

Formations superficielles

Introduction

Les formations superficielles correspondent à la partie supérieure de la lithosphère et couvrent la majeure partie des terres émergées. L'expression "formations superficielles" est utilisée par les géomorphologues et constitue un marqueur essentiel de la géomorphologie dynamique.

Les matériaux de la surface terrestre sont particulièrement différenciés et évoluent relativement vite à l'échelle des temps géologiques. Ils intéressent le monde agricole et forestier comme support de formations pédologiques - les sols - et tout projet d'aménagement (construction, urbanisation, infrastructures, etc...). La genèse de ces formations relève de phénomènes de fracturation des roches et de météorisation comme les altérations, arénisation, désagrégation, cryogenèse, etc. associés aux phénomènes internes du globe comme la tectonique (séismes et volcanismes). Les produits de la météorisation sont des altérites, des clastites, des séismites, des volcanites, des organites, etc...

Géologie de sub-surface

L'altération

Introduction

Au cours de l'altération, deux types de mécanismes entrent en jeu, dont le plus souvent les effets s'additionnent :

- **Les processus physiques ou mécaniques** avec désagrégation des roches et enlèvement des débris par un fluide, d'où la distinction entre les érosions éoliennes, fluviales, glaciaires, marines... Les actions purement mécaniques produisent des fragments qui sont à l'origine des roches détritiques.

- **Les processus chimiques** où l'eau joue un rôle prépondérant. Il s'agit d'altération et de dissolution par les eaux plus ou moins chargées en dioxyde de carbone. Cela donne des solutions de lessivage qui sont les sources de minéraux néoformés des roches d'origine chimique.

1.1. Le rôle de l'eau désagrégation mécanique des roches

Les variations de température entraînent la dilatation ou la contraction des roches soumises à des variations de volumes incessants, une roche se fissure puis s'éclate. L'eau qui pénètre dans les fissures puis gèle avec augmentation de volume ajoute son effet : les cristaux de glace s'accroissent perpendiculairement à la surface de la fente et augmente son ouverture. L'eau qui gèle dans une fissure exerce une pression de 14 g/cm². La roche finit par s'éclater sous l'action du gel : c'est la **cryofracturation (ou cryoclastie)**.

1.2. L'eau, un agent chimique d'altération

Par ses propriétés et son abondance relative, l'eau se trouve à la base de toute altération des roches. Les molécules d'eau sont chargées de gaz carbonique atmosphérique, elle se comporte comme un acide faible par les ions H⁺ libres qu'elle renferme.

Les réactions mettant en jeu la molécule d'eau sont de différents types et ont lieu essentiellement en climat humide. Les éléments solubles qui en résultent sont lessivés et les parties insolubles restent sur place, se recombinaient pour former de nouveaux minéraux, principalement des argiles. Ces réactions sont :

La dissolution

La dissolution est d'autant plus forte que la solubilité des minéraux est élevée, les plus altérables étant les minéraux des roches salines (tel que sel gemme, potasse, gypse...).

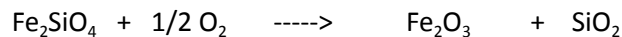
- Dissolution dans du gypse

Le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) est une roche évaporite, relativement soluble dans l'eau. Dans les zones montagneuses, sa dissolution crée des reliefs particuliers sous forme "d'entonnoirs". L'eau, la neige s'accumulent dans de petites dépressions où la dissolution s'opère, donnant des paysages caractéristiques.

Les oxydations / réductions

Les oxydations concernent surtout le fer qui passe de l'état ferreux à l'état ferrique.

Exemple: pour un minéral d'olivine : olivine + oxygène $\rightarrow$ oxyde ferrique + silice.



Les réductions sont plus rares : elles se déroulent dans les milieux hydromorphes (saturés d'eau de façon permanente ou périodique) et produisent en particulier du fer ferrique soluble.

L'hydratation

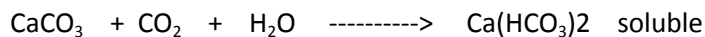
Il s'agit de l'incorporation de molécules d'eau à certains minéraux peu hydratés. Elle produit un gonflement du minéral et donc favorise la destruction de la roche. C'est le cas de la chloritisation ou de la transformation des ferro-magnésiens (pyroxènes, amphiboles) en serpentine, chlorite, épidote.

- Plagioclase + Pyroxène + Eau $\rightarrow$ Amphibole (Hornblende verte)

- Plagioclase + Hornblende + Eau $\rightarrow$ Chlorite + Actinote

La décarbonatation

Elle produit la solubilisation des calcaires et des dolomies sous l'action du CO_2 dissous dans l'eau.



Exemple de paysages particuliers, associés aux régions calcaires, c'est le cas, des reliefs karstiques.

Les dolines sont des reliefs de surface du modelé karstique. Ce sont des dépressions circulaires dont le fond est occupé par de la *terra rossa* (résidu argileux rouge de la dissolution des calcaires).

L'hydrolyse

Elle est définie comme étant la destruction d'un édifice moléculaire complexe en édifices moléculaires plus simples sous l'influence de l'eau. Les hydrolyses constituent les principales réactions d'altération.

Elles peuvent être totales lorsque le minéral est détruit en plus petits composés possibles (hydroxydes, ions) ou partielles lorsque la dégradation est incomplète et donne directement des composés argileux.

Le bilan général d'une réaction d'hydrolyse peut s'écrire:

Minéral primaire + Eau -----> Minéral secondaire + Solution de lessivage.

1.3. Les facteurs contrôlant l'altération

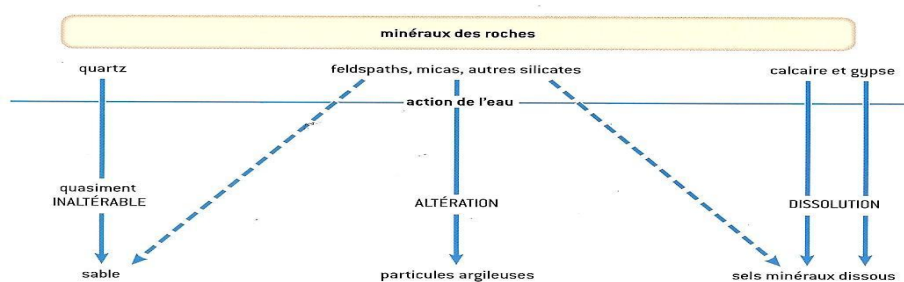
La résistance des minéraux à l'altération

L'énergie de liaison entre les différents atomes est variable selon les espèces concernées. Par exemple, le K^+ est faiblement lié à l'oxygène, le Fe^{2+} et le Mg^{2+} le sont moyennement, le Si^{4+} établit au contraire des liaisons très fortes. On comprend donc pourquoi le quartz (tectosilicate qui ne comprend que des liaisons fortes entre le Si et l'O) résiste mieux à l'altération et, au contraire, l'olivine (qui contient les cations les moins liés (Mg^{2+} et Fe^{2+}) a un réseau cristallin beaucoup fragile.

L'ordre de résistance des minéraux à l'altération :

Olivine	Plagioclases Ca
Augite	Plagioclases Ca-Na
Hornblende	Plagioclases Ca-Na
Biotite	Plagioclases Na
Feldspaths K	
Muscovite	
Très résistants	Quartz (zircon, tourmaline...)

- Bilan simplifié de l'altération des minéraux -



-L'olivine, et les péridots en général, sont les plus fragiles et s'altèrent fréquemment en *serpentine* (silicate hydraté de Mg et Fe).

-Les pyroxènes (ex : l'augite) donne une *amphibole verte*, l'ouralite.

-Les amphiboles (ex : la hornblende) se transforment en minéraux fibreux dont l'*amiante*

- La biotite prend un aspect mordoré (bronzé) puis donne plusieurs minéraux d'altération dont les *chlorites*, silicate d'Al et Mg hydraté, de couleur verte.

-La muscovite est moins altérable mais, par hydrolyse, donne des *vermiculites* ou hydromicas.

-Le quartz est quasi inaltérable, cependant il peut être légèrement soluble dans l'eau, surtout si elle est alcaline.

Les facteurs externes contrôlant l'hydrolyse

Ce sont avant tout les paramètres qui permettent de définir le climat.

- La disponibilité de l'eau. De ce fait, les réactions d'hydrolyse, par exemple, seront moindres sous climat sec.

- La température dont la valeur dirige la vitesse des réactions ainsi que la possibilité de dissolution des ions dans l'eau. Ainsi, les réactions d'hydrolyse seront intenses et rapides sous climat tropical.

