'origine des **gîtes métallifères** résiduels (bauxite pour l'aluminium par exemple)

➤ **les ions à potentiel ionique élevé : $Z/r > 10$** : c'est le domaine des **oxyanions**. Du fait de sont potentiel ionique élevé, l'ion exerce une forte attraction sur le pôle négatif de la molécule d'eau : il y a rupture du dipôle et libération de protons.

Exemple : les carbonates CaO₃²⁻, des sulfates SO₄²⁻, des phosphates PO₄³⁻. Ces oxyanions seront évacués par les eaux vers l'océan où ils se combineront avec les cations solubles (Ca²⁺) pour donner les roches sédimentaires classiques.

Figure 16 : stabilité des minéraux communs au cours de l'altération
(in Brahic et al., Vuibert 2006)



ORDRE DE STABILITÉ CROISSANTE DES MINÉRAUX LES PLUS COMMUNS PAR RAPPORT À L'ALTÉRATION, DANS LES CONDITIONS COMMUNES (appelé série de Bowen). Cette stabilité augmente depuis l'olivine et les plagioclases Ca jusqu'au quartz.



Granite à orthose altéré
www.etab.ac-caen.fr

A partir du document théorique, préciser dans quel ordre sont altérés les minéraux d'un granite à orthose. Vos prédictions sont elles en accord avec la photo ci-dessus (sachant que le granite d'origine contenait de la biotite et de la muscovite, contrairement au granite altéré) ?

.....

.....

.....

.....

.....

Figure 17.a : les argiles (à titre de document)

Les minéraux argileux sont des **phyllosilicates**. Ils sont constitués de silicium, d'aluminium, d'oxygène et / ou d'hydroxyle et de cations interfoliaires (types potassium).

L'agencement spatial de base de la silice est **tétraédrique (T)** alors que celui de l'aluminium est **octaédrique (O)**.

Comme ces agencements sont différents, ils forment des feuillets (d'où leur nom : phyllosilicates) d'organisation différente

L'association de ces feuillets élémentaires, leur composition, le type d'ions interfoliaires et la quantité d'hydratation caractérisent un minéral argileux. On distingue ainsi les argiles **TO et TOT**.

Les **argiles TO** ou **1/1**, comme par exemple la **kaolinite**, sont constituées d'un feuillet tétraédrique et d'un feuillet octaédrique, l'écart entre deux feuillets identiques est de 7 Å pour la kaolinite.

Les **argiles TOT** ou **2/1**, comme par exemple l'**illite** est un assemblage de deux feuillets tétraédriques pour un feuillet octaédrique (somme des T = 4 et somme des O = 2 d'où T/O = 2). Des substitutions (échanges) atomiques sont à l'origine de déficits de charges. Ainsi, de l'aluminium peut se substituer à du silicium dans les feuillets tétraédriques et des ions divalents (Fe, Mg) peuvent se substituer à l'aluminium dans le feuillet octaédrique. Ces déficits de charges sont compensés par les cations interfoliaires, ici le potassium. La distance entre deux feuillets identiques est ici de 10 angströms.

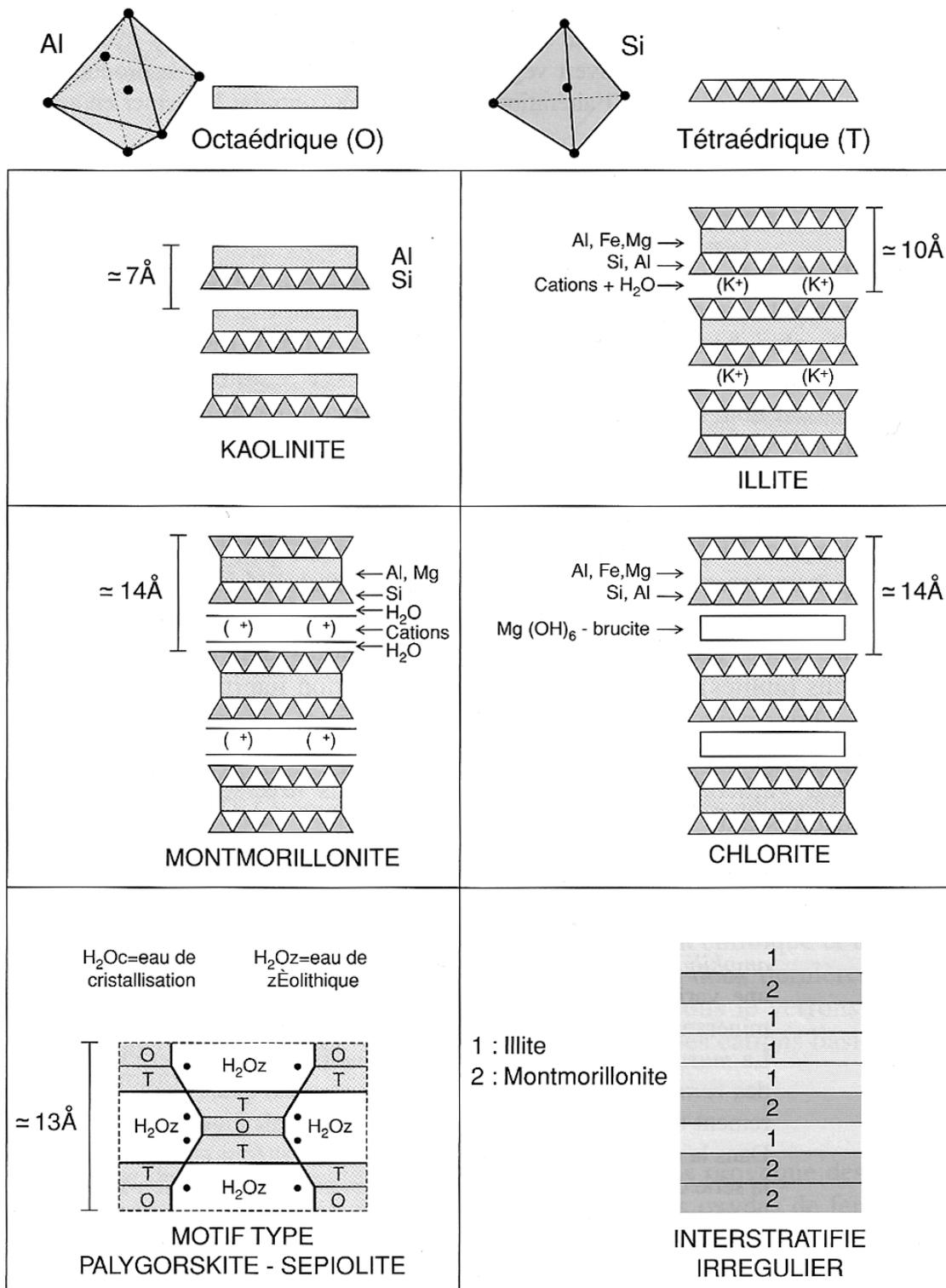
La **smectite** est également une argile TOT ou 2/1 mais la distance entre deux feuillets identiques est ici de 10 à 17,5 Å et la quantité d'eau interfoliaire est plus importante

Il existe aussi des **argiles interstratifiées**. Ce sont des empilements réguliers ou non des types précédents.