- Le pH déterminé en particulier par la présence ou non d'acides organiques.

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

Altération et climat

-**Climat froid** : L'altération mécanique par le gel joue le rôle majeur, la décomposition chimique est faible.

-**Climat tempéré** : Les facteurs d'altération sont très nombreux mais leur puissance assez faible. Le gel n'intervient que l'hiver et joue un rôle important en altitude.

L'altération chimique joue un rôle important, surtout à l'intérieur du sol. En effet, on peut constater que les roches en relief et en contact avec l'atmosphère restent très peu altérées. Mais cette forte résistance des roches à l'eau de pluie cesse si elles sont à l'état fractionné.

- **Climat chaud et sec** : La fragmentation mécanique est faible mais la décomposition chimique est active après les rares pluies et entraîne une forte désagrégation des roches subissant des variations importantes de température et d'humidité. Au contraire du climat tempéré, ce sont les roches à l'interface lithosphère - atmosphère qui s'altèrent le plus vite.

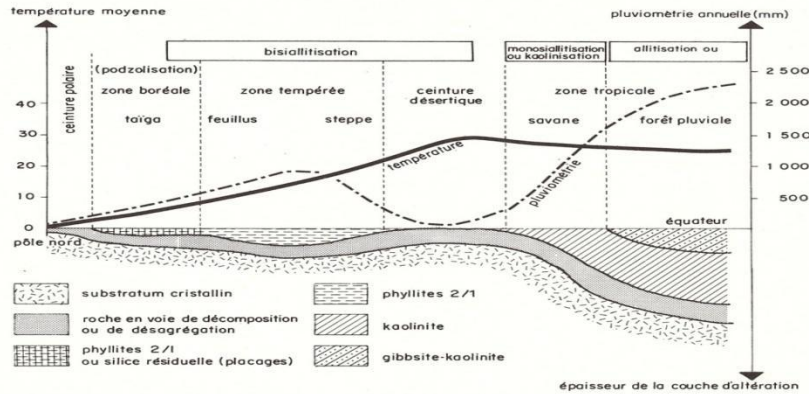
En domaine désertique, l'érosion est essentiellement éolienne.

- **Climat chaud et humide** : La désagrégation mécanique est très faible mais la décomposition chimique devient extrêmement active. Grâce à la température constamment élevée, la présence d'ions H^+ libres dans les eaux du sous-sol est 6 fois plus élevée que sous les latitudes.

L'épaisseur de la zone d'altération atteint son maximum dans de telles conditions climatiques. Elle peut atteindre plus de 100 m. On assiste alors à un départ quasi total de la

silice exportée dans les eaux de lessivage avec les alcalis et accumulation, sur place, d'hydrates d'alumine (ex : gibbsite $[\text{Al}(\text{OH})_3]$, boehmite $[\text{Al OH}]$). Ces derniers peuvent se concentrer en concrétion ou constituer une cuirasse latéritique.

On peut résumer l'influence du climat sur les produits de l'altération par le schéma suivant :



1.4. La formation des sols

Un sol est une couche d'altération recouvrant une roche. Il est formé d'une fraction minérale et de matière organique. Un sol prend naissance à partir de la roche puis il évolue sous l'influence des facteurs du milieu, essentiellement le climat et la végétation. L'originalité des sols résulte donc de l'association intime qui existe entre ses constituants minéraux et ses constituants organiques d'origine végétale et animale.

Qu'est-ce qu'un sol ?

Le sol apparaît, s'approfondit et se différencie en strates superposées, les horizons, qui forment le profil pédologique. Sur une coupe de sol, ces horizons se distinguent essentiellement les uns des autres par des critères :

- de couleur qui traduisent des variations en quantité et en nature des constituants organiques et des oxy-hydroxydes de fer.
- de texture qui traduisent des variations de composition granulométrique.
- de structure qui traduisent des variations de mode d'assemblage des constituants minéraux et organiques.

Les principaux horizons sont les suivants :

- Horizon A : horizon de surface à matière organique (débris de végétaux)
- Horizons B : horizons intermédiaires apparaissant dans les sols évolués. Selon le type de formation et la composition, ces horizons B sont formés par l'altération de la roche sous-jacente et par les mouvements de matières depuis A.
- Horizon C : roche peu altérée.

● La fraction minérale du sol :

La destruction des roches se fait, par :

- désagrégation mécanique qui donne des fragments,
- altération chimique qui produit :
 - des ions solubles (cations, acide silicique...)
 - des gels colloïdaux par hydratation et polymérisation des cations (Fer, Aluminium) avec la matière organique (complexolyse) et des argiles.

L'ensemble constitue le complexe d'altération. Cette altération demande de l'eau et une température suffisante, son intensité est donc fonction du climat.

Outre le climat, la nature de la roche-mère intervient sur les caractères de cette fraction minérale. De même, la topographie intervient puisque qu'elle conditionne la qualité du drainage.

• La fraction organique du sol :

La végétation fournit des débris végétaux qui constituent l'horizon A_0 . Sa décomposition se fait sous l'action des microorganismes et produit l'humus et les composés minéraux de l'horizon A1. Les matières organiques sont d'abord dépolymérisées et les monomères résultant peuvent suivre deux voies :

- la minéralisation qui produit des composés minéraux tels que le CO_2 , le NH_3 , les nitrates, les carbonates...
- l'humification qui est une repolymérisation en composés organiques amorphes qui se lient aux argiles (complexe argilo-humique).

Le type d'humus produit dépend des caractères de la végétation et du climat.

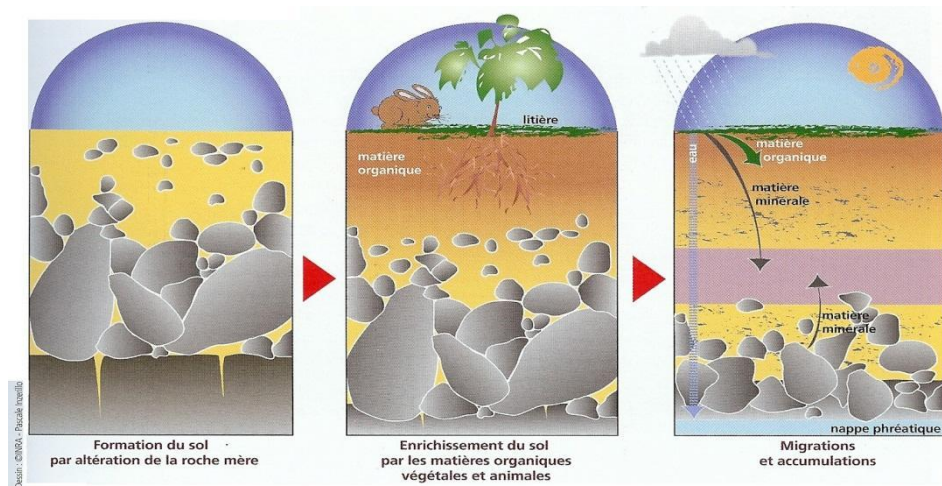
La vitesse d'humification est quant à elle dépendante de l'activité biologique (conditionnée par la température) :

- en milieu biologiquement peu actif : décomposition lente de la litière, l'horizon A_0 est épais, brun noir, fibreux et acide (*mor* ou terre de bruyère);
- en milieu plus actif : horizon A_0 moins épais et constitue un *moder*;
- en milieu très actif : décomposition rapide, l'horizon A_0 disparaît et l'humus est rapidement intégré dans la fraction minérale en complexes organo-minéraux formant un horizon A1 (*mull*).

Comment se forme un sol ?

Il est exceptionnel que les roches affleurent à la surface sans être transformées : certains constituants se fragmentent, d'autres se dissolvent. Cette altération conduit à la formation de minéraux secondaires. Les roches sont alors encore reconnaissables. C'est le stade de l'altération et par conséquent de la formation de l'altérite qui précède la formation du sol.

Lorsque l'altération des minéraux se poursuit, sous l'effet du climat et de l'activité biologique, le mode d'assemblage des constituants évolue. Les structures de la roche de départ ne sont plus reconnaissables : c'est à ce stade que le sol se forme (pédogenèse).



En climat tempéré, lorsqu'une roche affleure, elle est donc progressivement altérée et colonisée par la végétation (végétaux inférieurs, plantes herbacées puis arbres). Il s'établit d'abord un horizon d'humus sur la roche altérée (profil à horizons A et C - sol jeune), puis un horizon de type B (profil ABC). La profondeur augmente et le profil pédologique devient de plus en plus évolué jusqu'à atteindre un état d'équilibre avec le climat et la végétation. Les matières circulent dans le sol dans le sens descendant, par infiltration des solutions, et dans le sens ascendant, par remontée capillaire et remontées biologiques (lombrics, racines...).

L'activité biologique joue un rôle très important dans cette évolution de la roche au sol :

- elle influence la composition de la solution du sol : fait varier la concentration des ions des sels dissous présents en solution au voisinage des racines, produit des composés organiques qui modifient le pouvoir de formation de complexes de la solution du sol.
- elle réorganise le sol : formation de pores de taille variable, migration des constituants minéraux et organiques.

Cette couverture pédologique évolue lentement et les sols résultent le plus souvent d'une lente évolution sur plusieurs millénaires, voire plusieurs dizaines de millénaires. En climat tempéré, il faut environ 1000 ans pour former un horizon A₁, plusieurs milliers d'années pour un horizon B et quelques heures à un homme pour détruire un sol. **Le sol est par conséquent une ressource non renouvelable à l'échelle de temps d'une vie humaine.**

L'eau, agent de transport

Le transport des produits issus de l'érosion peut être assuré par différents agents (ex : le vent, les glaciers) mais là encore, l'eau joue un rôle majeur. Il faut bien distinguer alors :

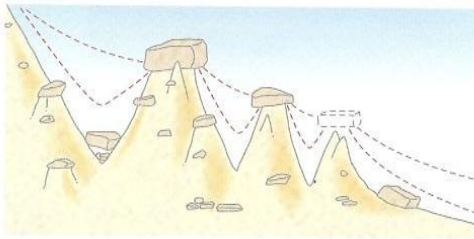
- Le transport des éléments en solution : c'est un aspect souvent négligé. Mais, en climat tempéré, une rivière de plaine transporte plus de matériaux en solution qu'en sédiments.
- Le transport des éléments solides : la quantité d'éléments transportés dépend des caractéristiques du fluide (propriétés hydrodynamiques) et de celles des éléments eux-mêmes (taille, forme, densité...). Il convient avant tout de rappeler quelques notions d'hydrodynamique.

L'eau transporte des matériaux détritiques, de taille très variable, en suspension et des éléments en solution. On distingue deux grands types d'écoulement :

Les "eaux sauvages" :

Ce sont les eaux qui, après la pluie, ruissellent au hasard et s'écoulent sur une pente. Leur action, en terme d'érosion et de transport, peut être importante si la quantité d'eau précipitée en un minimum de temps est forte. Cependant, la longueur du trajet est généralement faible et très vite, les filets d'eau se rassemblent et forment en chenal.

Les "Cheminées coiffées" ou "Demoiselles coiffées" sont des reliefs très particuliers qui apparaissent le plus souvent dans des dépôts très hétérogènes (moraines, produits volcaniques) où de l'argile, des cendres ou des graviers "cimentent" de gros blocs. Le ruissellement des eaux sauvages effrite et détruit les crêtes mais, sous les blocs, le ciment est rendu plus compact et résistant par le poids énorme qui appuie sur lui. Ainsi, au fur et à mesure que les crêtes s'abaissent, des colonnes subsistent à l'aplomb de chacun des gros blocs qui les coiffent.



Les "eaux canalisées" en torrents, rivières, fleuves...

1. Quelques rappels d'hydrodynamique

- **Le débit** d'un cours d'eau est le volume d'eau qui traverse une section pendant l'unité de temps (s'exprime généralement en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).
- **Le débit solide** (ou **charge**) est la quantité de matériel qui traverse la section pendant l'unité de temps.
- **La capacité** d'un cours d'eau est la charge solide maximale que peut transporter un cours d'eau en un point donné, par unité de surface et par unité de temps.
- **La compétence** exprime la possibilité pour un cours d'eau d'entraîner un matériau de poids maximum, compatible avec sa vitesse. On peut donc dire que la capacité d'un courant est de $10 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ tandis que sa compétence est de 200 g.
- **L'énergie développée par un cours d'eau**, c'est à dire sa potentialité d'érosion, est donnée par un rapport sans dimension, le nombre de FROUDE (Fr) :

$$\text{Fr} = \frac{v}{g \cdot h} \quad \text{où } v = \text{la vitesse} \quad - \quad g = \text{la gravité} \quad - \quad h = \text{l'épaisseur de l'écoulement}$$

Si $Fr = 1$, l'énergie de l'écoulement est minimum et il est alors dit "critique" - Pour $Fr < 1$, l'écoulement est tranquille (subcritique) et pour $Fr > 1$, il est rapide (supercritique)

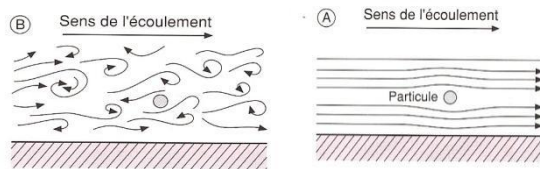
• Les paramètres principaux d'un écoulement sont :

- la viscosité: elle est fonction de la quantité de matériaux transportés en suspension et en solution ;

- la vitesse : elle est fonction de la pente et de la viscosité du fluide. Il faut noter que la vitesse n'est pas constante sur une section de cours d'eau : elle est maximale un peu en-dessous de la surface et dans l'axe du cours d'eau et minimale sur le fond et près des berges.

Ainsi, un écoulement profond (plusieurs mètres, par exemple) a peu d'action sur le fond ; au contraire, un écoulement très superficiel (quelques décimètres) a une forte action érosive sur le fond qui est trop près de la surface. A vitesse égale en surface, l'action érosive des wadi (lits de rivières généralement asséchées, en milieu aride) est bien plus forte que celle des rivières des pays tempérés.

• Il existe **différents types d'écoulement** :



- l'écoulement laminaire : les filets d'eau sont parallèles entre eux, leur vecteur vitesse est identique : la surface de l'eau est lisse. La vitesse moyenne est égale à la vitesse instantanée.

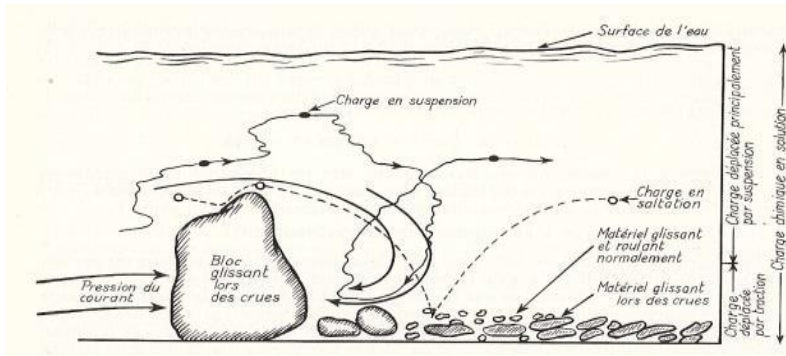
- l'écoulement turbulent: les filets d'eau s'entrecroisent, des tourbillons apparaissent, la vectrice vitesse sont variables en intensité, direction et sens. A un instant t , les particules d'eau ont des vitesses instantanées différentes : la vitesse moyenne de l'écoulement est égale à la somme algébrique des vitesses instantanées. Les variations de la vitesse instantanée en un point conditionne le déplacement d'un objet sur le fond : lorsque la vitesse augmente, l'objet est soulevé et entraîné ; lorsque la vitesse diminue, il tombe et l'objet saute, il tombe et saute (saltation).

- le passage de l'écoulement laminaire à l'écoulement turbulent dépend de la valeur du nombre de REYNOLDS, défini par la formule suivante :

$$R = k \cdot H \cdot V / \mu \quad \text{où } h = \text{hauteur de l'eau} \quad - \quad V = \text{vitesse moyenne} \quad - \quad \mu = \text{viscosité}$$

L'écoulement turbulent se déclenche au-delà d'une valeur critique de ce nombre ($500 < R < 2000$): il est notamment provoqué par la présence d'obstacles (ex : piles de ponts)

• **La capacité et la compétence sont fonction de la vitesse et du type d'écoulement :**

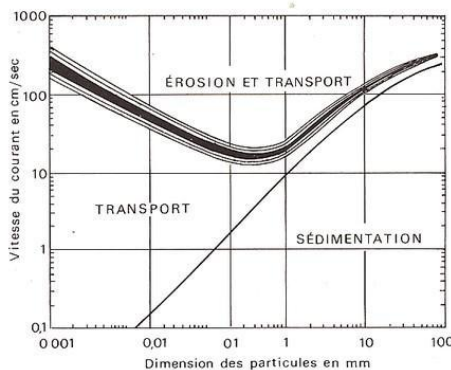


Les substances insolubles peuvent être transportées par *flottaison* si leur densité est inférieure à 1, par *suspension* dans la masse liquide, par *roulement*, *saltation* ou *glissement* au voisinage du fond.