Les argiles peuvent avoir **trois origines** dans un sédiment. Elles peuvent être héritées des apports **détritiques**, **néoformées** (c'est-à-dire formée par cristallisation *in situ* lors de la diagenèse), ou **résiduelles** (c'est-à-dire provenant de l'altération chimique d'un autre silicate).

Figure 17.b : structure des argiles

(in Pomerol et al., Dunod, 2005)



Structure des principaux minéraux argileux.

**Figure 18 : Altération chimique des minéraux silicatés : exemple des feldspaths
A SAVOIR par ♥!!!**

Rappel de minéralogie

Les Fd sont des tectosilicates comme le quartz. L'orthose est formée par une charpente de tétraèdres à coeur de silice et d'alumine (1 Si sur 4 est substitué par Al), soutenue par des K⁺ qui compensent le déficit de charge dû au remplacement de Si⁴⁺ par Al³⁺. Chaque cation K⁺ placé à l'intérieur du réseau de tétraèdre n'est pas fortement retenu dans le treillis et sa disparition fera s'effondrer l'édifice.

Effet de l'eau sur le réseau cristallin :

Lorsqu'un film d'eau se dépose sur un cristal dont la charge est négative (O⁻ à valence non satisfaite en surface), les molécules d'eau orientent leur charge + vers le cristal. Or les ions H⁺ ont une taille suffisamment petite pour pénétrer dans les interstices du réseau cristallin : ce qui amène un excès de charge positive. L'équilibre est établi par l'expulsion de K⁺, qui reste facile tant que la concentration en K⁺ reste faible à l'extérieur (donc s'il y a un drainage). La réaction d'échange se poursuit avec les Si (suite à la déstabilisation des cristaux par perte des K⁺) et enfin avec les ions Al qui forment des précipités. Ainsi, la dégradation des silicates dépend du taux de remplacement de Si par Al. L'anorthite (2 Si sur 4 sont remplacés par Al) est plus fragile que l'orthose (1 Si sur 4 sont remplacés par Al).

Altération de l'orthose

On distingue 3 modes d'altération des feldspaths (orthose Si₃AlO₈K), déterminés par le climat : la **bisiallisation**, la **monosiallisation** et l'**allitisation**.

➤ la **bisiallisation** : en climat tempéré, un feldspath subit une dégradation partielle avec lessivage de la plupart des cations extérieurs aux tétraèdres et de 60% des ions Si. Le réseau en charpente des feldspaths (tectosilicates) se transforme en un réseau à tétraèdres en feuillets (phyllosilicates) caractéristique des argiles. La composition initiale AlSi₃ (+ O + cations extérieurs) devient AlSi₂ et correspond à une **argile 2/1** de type **illite**. Sa maille est de type **TOT** (deux feuillets de tétraèdres (à centre Si) séparés par un feuillet d'octaèdres (à centre Al)). C'est une **altération ménagée**.



orthose + eau → illite + silicium + potassium (en solution)

➤ la **monosiallisation = kaolinisation** : un **climat plus humide et plus chaud** provoque une altération plus intense. Tous les cations extérieurs aux tétraèdres (K⁺) et 2/3 des ions Si sont lessivés. La composition initiale AlSi₃ devient AlSi et correspond à une **argile 1/1** de type **kaolinite**. Sa maille comporte un feuillet de tétraèdres (à centre Si) et un feuillet d'octaèdres (à centre Al). C'est une **altération moyenne**.



orthose + eau → kaolinite + ions en solution

➤ l'**allitisation = latérisation**: un climat très humide et aux températures élevées provoque une destruction totale du feldspath par lessivage totale du silicium. **Tous les cations** extérieurs aux tétraèdres et **tous les Si sont lessivés**. Il ne reste que les **cations insolubles Al** qui précipitent sous forme d'hydroxyde (**gibbsite**) dans laquelle le rapport Si/Al est nul. C'est une **altération forte**.



orthose + eau → gibbsite + solution d'ions

Figure 19.a : influence de la latitude sur l'altération des sols
(in Segarra et al., Ellipses, à paraître)

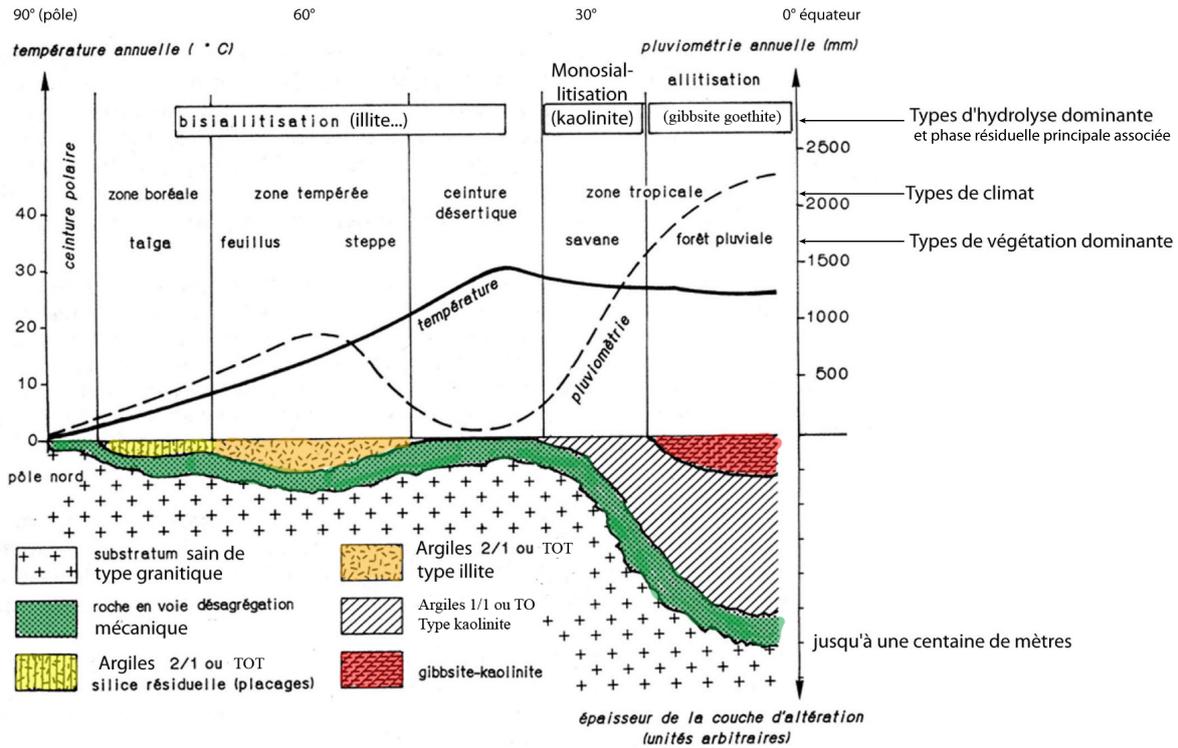


Figure 19.b : répartition géographique des différents sols
(in Cojan et Renard, Dunod, 2006)