Il ne faut pas négliger le transport des substances en solution : dans les cours d'eau de climat tempéré, il peut être plus important que la charge solide.

La probabilité d'entraînement d'une particule est fonction de sa taille et de l'énergie du fluide.

- Les domaines érosion - transport - sédimentation : le diagramme de HJULSTRÖM.



Par exemple, un grain de sable de 0,1 mm est érodé et transporté par un courant de vitesse supérieure à 20 cm/s ; il est encore transporté tant que la vitesse se maintient au-dessus de 2 cm/s puis se dépose lorsque la vitesse devient plus faible.

Un courant de 100 cm/s transporte les particules inférieures à 0,005 mm déjà en suspension, érode et transporte celles comprises entre 0,005 et 10 mm et laisse déposer celles supérieures à 10mm

2. Différents types de cours d'eau et leur participation à l'érosion et au transport

2.1 : Les torrents



Le lit d'un torrent peut être divisé en 3 parties :

- **le bassin de réception** : lieu de rassemblement des "eaux sauvages". L'érosion y est dominante, notamment lors de grosses pluies d'orages.
- **le chenal d'écoulement** : étroit, à forte pente, il y a encore érosion mais surtout transport.
- **le cône de déjection** : c'est le lieu essentiel de dépôt des matériaux transportés (sédimentation). Au plus fort du débit du torrent, l'eau coule en nappe sur ce cône transportant boues et pierres. C'est ainsi que le cône de déjection, en s'agrandissant, repousse contre le versant opposé le lit de la rivière dans lequel le torrent aboutit.

2.2 : Les rivières et les fleuves

Ce sont des cours d'eau permanents qui prennent naissance à partir de sources de nappes, de la fonte des glaciers, de résurgence ou d'exutoires.

Ces cours d'eau convergent vers un fleuve qui se dirige soit vers l'océan (exoréisme), soit vers des lacs ou des lagunes (endoréisme).

• Le profil des rivières :

Le profil transversal : En s'enfonçant par érosion, les cours d'eau creusent des vallées qui, en terrain meuble et homogène, prennent un profil transversal en "V". En terrains plus durs (calcaires, granites), l'enfoncement est vertical (gorges, canyons...)

Le profil longitudinal : on distingue généralement le cours d'eau supérieur où la rivière peut être torrentielle : l'érosion est alors prédominante ; le cours d'eau moyen (transport) et le cours inférieur (transport et sédimentation) dans une plaine alluviale.

• Le lit des cours d'eau :

Dans les cours d'eaux inférieures, la rivière ou le fleuve occupe un lit restreint, non stabilisé, qui peut varier d'emplacement selon les crues : c'est le lit mineur. Il est souvent limité par des berges couvertes de végétation ou consolidées par l'Homme.

Lors des crues, le cours d'eau peut déborder hors du lit mineur et peut recouvrir en partie la totalité de la plaine alluviale : il délimite alors le lit majeur.

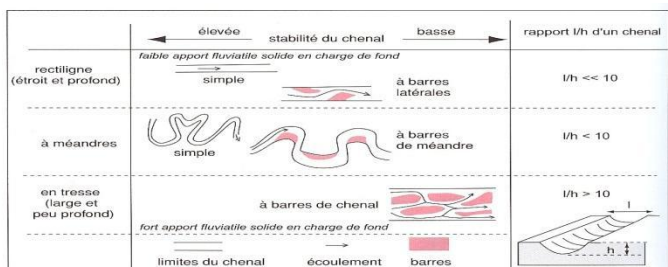
• **Le transport des particules :**

Selon leur énergie, dépendante du climat (pluies) et de la pente, les fleuves et rivières peuvent transporter une charge de fond (graviers, galets) plus ou moins importante.

Quand la charge de fond est importante (lors des crues), le fleuve charrie des galets qui forment son lit majeur. La largeur du chenal est très grande par rapport à sa profondeur.

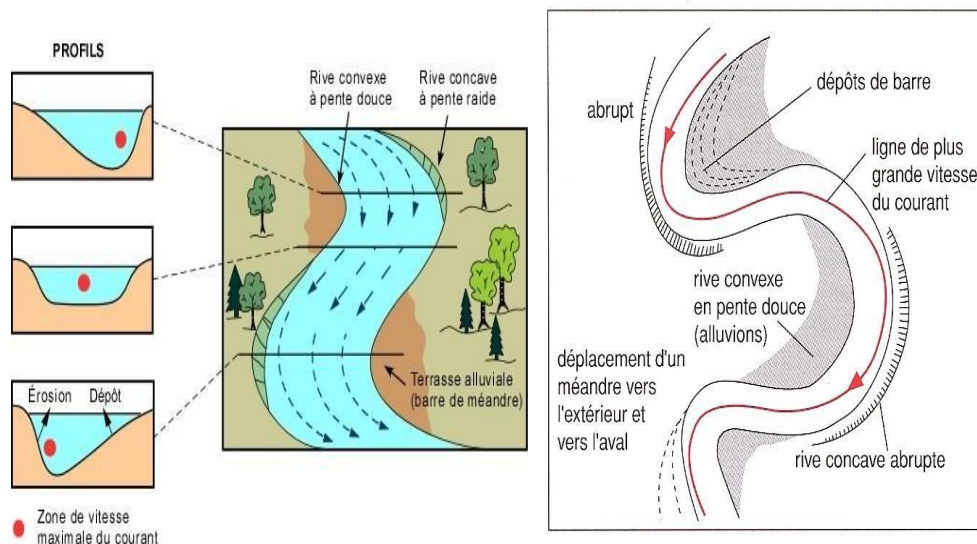
En période d'étiage, se forme un réseau anastomosé, dit "en tresses" : le fleuve se compose d'une série de bras légèrement curvilignes, reliés les uns aux autres.

Quand la charge de fond est plus faible, le fleuve prend un cours en méandres ou rectiligne. Lorsque les méandres sont cantonnés au lit majeur, ils migrent vers l'aval, par fermeture des boucles et formation d'un délaissé de forme arqué qui se colmate et se comble peu à peu lors des crues.



Dans les fleuves et les rivières, les "barres" sont des accumulations de galets et de graviers (charge de fons laissé par une crue) en relief dans un chenal. La disposition des barres renseigne sur l'énergie potentielle du cours d'eau.

Les méandres que peuvent former un cours d'eau sont des lieux de dépôt particuliers. En effet, dans un méandre (profil du haut et du bas de la figure), l'érosion se produit sur la rive concave, à pente raide, là où la vitesse du courant est la plus grande. Le dépôt se réalise sur la rive convexe, là où la vitesse du courant est la plus faible, formant une terrasse alluviale (ou barre de méandre). Le couple érosion - dépôt entraîne une migration latérale du méandre causant alors un élargissement de la vallée.



• Les terrasses :

Une terrasse apparaît à chaque fois que les rivières ou fleuves s'encaissent dans leurs propres alluvions : la surface de l'ancien lit majeur est alors "suspendue" au-dessus du fleuve et forme une terrasse. Si le phénomène se reproduit plusieurs fois, on obtient des terrasses étagées, la plus basse étant toujours la plus récente.

2.3 : Estuaires et deltas

Au niveau des embouchures de fleuves, deux milieux aux caractéristiques différentes sont mis en présence :

- l'un fluvial, d'eau douce dont le chenal d'écoulement a une dimension finie et qui transporte des particules solides et des ions en solution ;
- l'autre marin, donc salé, qui prend en charge les éléments transportés.

La nature de cette zone de contact dépend à la fois de la charge détritique des eaux douce et de l'énergie déployée par les courants marins pour les déblayer.

• **Les estuaires** : ce sont des embouchures dans les mers à courants côtiers et à courants de marées importants. Il y a le plus souvent pénétration du milieu marin en milieu continental. L'eau de mer prend directement le relais concernant le transport des matériaux.

• **Les deltas** : Les deltas sont des embouchures de fleuves riches en matériaux détritiques dans les mers (ou les lacs) à marées de faible amplitude. Les matériaux détritiques ne sont alors pas ou peu déblayés par les courants. Le milieu continental gagne donc du terrain sur le milieu marin. Une aire deltaïque est donc large, parcourue par un réseau dense de bras dont le tracé varie au fur et à mesure que le delta se constitue.

La morphologie, l'évolution d'un delta est sous la dépendance de 3 facteurs et l'importance relative de ces facteurs permet de distinguer différents types de deltas :

- La marée. Si ce facteur est dominant, il détermine des embouchures évasées (de type estuarien) avec d'importants replats de marées et des barres sableuses rectilignes dans l'embouchure. Dans une mer sans marée, par exemple, le delta peut résulter du barrage et

de l'ensablement d'une baie ou d'un estuaire préexistant : la côte est alors rectiligne (ex : delta du Nil).

- Les effets de houle. Ils sont à l'origine d'une dérive littorale de part et d'autre de l'embouchure et il s'édifie alors des cordons littoraux parallèles à la côte qui emprisonnent des étangs (des vases).

- La dynamique fluviale : Si elle est prédominante, elle engendre un delta digité (en forme de patte d'oiseau) avec développement de chenaux en éventail bordés de levées (ex : delta du Mississippi). La sédimentation et la subsidence y sont très importantes.

Les grands deltas, très stables, comblent des golfes entiers et atteignent des épaisseurs considérables : le delta du Pô avance de 70 m par an, celui du Mississippi comprend 11 000 m de sédiments quaternaires et augmente son volume de 2 millions de tonnes par an.

L'eau, agent d'érosion

L'érosion regroupe l'ensemble des phénomènes externes qui, à la surface du sol ou à faible profondeur, enlèvent tout ou partie des terrains existants et modifient le relief.

Les facteurs d'érosion sont : le climat, la pente, les propriétés physico-chimiques des roches, la couverture végétale (son abondance, sa nature) et l'action de l'homme (pratiques agricoles, urbanisation...)

Érosion causée par les êtres vivants

- Biométéorisation
- Microorganismes Mollusques perforateurs.
- Végétaux peuvent concourir à l'érosion par leurs racines par exemple
- Érosion anthropique (par l'homme) : déforestation, labours (érosion aratoire), urbanisations diverses

Phénomènes exceptionnels et brutaux

- Avalanche
- Glissement de terrain
- Séisme
- Phénomènes volcaniques

Transport

Le transport des matériaux issus de la désagrégation de la roche s'effectue soit sous forme dissoute dans la circulation des eaux continentales, soit sous forme solide. Dans ce dernier cas, il peut s'agir de processus gravitaires agissant à faible distance par des processus gravitaires ou de transport à plus longue distance quand les matériaux sont pris en charge par un agent de transport : glacier, eau, vent.

Les matériaux transportés peuvent éventuellement être stockés, créant des accumulations sédimentaires, avant d'être de nouveau mis en mouvement. À long terme, ils aboutissent dans les mers et les océans.

La terminologie pour les différents types de sable est :

- sable de plage Émoussé luisant (EL)
- sable fluviatile Non usé (NU)
- sable désertif Rond mat(RM).

La masse de matériaux transportés sous forme dissoute par les eaux continentales est importante. C'est le processus essentiel des régions karstiques.

De multiples processus gravitaires (éboulement, avalanche, reptation, ruissellement, solifluxion) nourrissent un manteau d'altération à proximité immédiate de la zone source. Sur les versants ou à leur base, on trouve des cônes de déjection, des cônes d'éboulis ou des talus d'éboulis.

Les glaciers transportent des matériaux de toute taille (blocs irréguliers, moraines, sables).

Sur le long terme, la sédimentation des débris donne naissance à des roches détritiques.

Le vent constitue un formidable agent de transport, en particulier dans les régions désertiques. Le vent peut aussi transporter des graviers et du sable (par saltation) et des limons (par suspension) à partir de zones de (déflation). Ils emportent et déposent les loëss (limon des plateaux) parfois à des milliers de kilomètres de leur lieu d'origine.

Dans les régions anthropisées, l'érosion des sols augmente dans les bassins versants, mais les barrages artificiels peuvent aussi bloquer le transit sédimentaire normal jusqu'en mer.

L'érosion use le matériel rocheux et façonne des formes très diverses.

Le ravinement affecte les paysages nommés badlands. Les précipitations, en coulant sur les pentes constituées de matériaux meubles (argile, sédiments), creusent des rigoles et des sillons.

Exemple de morphologie :

Gorge, canyon ; vallée et cirque glaciaire ; gouffre, caverne, grotte; calanque; ravins ; ligne des cataractes ou encore ligne des chutes etc...

L'érosion peut donner naissance à des modelés d'accumulation :

Karst à tourelles ; Chaos de boules granitiques (Bretagne, Massif central) ou de blocs de grès (Forêt de Fontainebleau) Pain de sucre Rio de Janeiro ; cheminées des fées (Hautes-Alpes), Demoiselles coiffées (Turquie) etc...

Littoral

Le recul et la transformation des littoraux dépendent de très nombreux facteurs : la configuration de la côte ; la nature de la roche ; la force et l'orientation des courants, des

vagues, de la dérive littorale et de la houle (ondulation de vagues) ; la présence de galets ; l'anthropisation.

On peut donc avoir plusieurs cas de figure :

Littoral à falaise différente selon les roches ; les calanques appartiennent au relief karstique ; les abers (des formes d'estuaires), abers et fjords (embouchures); les marais, deltas, estuaires ; les dunes...

Érosion des sols agricoles

L'érosion des sols agricoles produit des croûtes (gypseuses ou calcaires), des cuirasses ferrugineuses et latéritiques Cette érosion est due en grande partie à l'action de l'homme :

- les défrichements ;
- les méthodes agricoles intensives, la monoculture, la culture en rang espacés, la mécanisation, le labour, le sol nu en période hivernale, le défrichage, les sillons dans le sens de la pente, etc...
- les aménagements routiers et urbains augmentent les surfaces de ruissellement ; le surpâturage: dans les pays du Sahel, la désertification est la conséquence du surpâturage ;
- Les surfaces en cultures de printemps, encouragées par les subventions, augmentent (tournesol, maïs, betterave) et laissent la terre à nu en hiver.
- Les terrains pentus sont progressivement colonisés par certain cultures temporaire.
- Enfin, la destruction des plantes adventices par les herbicides laisse le sol à nu entre les plants cultivés.
- les zones détruites par les incendies sont particulièrement exposées à l'érosion.

Genèse des formations superficielles

Introduction

Les formations superficielles correspondent à la partie supérieure de la lithosphère et couvrent la majeure partie des terres émergées.

La genèse de ces formations relève de phénomènes de fracturation des roches et de météorisation comme les altérations, arénisation, désagrégation, qui ont une grande liaison avec certains processus qui en résultent de phénomènes internes de la terre tel la géodynamique, le volcanisme, la tectonique...

Fracturation La fracturation dépend des qualités mécaniques des roches et des phénomènes internes du globe.

Météorisation L'ensemble des agents météoriques agissent sur les roches en affleurement : processus de météorisation.

-**Cryoclastie** La cryoclastie ou gélifraction est un processus de désagrégation des roches en raison de cycles de gel et de dégel de l'eau.

- **Haloclastie** L'haloclastie est un processus de désagrégation de la roche, particulièrement efficace, lié à la cristallisation de solutions salines. Ce phénomène s'observe majoritairement en milieux côtiers et désertiques. Les solutions salines pénètrent dans la roche *via* les fissures, diaclases, anfractuosités (vides ou creux). L'évaporation de l'eau permet la cristallisation des sels et les cristaux exercent alors une pression forte sur les parois des pores et fissures de la roche entraînant la désolidarisation des assemblages minéraux. Les cycles d'humectation et de dessèchement entraînent une rupture mécanique de la roche, grain à grain.

Classification et évolution des formations superficielles dans l'espace

Les formations superficielles vont rester sur place (autochtones) ou être plus ou moins transportées (subautochtones et allochtones) selon les cas. Elles vont former différentes structures, selon leur mode de transport.

-Formations superficielles allochtones

Les formations superficielles allochtones sont transportées sur de longues distances par différents vecteurs tels que (1) les glaciers, (2) le vent ou (3) les eaux (fleuves, lacs et mer) :

Les glaciers peuvent être de type polaire (hautes latitudes) ou de hautes altitudes. Les glaciers polaires, qui représentent 95 % de la cryosphère terrestre, sont soumis à des conditions particulières dues aux hautes latitudes (faible alimentation, températures moyennes des glaces inférieures à -10°C). Celles-ci sont responsables d'un système glaciaire caractérisé par des formes massives, des faibles flux de glace, d'une faible production sédimentaire, d'un âge ancien de la glace de profondeur d'une forte inertie thermique. Les glaciers de type hautes altitudes, représentés par 5 % de la cryosphère terrestre, sont plus actifs, bien que moins massifs, que les glaciers polaires. Ils ont une glace plus plastique avec des flux plus élevés (dus aux températures moins basses), moins ancienne et qui possède une très faible inertie thermique. Ils sont composés de trois parties distinctes :

La première est la zone d'accumulations, située en haute altitude, où les précipitations de neige se transforment en glace ; la deuxième, la zone de transport, est la partie où l'érosion est maximum ; la troisième partie est la zone d'ablation où la fonte est la plus importante que l'accumulation de glace. La différence d'altitude entre ces parties entraîne de variation des conditions de glace et est responsable, entre autre, d'une dynamique très active. La charge sédimentaire est issue passivement des avalanches de débris sur les versants des vallées ou par des dépôts morainiques mis en place par abandon à la base de la masse glaciaire en mouvement.