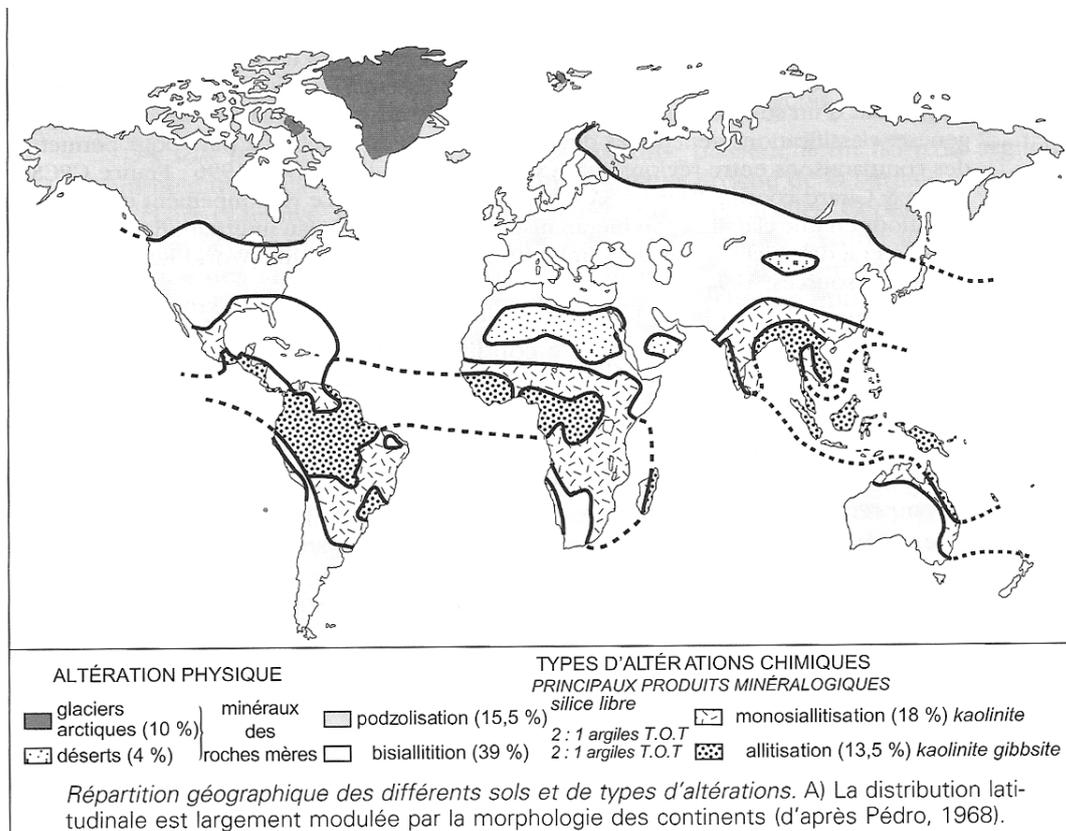
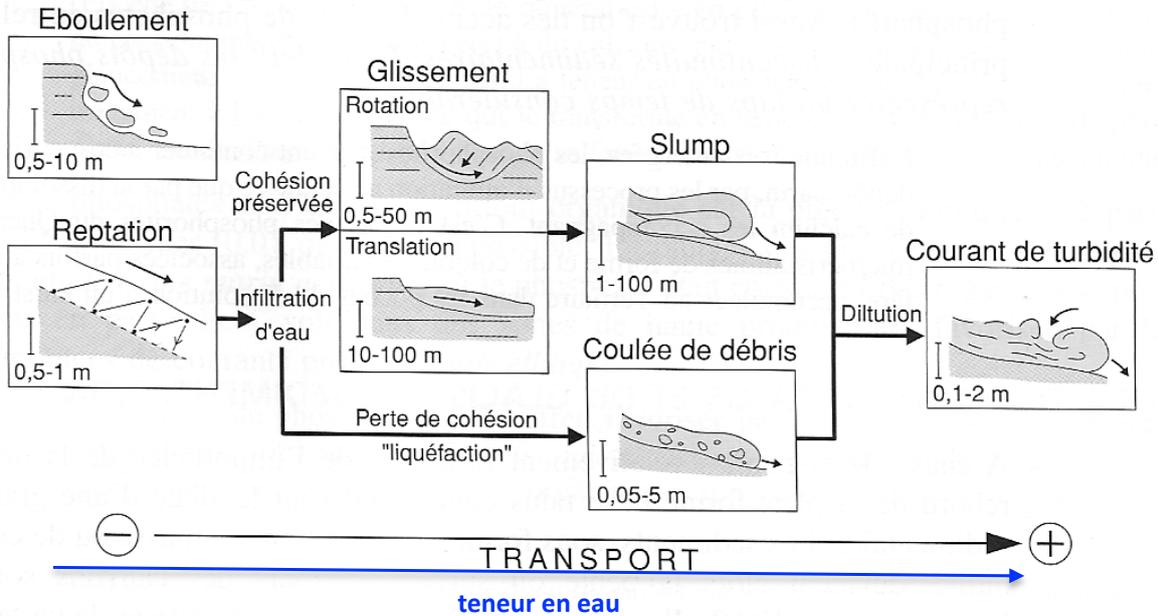


Figure 20 : Processus gravitaires (in Cojan et Renard)

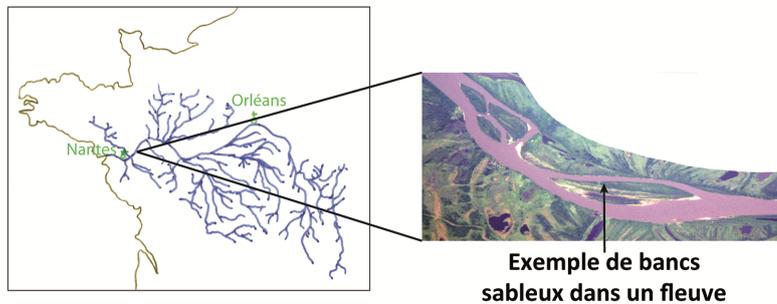


Les différents processus gravitaires.