Les cours d'eau à leurs tours, sont aussi responsables du transport des particules solides et dissoutes issues de l'érosion physique et chimique, du bassin versant jusqu'aux océans ou dans les bassins continentaux fermés des zones arides.

Le vent prélève des particules, préférentiellement dans les zones de roches meubles peu protégées par le couvert végétal (mais aussi à la surface des océans), et les dépose massivement à une distance pouvant atteindre plusieurs centaines de kilomètres, en produisant des accumulations sédimentaires. La raréfaction de la végétation dans les zones périglaciaires due au froid, à la sécheresse et au vent, a permis le dépôt de sables éoliens et de loess, formant de vastes couvertures. Les dépôts éoliens de beaucoup de régions de l'hémisphère Nord sont ainsi hérités des phases froides et sèches du Quaternaire. La dynamique éolienne est composée de trois types d'actions, qui sont l'ablation, et le transport et l'accumulation.

-Formations superficielles subautochtones

Ces formations, réunies généralement sous le terme de *colluvions*, sont peu transportées et évoluent au niveau du versant, c'est-à-dire l'espace compris entre la ligne de crête et le fond de vallée (talweg). Les formations superficielles vont subir des mouvements dus à la

gravité, assistés par des dynamiques liées à l'environnement (pente, exposition, situation sur le versant), aux facteurs climatiques (pluviométrie, enneigement,...) ainsi qu'au couvert végétal de 5 %) des versants en équilibre est responsable de mouvements faiblement perceptibles tels que des ruissellements superficiels entraînant des particules argileuses et limoneuses ou des mouvements de reptation (déplacement lent et continu de matériau dû aux instabilités d'origine physique). La pente plus importante des versants en déséquilibre est responsable de mouvements plus rapides et discontinus dans le temps, comme les glissements de terrain, les coulées (boueuses, de débris, de solifluxion...) ou encore les écroulements.

Formations superficielles autochtones

Elles ne sont pas transportées et sont situées sur des surfaces plutôt planes et immobiles. Leur évolution dépend de la lithologie, du régime hydrique et du temps. Citons comme exemple les regs sahariens, les altérites tropicales, ou encore les cuirasses ferrugineuses ou alumineuses tropicales.

Les techniques d'étude des formations superficielles :

La méthodologie utilisée afin de couvrir de tel vaste territoire doit comporter les étapes suivantes:

- 1) la photo-interprétation préliminaire,
- 2) les levés de terrain,
- 3) La photo-interprétation finale et la mise en cartes

La photo-interprétation : La photo-interprétation préliminaire vise à identifier les principales formations superficielles, à cibler les zones où la nature des formations est inconnue et à localiser les accès aux routes, gravières, sablières et coupes naturelles. Ces dernières permettent de valider l'interprétation initiale des formations superficielles et de déterminer leur nature.

Les levés de terrain :

Les levés de terrain doivent se dérouler dans la région étudiée. Les relevés détaillés doivent être effectués pour les sites représentatifs des différentes unités lithostratigraphiques ou lorsqu'un phénomène particulier était observé (marques d'érosion glaciaire, coupe présentant plus d'une unité lithostratigraphique...). Les relevés détaillés doivent être effectués en utilisant les géofiches.

Ces fiches rassemblent les informations sur la nature des unités présentes, la nature des contacts entre les unités, leur épaisseur, leur texture, leur structure, leur couleur, leur réaction au HC1 ainsi que des informations sur les marques d'érosion glaciaires (type et orientation). Les relevés sommaires consistent en des observations qui doivent être reportées directement sur les photographies aériennes (nature et épaisseur des dépôts superficiels) ou dans un GPS (affleurements rocheux).

La photo-interprétation finale et la réalisation des cartes

Deux méthodes doivent être utilisées pour la photo-interprétation finale conventionnelle à l'aide de stéréoscope à miroirs et numérique à partir de logiciel.

La cartographie des formations superficielles selon la méthode préconisée, doit présenter un intérêt à la fois scientifique et pratique. Sur le plan scientifique, cette cartographie complète utilement la carte géologique par l'étude des formations meubles, de la lithologie, des formes et des modes d'altération des roches-substrats. Sur le plan pratique, ces cartes se sont révélées efficaces, de par leur conception et la simplicité de leur légende, dans divers projets d'aménagement rural par exemple. Elles sont en effet à la base d'une cartographie de l'utilisation potentielle du sol.

Etude des principales formations meubles intéressant le géotechnicien (alluvions, éboulis, formations de pentes, dépôts éoliens, croûtes, etc.).

1) Généralités

De point de vue de la géotechnique, les formations géologique peuvent être classées en :

- roches : qui sont les terrains qui ne subissent pas de modifications notables en présence de l'eau. Ce sont en général des matériaux compacts, durs et résistants, qui ne peuvent être réduits en morceaux qu'à la suite de très gros efforts mécaniques ; comme supports des fondations ou ouvrage d'art ils sont pratiquement indéformables.

- sols meubles : sont résultants de l'altération physico-chimique des roches en place, leur compacité naturelle est en générale très faible. Ces terrains sont transformés en se décomposant en petites particules friables et ils sont susceptibles de déformation sous les fondations.

De point de vue de leur cohésion, les sols peuvent être :

- sols cohérents : comme : argiles, marnes, etc.

- sols pulvérulents : comme : sables, graviers, etc.

Les formations superficielles sont des ensembles hétérogènes de formations meubles du quaternaire.

2) Les principales formations superficielles:

D'après la dimension de leurs grains, la nature des constituants et le milieu de dépôt on a :

- la terre végétale, - la tourbe, - les vases, - les alluvions, - les moraines.

a) Terre végétale : est une formation superficielle dont le monde vivant tire son alimentation par le biais de la végétation. Sommairement la terre végétale est un mélange d'une partie minérale (sables, silts, argiles, débris de roches) et d'une partie organique constituée des reliquats (restants) de la vie végétale et animale de la surface.

La terre végétale est toujours une roche meuble comportant un fort pourcentage de vide, donc très compressible et cette situation est aggravée par l'existence de la phase organique qui est très sensible aux variations d'humidité. La réalisation d'une fondation nécessite toujours le décapage préalable de la couverture de terre végétale, même pour une construction légère.

b) La tourbe : c'est une formation d'origine entièrement végétale qui prend naissance dans les fonds des vallées humides et les dépressions marécages, donc dans des zones plus ou moins périodiquement inondables. La tourbe se constitue par couches annuelles successives. C'est une formation spongieuse, souple, extrêmement compressible et donc un matériau à bannir (à éviter) de toute assise de fondation superficielle.

c) Les vases : peuvent être définies comme des argiles en formations dans des zones de sédimentation calme. Ce sont des formations relativement homogènes, constituées de particules argileuses disséminées, formant une trame très lâche, gorgée d'eau. Au fil des

années, la boue vaseuse prend un peu de consistance, mais il faut attendre une durée d'ordre géologique pour que ce matériau mou, sans portance, devienne une argile consistante (dure).

Les vases et boues sont constituées d'un mélange de très fins grains de quartz et de cristaux argileux, y sont mêlés (contaminés) à des matières organiques et humiques ;

d) Limons : sont constitués de fines poussières argileuses et siliceuses transportées par les vents et parfois remaniées par les eaux. L'épaisseur est très variable : de quelques centimètres à plusieurs mètres. Compte tenu de leur porosité importante, les limons sont des formations compressibles et ce d'autant plus que leur teneur en argile est plus grande.