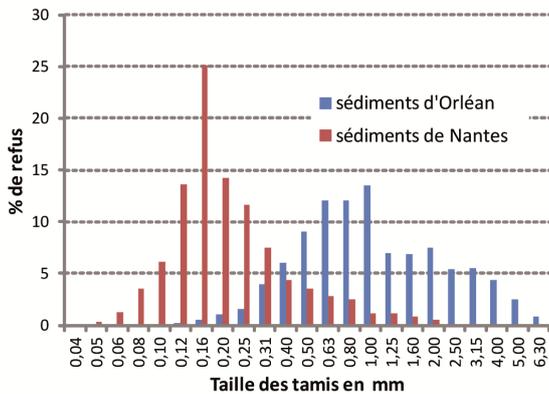
Figure 22 : Représentation des différentes classes granulométriques de deux sables de Loire, échantillonnés vers Orléans et vers Nantes (in Segarra et al., Ellipses, à paraître)

Le pourcentage de refus correspond à la quantité de sédiment bloqué par les mailles d'un tamis.

Localisation du bassin versant de la Loire



Histogrammes du pourcentage de refus par tamis pour deux sables de la Loire



Courbes cumulatives des tailles de particules pour deux sables de Loire

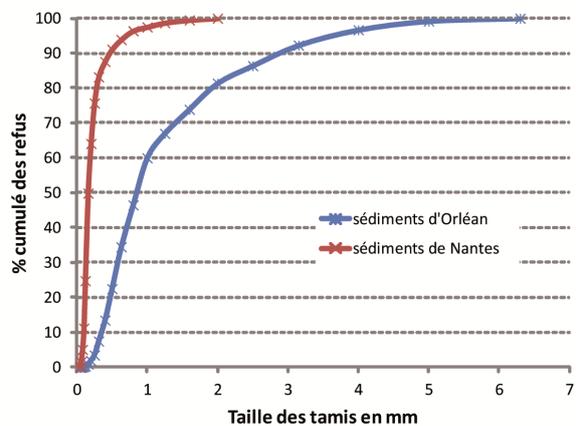


Figure 21 : influence de la lithologie du bassin versant sur la charge ionique des rivières
(d'après Sujet TB AGRO 2014)

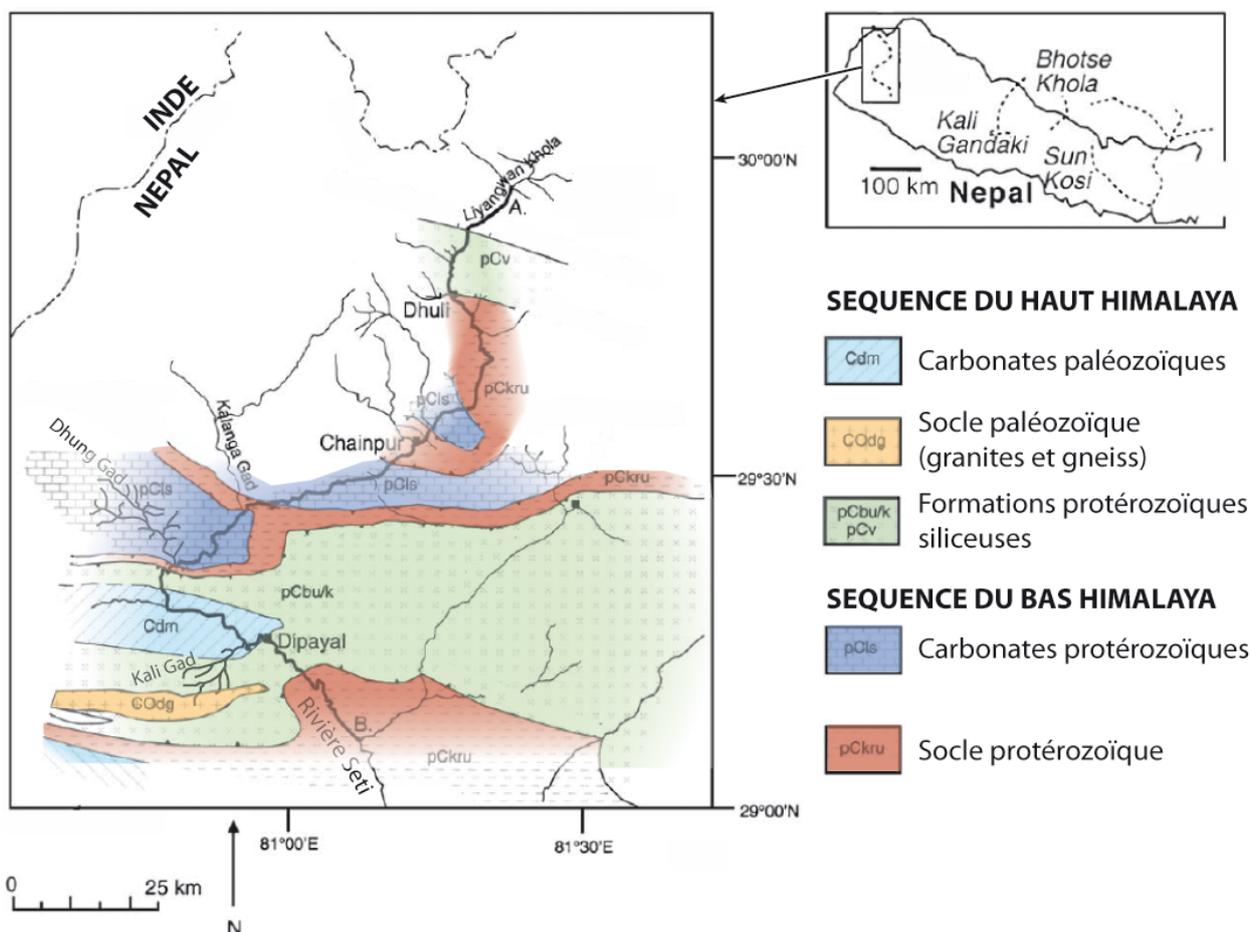
On étudie deux affluents d'une rivière himalayenne, la rivière Sėti, qui prennent leur source dans deux régions de l'Himalaya.

Paramètres chimiques des deux affluents

Les concentrations ioniques sont données en $\mu\text{mol/L}$.

	Ca^{2+}	HCO_3^-	Si^{4+}
Dhung Gad	906	2849	152
Kali Gad	123	525	377

Localisation des deux affluents sur la carte géologique simplifiée de la région



**Figure 23 : Diagramme de Hjulström
A SAVOIR EXPLOITER!!!**

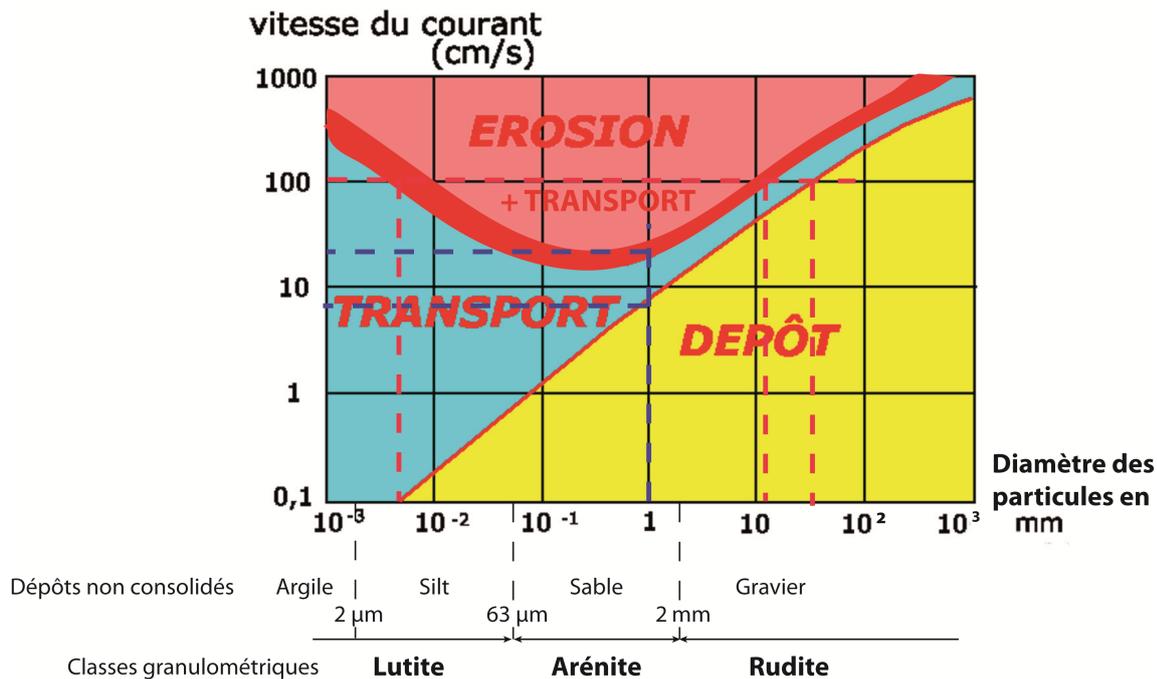


Figure 24 : usure d'un grain de quartz
(in Segarra et al., Ellipses, à paraître)

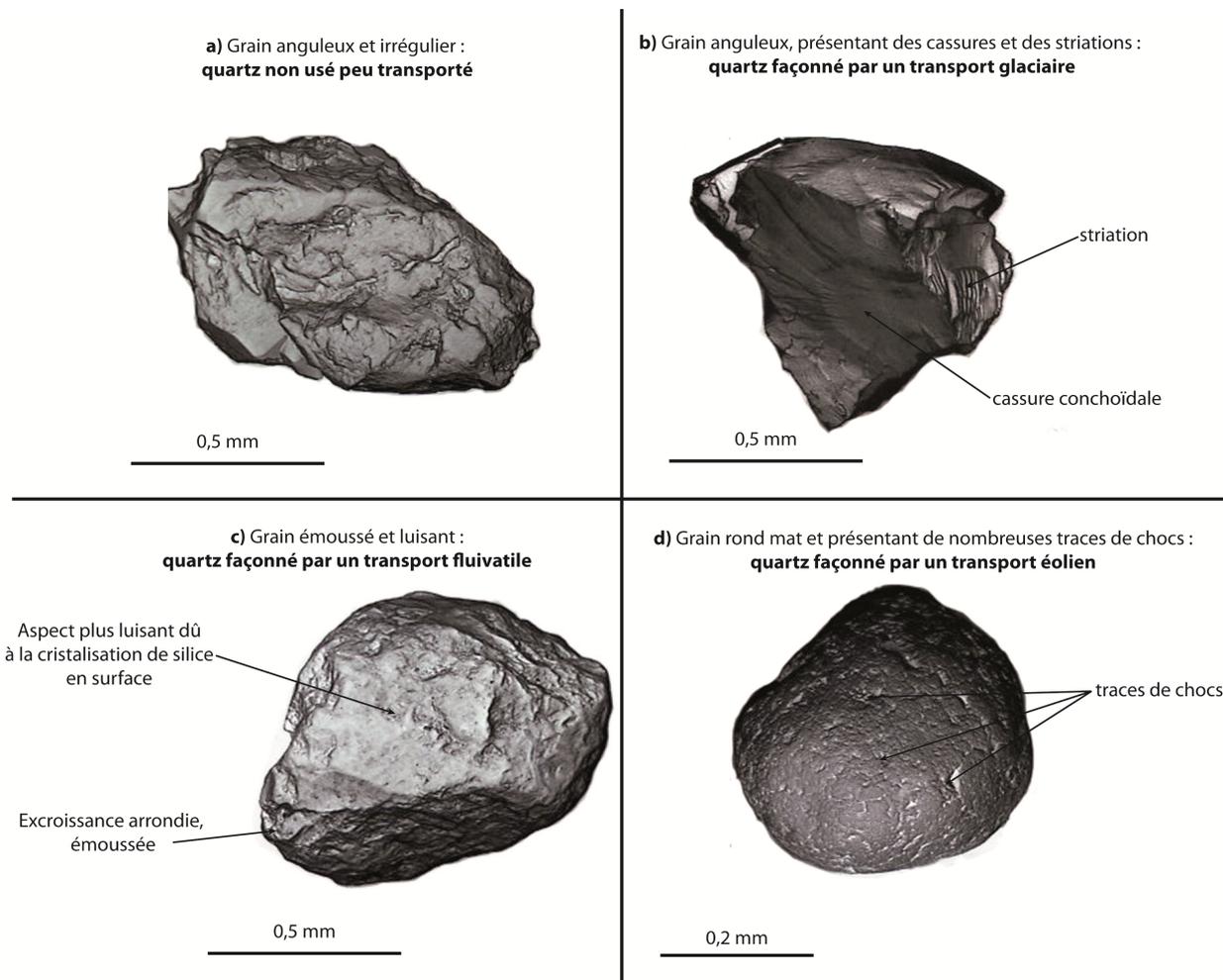


Figure 25 : Bilan mondial de l'érosion et du transport particulaire
(in Segarra et al., Ellipses, à paraître)