Les limons sont constitués d'un mélange de très fins grains de quartz et de cristaux argileux, y sont mêlés à des colloïdes ferrugineux.

e) Eboulis : les éboulis rocheux tapissent le pied des escarpements rocheux et des versants de vallées. Le jeu des diaclases, l'action de l'eau et gel, celle de la gravité, explique ce phénomène classique d'érosion, qui est à l'origine de la destruction et du recul des falaises. Au pied du versant, les éboulis sont constitués des blocs anguleux qui ont dévalé le versant. Ces blocs constituent un talus naturel dont l'angle sur horizontale est très voisin de l'angle de frottement interne du milieu. Un talus d'éboulis doit faire l'objet d'une reconnaissance mettant en évidence ses caractéristiques géométriques, géologiques, hydrogéologiques et géotechniques.

f) Les alluvions : sont des matériaux issus de l'érosion des reliefs et transportés par les torrents et les rivières. Mis en suspension dans l'eau de ces cours d'eau, ces matériaux qui vont des galets aux particules fines, en constituent le débit solide. Les torrents de haute montagne sont capables de charrier de gros blocs qui vont se déposer en aval dès que la turbulence de l'eau est devenue trop faible. La pente générale d'un réseau hydrographique diminue avec l'altitude, d'où une capacité de transport plus faible et une sédimentation d'éléments plus fins dans le cours moyen. Alors les torrents qui débouchent dans une vallée transversale accumulent sous forme de cônes les matériaux grossiers qu'ils transportaient. Les alluvions présentent sommairement les caractéristiques suivantes :

- éléments arrondis par l'usure liée au transport,
- hétérogénéité pétrographique,
- hétérogénéité granulométrique,
- présence dans la couche alluviale d'une nappe aquifère,

Les formations alluviales sont en général très perméables. Les problèmes techniques posés par les alluvions dépendent surtout de leur granulométrie :

- Les alluvions grossières ou moyennes (sables, gravier, galets) représentant des assises de très bonne portance, très peu compressible ;
- Par contre, les alluvions fines (limons argileux, vases) sont des assises très dangereuses.

g) Les moraines : représentent un reliquat (débris) de l'érosion glaciaire et sont formées des éléments rocheux tombés sur le glacier depuis le haut des versants ou arrachés par le glacier aux versants de sa vallée d'écoulement ainsi que de matériaux fins issus de l'altération et de l'usure des roches de ces versants.

La constitution d'une moraine et par conséquent sa perméabilité, expliquent le comportement mécanique très variables.

h) Les argiles : sont constituées de cristallites (particules cristallines) appartenant à des espèces minérales différentes : kaolinite, illite, montmorillonite, qui sont toutes des silicoaluminates ;

D'après leur lien avec le substratum, les formations superficielles (sédiments quaternaires) continentaux constituent bien souvent une couche de dépôts meubles reposant sur un substratum plus ancien. Nous pouvons distinguer deux types principaux de formations superficielles :

- les formations présentant un lien avec le substrat ou autochtones,
- les formations sans parenté avec ce dernier ou allochtones.
- Plus les formations superficielles transitoires ou subautochtones et anthropiques.

- Formations apparentées avec le substrat :

Les roches résiduelles sont issues de modifications du substratum sous l'effet d'agents climatiques, biologiques et/ou chimiques, sur des surfaces plane ou sub-plane.

Les mécanismes mis en jeu lors de l'altération sont la gélifraction, la thermoclastie (écarts thermiques) et les processus chimiques (dissolution et hydrolyse).

Les roches résiduelles, ou altérites, les plus répandues, sont les arènes sur roches magmatiques grenues, les argiles et sables de décarbonatation (karsts), les argiles à silex sur la craie, les concentrations ferrugineuses, etc.

- Formations superficielles en transit sur les versants ou subautochtones

Les formations de versant résultent des forces gravitaires qui s'exercent sur les matériaux du versant, avec plus ou moins d'efficacité selon la nature et la structure du substrat, le climat, la végétation, les mouvements tectoniques.

Le transport des matériaux se fait avec intervention de l'eau par ruissellement, reptation, glissement en masse et coulées boueuses, ou sans intervention de l'eau par chutes de blocs et écroulements de falaises.

Les principaux types de dépôts de versant sont les éboulis, les colluvions, les moraines en haute montagne, les loupes de glissement, les cônes de déjection, etc.

- Formations sans parenté avec le substratum

Ces formations résultent du transport de particules par les glaces, l'eau ou le vent :

- Les formations glaciaires les plus typiques sont les moraines, latérales ou frontales, des glaciers actuels ou datant des dernières périodes glaciaires.

Plus généralement, on appelle tills, en langage international, les dépôts d'origine glaciaire, caractérisés par une forte hétérométrie des éléments constitutifs qui vont des gros blocs aux argiles.

- Les alluvions sont les dépôts d'origine fluviale. Elles constituent la première source de granulats et le principal réservoir d'eau exploitable.

Les éléments transportés par l'eau courante, arrondis du fait de l'usure lors de leur transport, forment des dépôts, classés en fonction de la compétence du courant, qui s'organisent dans des cônes alluviaux et dans des chenaux. La nature des matériaux déposés est fonction des provinces traversées.

Les épandages fluviaux quaternaires sont généralement peu épais (10 à 20 m maximum), sauf dans les zones subsidentes que constituent les cours inférieurs de certains fleuves et les deltas (plus de 1 000 m de sédiments par endroits).

- Les vases sont des sédiments meubles, fins, plastiques. La teneur en eau est très forte. Une texture maillée confère aux vases une forte compressibilité.

Ce sont des sédiments quaternaires et actuels que l'on rencontre dans les estuaires, marais côtiers et lacs.

- Les loess sont des sédiments éoliens formés pendant les périodes glaciaires. Ce sont des dépôts limoneux issus des zones périglaciaires dénudées (découvertes). Leur épaisseur ne dépasse pas quelques mètres.

Indications pratiques générales résultant de mécanique des sols

Au point de vue des sols des fondations, les terrains peuvent être classifiés :

a) Les remblais : à moins d'être anciens et bien tassés, sont impropres à supporter des constructions lourdes et durables et devront être traversées pour retrouver le bon sol. Dans ce cas les contraintes généralement admises sont :

- remblais non tassés - 0 Mpa ;
- remblais récents, comprimés par couches arrosées - 0,02 à 0,06 Mpa ;
- remblais anciens et consolidés - 0,05 à 0,1 Mpa ;

b) Les terrains compacts incompressibles : constituent excellents supports, lorsqu'il s'agit de roches dures, en masses profondes, compactes et homogènes. Dans ce cas les résistances sont :

- les granits et autres roches ignées : 2,5 à 4 Mpa ;

- les calcaires, grès, schistes : 0,7 à 1,5 Mpa ;

Dans le cas d'importantes fissures, de cavités creusées par l'eau, ou de stratification peu favorable, il est recommandé de réduire de moitié la contrainte admissible.

c) Les terrains cohérents : tels que argiles, marnes, sable argileux, plus ou moins compacts, nécessiteront une étude sérieuse car leur portance peut varier considérablement selon la teneur en eau et leur consistance. Dans ce cas on trouve :

- terrain mou, pétrissable à la main : 0,02 à 0,06 Mpa ;
- terrain consistant, difficile à pétrir : 0,08 à 0,15 Mpa ;
- terrain compact et s'émiette : 0,15 à 0,30 Mpa ;
- terrain dur ou en masse compacte : 0,30 à 0,40 Mpa ;

d) Les terrains compressibles et affouillables : tels que terre végétale, terres fluentes (vases, limons), tourbe et marne très plastiques, constituent de très mauvais terrains qu'il faut traverser en général si l'on veut trouver un bon sol pour des constructions durables. Dans ce cas ils peuvent avoir des contraintes dépassant rarement la valeur de 0,06 Mpa.

Indications à retenir de l'étude des conditions de tassement des sols

a) Dans les terrains argileux cohérents, ce tassement dit de consolidation, résulte de l'expulsion de l'air et de l'eau inclus dans la couche intéressée, et cela sous les charges de l'ouvrage. Le phénomène plus ou moins lent varie avec nombreux paramètres : composition de l'argile, sa compacité, sa plasticité, la forme et les dimensions en plan de la fondation et aussi les caractéristiques des sols sous-jacents et latéraux.

b) Dans les terrains non cohérents (par exemple sable et graviers relativement secs) l'équilibre du sol se produit assez rapidement au fur et à mesure de la construction de l'ouvrage, mais le tassement est fonction de l'épaisseur de la couche et aussi de la forme des dimensions de la fondation.

c) En pratique de faibles tassements, de l'ordre de 5 à 30 mm ne sont pas dangereux lorsqu'ils sont progressifs et réguliers. Le tassement prévu, calculé, ne doit en aucun cas mettre en cause la stabilité de la construction.