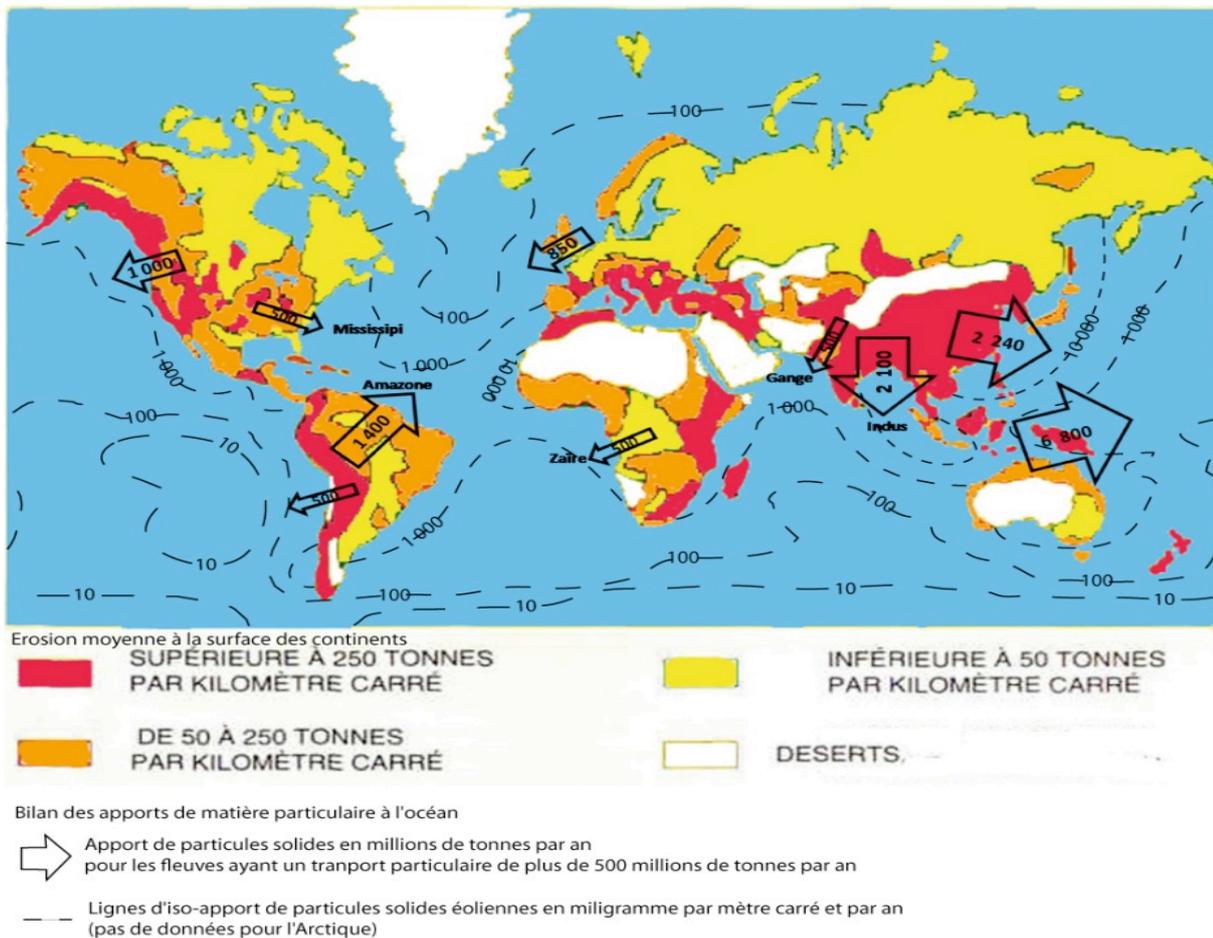


Figure 26 : Relation entre érosion mécanique et érosion chimique pour différents substratums
(in Segarra et al., Ellipses, à paraître)

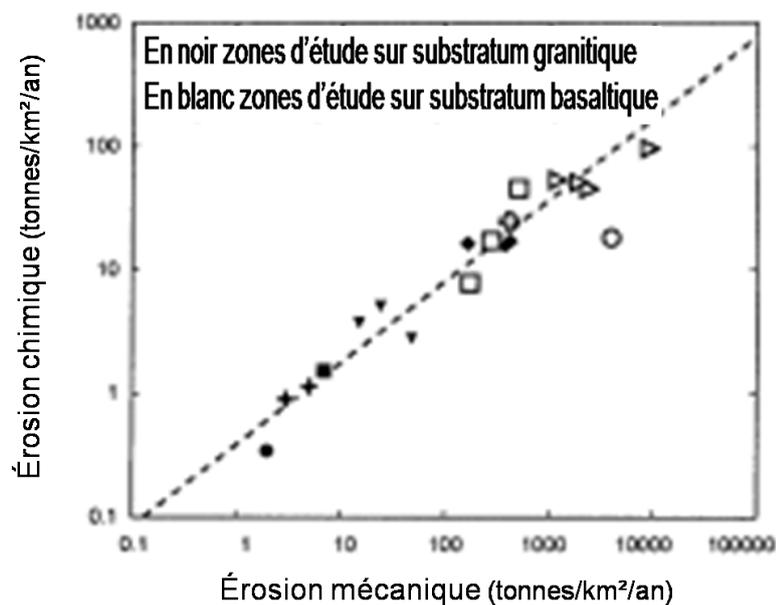


Figure 27 : Effets anthropiques sur les bilans de transport de matière
Exemple mondial : le barrage des Trois Gorges en Chine

(in Segarra et al., Ellipses, à paraître)

Ce barrage est le plus grand du monde : construit sur le fleuve Bleu (Yangtze), il fonctionne depuis 2003

Un réseau de stations le long du Yangtze permet de suivre l'évolution du débit d'eau annuel ainsi que la quantité de particules transportées (débit solide). Ces mesures sont présentées (graphiques de la **figure a**, encadrés bleus) pour deux stations : une proche du barrage des trois Gorges (Yichang, **figure b**) et l'autre proche de l'embouchure du fleuve (Datong, **figure c**).

Le débit d'eau est en moyenne plus important à Datong qu'à Yichang car il existe des affluents qui augmentent ce débit entre les deux stations (**figure a**). Le débit solide est en moyenne plus important à Yichang qu'à Datong. Cela s'explique d'une part par le fait que les particules présentes dans le fleuve Bleu sédimentent entre les deux stations et que d'autre part par le fait que les affluents apportent peu de particules détritiques entre ces deux stations.

L'étude plus précise des variations du débit solide à Datong montre quatre grandes périodes alors que le débit d'eau est relativement constant sur les 57 ans de l'étude.

La première de 1950 à 1968 correspond aux valeurs qui serviront de référence et montrent les variations naturelles. Pour cette période, les variations de débit solide suivent les variations du débit d'eau .

De 1969 à 1985, pour la station de Datong, une baisse moyenne de 10 % du débit solide est visible par rapport à la période précédente. Cette baisse ne se retrouve pas, plus en amont, à la station Yichang. Il faut donc expliquer cette baisse par une cause affectant le réseau hydrographique entre les deux stations. Cette diminution est imputable à l'anthropisation du Hanjiang et la construction d'un barrage à Danjiangkou (**figure a** encadré noir).

De 1986 à 2002, pour les deux stations, une baisse moyenne de 20 % du débit solide est visible par rapport à la période précédente. Il faut donc expliquer cette baisse par une cause affectant le réseau hydrographique en amont des deux stations. Cette diminution est imputable à l'anthropisation du Jianligiang (**figure a** encadré vert) avec la construction d'un barrage en 1986.

Depuis 2003 le fonctionnement du barrage des Trois Gorges, sur les deux stations d'étude, a entraîné une diminution d'environ 70 % du débit solide. Le barrage piège donc une quantité importante de sédiments mais laisse passer l'eau vers l'aval. Les apports à l'océan du Yangtze étaient en moyenne, avant anthropisation, de 500 millions de tonnes de particules par an. Une baisse de 70 % qui n'est pas sans conséquence. En effet, la stabilité de la côte dans cette région résulte d'un équilibre entre les apports de sédiments par le fleuve et l'érosion causée, surtout en hiver, par les courants de tempêtes qui entraîne les sédiments vers la mer de Chine. La diminution de ces apports risque d'entraîner une érosion de la côte ce qui menacerait Shanghai, agglomération d'environ 23 millions de personnes.

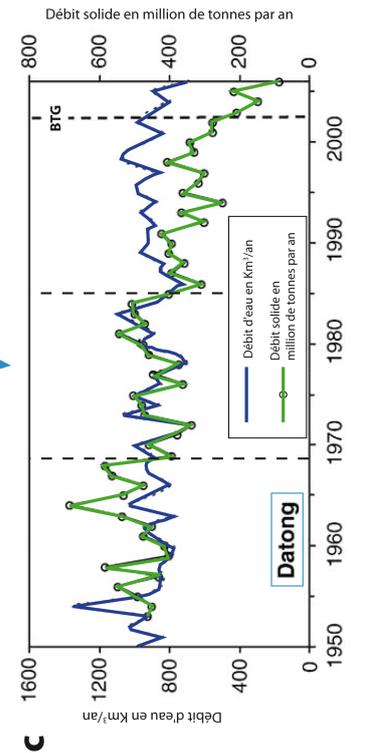
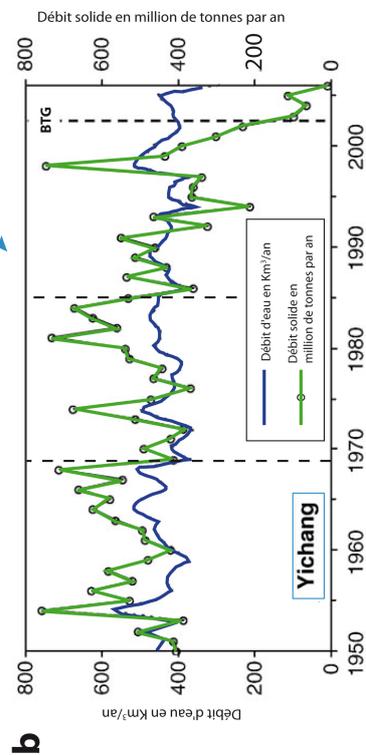
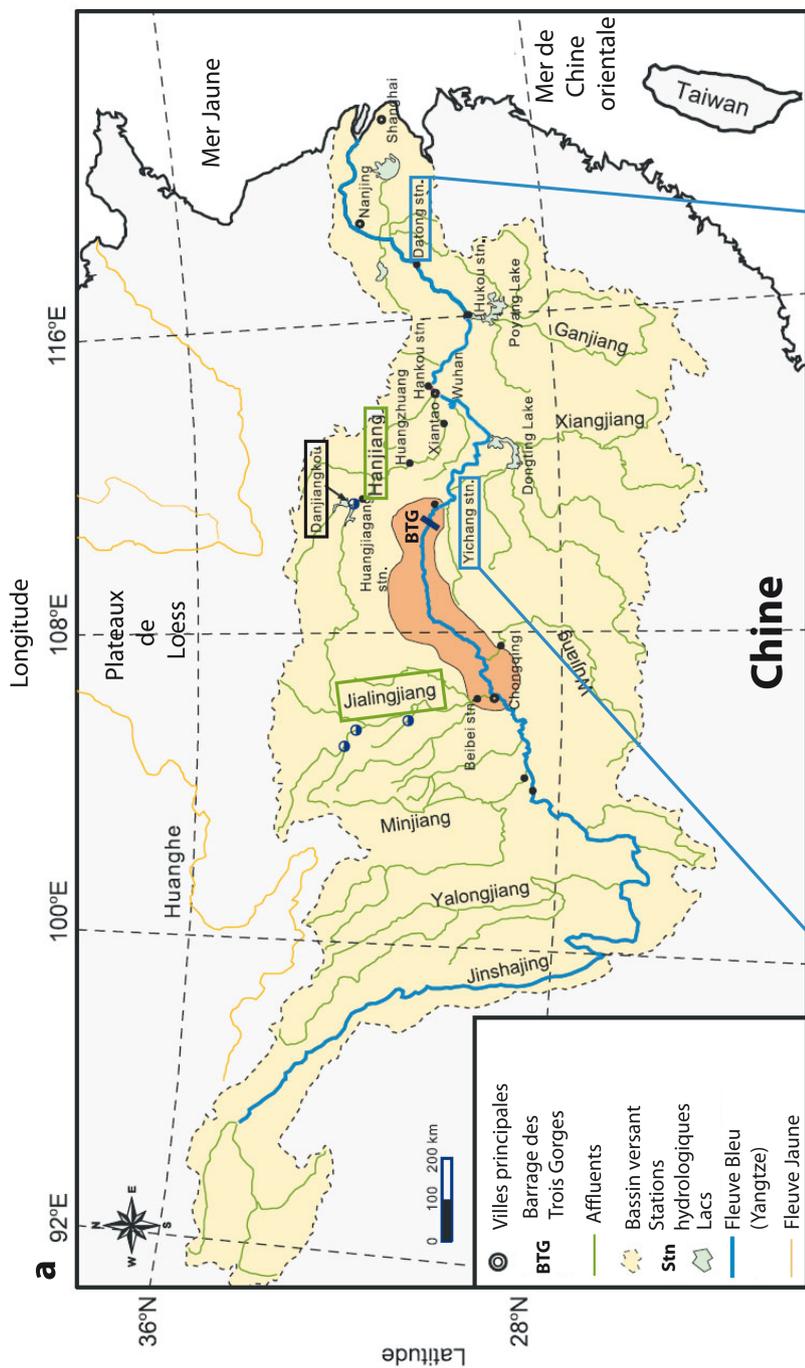


Figure 28 : Effets anthropiques sur les bilans de transport de matière**Exemple français : la baie du Mont Saint Michel**

(in Segarra et al., Ellipses, à paraître)

Le Mont Saint-Michel et sa baie sont l'un des sites touristiques les plus visités de la côte ouest de la France avec, chaque année, près de 2,5 millions de visiteurs.

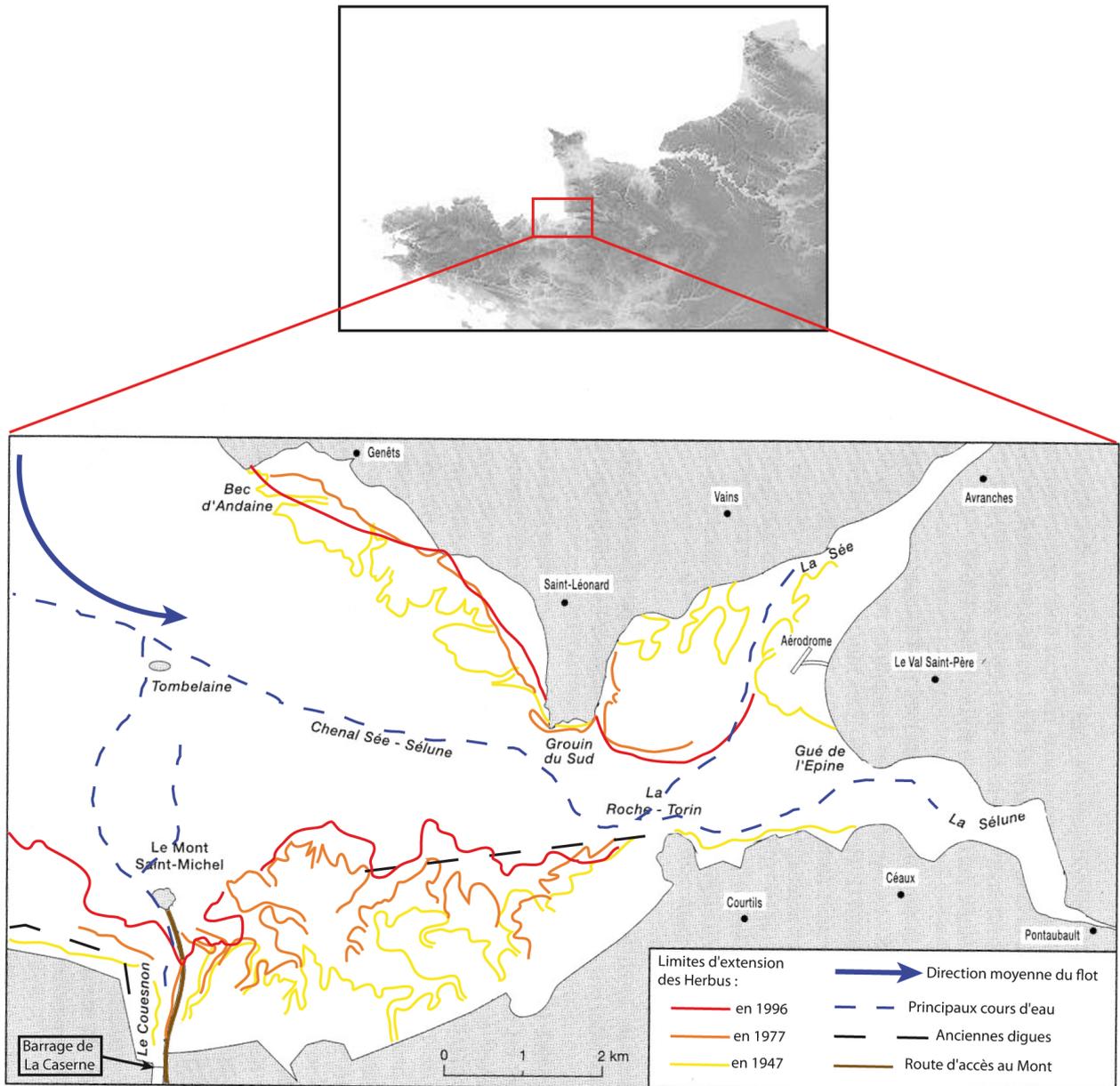
Mais l'insularité du Mont est menacée. La figure ci-après présente l'évolution des **herbus**, encore appelés prés salés ou schorre, dans la baie. Les herbus sont des étendues présentant une végétation halophile (qui aime le sel) périodiquement inondées par les eaux marines lors des grandes marées. Ce domaine s'oppose à la **slikke** qui est immergée à chaque marée montante. Dans le sud de la baie, les herbus se développent au dépend de la slikke, depuis cinquante ans. Le Mont Saint-Michel est donc en cours de **continentalisation**.

L'hydrodynamisme de la baie est dictée par les courants de marée et principalement le courant de flot (marée montante) qui apporte des sédiments dans la baie avec un granoclassement inverse (les particules les plus grosses sont plus au large et en se rapprochant de la côte la granulométrie moyenne diminue). La baie tend donc naturellement à se combler.

L'aménagement **anthropique** de la baie depuis au moins la fin du XIX^{ème} siècle a favorisé le processus. Des **digues** ont été créés pour faciliter la formation des herbus, utiles entre autre pour l'élevage. La construction, en 1884, de la **route** d'accès au Mont a bloqué les courants au Sud favorisant la sédimentation. Enfin, l'utilisation pour l'exploitation agricole et l'alimentation urbaine, des eaux de la Sée, de la Sélune et du Couesnon sur lequel a été construit un **barrage** à la Caserne en 1969, diminue le potentiel érosif de ces cours d'eau favorisant la sédimentation dans la baie.

L'ensablement de la baie a donc des causes naturelles (hydrodynamisme dominé par le flot) et anthropiques (diminution du pouvoir érosif des fleuves par construction de barrage et de digues).

Devant l'enjeu, les pouvoirs publics ont décidé de lancer des travaux pour désensabler la baie depuis 2005. Le projet prévoit la suppression de la digue-route et du parking pour rétablir les courants au Sud du Mont, la destruction des anciennes digues qui stabilisent les herbus et la création d'un nouveau barrage sur le Couesnon (fin des travaux prévus en 2015). Ce barrage stockera de l'eau de mer à marée haute et la relâchera à marée basse. Le courant créé à marée basse devrait chasser une partie des sédiments vers le large. Le coût total des travaux est estimé à 164 millions d'euros.



Evolution des herbus dans la baie du Mont Saint-Michel

Localisation de la Baie du Mont Saint-Michel sur la partie nord ouest de la carte topographique de France (en haut).

Evolution de l'extension des herbus dans la Baie du Mont Saint-Michel entre 1947 et 1996 (en bas). (Modifié d'après la notice de la carte du Mont Saint-Michel au 50 000ème)