Reconnaissance de base du sol

Une bonne consultation des cartes géographiques et géologiques est la première opération à effectuer et dans ce cas on peut utiliser des cartes à échelle 1/50.000 ou 1/25.000 qui sont fait à niveau national. Par lectures de ces plans on peut observer les affleurements des couches géologiques, avec des particularités, tel que failles, effondrements géologiques, etc.

Avec l'aide des cartes hydrogéologiques, on trouve des renseignements sur la distribution des eaux souterraines et sur le comportement mécanique des roches.

La reconnaissance superficielle : consiste à effectuer une visite locale afin de déterminer des affleurements des couches sous-jacentes.

L'observation directe du sol et de la végétation peut aussi fournir quelques indications qu'il faut néanmoins recouper avec d'autres sources de renseignements.

Des fouilles en cours à proximité de l'ouvrage à construire peuvent aussi apporter des renseignements intéressants ainsi que les indications qui peuvent être fournies par l'intermédiaire d'entreprises spécialisées.

Cartographie des formations superficielles et des aléas

1-Généralités sur les aléas, les risques et les PPR (*Plans de Prévention des Risques*)

1.1 - La notion d'aléa et de risque

Le risque R peut être défini de manière théorique comme une mesure probabilisée de l'impact d'un phénomène sur le milieu anthropisé. Pour un site ou une région donnée, il représente l'espérance mathématique des pertes au cours d'une période de référence. Il peut se décomposer en deux fonctions dont il représente le produit :

$$\text{Risque} = \text{Aléa} \times \text{Vulnérabilité}$$

L'Aléa naturel est défini comme la probabilité pour qu'au cours de la période de référence, un événement atteigne ou dépasse une certaine intensité sur le site étudié. Evaluer l'aléa revient donc à calculer, en un site donné, la fonction de répartition des paramètres caractéristiques de l'événement. Pour caractériser l'aléa, des facteurs de deux types sont à prendre en compte. Il s'agit des facteurs permanents indépendants des notions temporelles, à l'échelle humaine (topographie, géologie, géomorphologie dynamique...) et des facteurs temporels, présents ou passés, ponctuels dans le temps (instabilités historiques, géomorphologie...).

V est la vulnérabilité du site. Dans un désert parfait, la vulnérabilité est nulle, et par conséquent, le risque est nul, même si l'aléa ne l'est pas. La vulnérabilité est un facteur complexe qui présente des termes qui sont de deux natures différentes. Les uns sont de nature physique (exprimables, par exemple, en fonction de l'intensité de l'événement), comme la stabilité des constructions aux mouvements du sol, alors que les autres sont de natures socio-économiques, tels que la perception du risque par la population ou l'organisation de la gestion des crises.

Les principaux aléas naturels correspondent aux inondations, cyclones tropicaux, séismes, manifestations volcaniques et mouvements de terrain (glissements, érosion, stabilité des versants,...). En matière de mouvements de terrains, l'approche probabiliste est plus difficile à cerner que pour des aléas sismiques ou d'inondations. En effet ils dépendent souvent de facteurs aggravants dont certains relèvent d'une analyse probabiliste (variations climatiques courtes, sismicité) et d'autres d'un pur déterminisme (actions humaines).

1.2 - Les Plans de Prévention des Risques naturels prévisibles (P.P.R.)

- Présentation

Les P.P.R. sont des documents d'urbanisme qui délimitent des zones exposées aux risques tels que les inondations, les avalanches, les mouvements de terrain, les incendies de forêt, les séismes, les éruptions volcaniques, les tempêtes ou les cyclones.

Ces anciens plans (*P.S.S. : Plans de Surfaces Submersibles «sous-marins ou subaquatiques», P.E.R. : Plans d'exposition aux Risques*) demeurent en vigueur tant qu'ils ne seront pas remplacés. Les P.P.R., ont quatre principaux objectifs :

- 1 : délimiter les zones à risques en tenant compte de leur nature et de leur intensité, afin d'interdire tout type d'aménagement ou, de prescrire les conditions dans lesquelles ils doivent être réalisés, utilisés ou exploités;

- 2 : délimiter les zones, non directement exposées, mais où l'aménagement pourrait aggraver les risques ou en provoquer de nouveaux, et donc de prévoir des mesures d'interdiction ou de prescriptions propres à ces zones;

- 3 : définir des mesures de prévention, de protection, et de sauvegarde, en priorité pour les zones mentionnées dans les points 1 et 2.

Ces mesures sont prises par les collectivités publiques dans le cadre de leur compétence;

- 4 : définir des mesures relatives à l'aménagement de ces zones, qui doivent être prises par les propriétaires, les exploitants ou les utilisateurs potentiels.

- Contenu technique

Les P.P.R. présentent de nombreux atouts :

- leur souplesse (étude mono-risque ou multi-risques), leur niveau de précision (échelles de réalisation), le secteur géographique à cartographier (en privilégiant les bassins de risques) et leurs possibilités de modifications ultérieures;

- l'aspect qualitatif prédominant des études réalisées.

Des études complémentaires quantitatives (géotechniques par exemple), qui précisent l'aléa et par conséquent diminuent l'incertitude, peuvent être envisagées au cas par cas;

- la concertation accrue de toutes les compétences en présence pour l'élaboration des P.P.R.

Les études, proprement dites, comportent deux phases, une technique et une autre administrative. La phase technique consiste à recueillir les données et à les analyser, ces travaux étant réalisés respectivement par les services de l'état et par des spécialistes. La phase administrative qui correspond au zonage réglementaire, est développée par le service instructeur en collaboration avec les spécialistes.

Cartographie des formations superficielles et des aléas

Introduction :

Objectifs de l'opération intitulée "Cartographie des formations superficielles et des aléas mouvements de terrain" fait l'objet d'une tâche pluriannuelle. Elle consiste à compléter la cartographie géologique existante, en particulier par un levé des formations superficielles et d'altération et à dresser un inventaire des zones d'aléas du point de vue de l'instabilité et de l'érosion des sols. Cette opération permet, entre autre, de fournir des documents cartographiques pouvant contribuer à l'élaboration d'un schéma d'aménagement et de développement de la région.

Cela consiste, pour les zones d'étude sélectionnées chaque année :

1 - à réaliser la cartographie des formations superficielles et faire le bilan de toutes les informations disponibles sur les phénomènes d'instabilité (mouvements de terrain et érosion) significatifs, observés ou historiques. Ces informations (disponibles auprès d'organismes tels qu'administrations, bureaux privés, universités, ...) sont synthétisées sous la forme d'une carte informative des phénomènes à l'échelle 1/25 000 destinée à informer et sensibiliser l'administration et la population,

2 - à réaliser l'analyse de l'aléa instabilité et à en dégager les paramètres pour aboutir à une cartographie de susceptibilité. Cette carte des aléas permet, en tenant compte si possible, de la nature des phénomènes, de leur probabilité d'occurrence (de cas) et de leur intensité, de localiser et de hiérarchiser les zones exposées aux phénomènes concernés,

3-à contribuer à la constitution d'une base de données locale actualisable. Pour ce faire, ces données sont restituées sous forme numérique afin d'être intégrées dans les Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) développés par le Réseau d'Echanges et de Traitement d'Informations Géographiques.

Contenu de l'étude

L'étude doit délimiter, dans les zones d'enjeux sélectionnées et avec une précision compatible à une échelle de 1/25 000ème, les zones susceptibles d'être affectées par les phénomènes naturels suivants :

- les mouvements de terrain tels que les glissements, éboulements, chutes de blocs, effondrements, affaissements, coulées boueuses, ...
- la dégradation naturelle ou anthropique de zones qui seront recensées en tant que facteur aggravant.

Le recensement des phénomènes naturels traités se fait par :

- la synthèse des archives en possession de divers organismes et administrations. Des enquêtes pourront être menées auprès de la population et l'administration.
- l'interprétation des données de télédétection (images satellites et photographies aériennes),
- la compilation des études existantes (cartes thématiques: topographiques, géomorphologiques, géologiques, de densité du couvert végétal; cartes de localisation des phénomènes; cartes de risques).
- des levés de terrain.

Le contenu de l'étude, englobe également:

- la saisie numérique des données en vue de leur intégration sous SIG,
- la constitution de la base de données des informations,
- l'élaboration des cartes: informative des phénomènes, géologique (du substrat et des formations superficielles), et de susceptibilité (zonage d'aléas),
- les traitements informatiques d'analyse et de modélisation.
- la rédaction des notices explicatives (cartographie) et descriptives (base de données).

Le rapport d'étude est remis aux autorités, à savoir :

- le Président du gouvernement,
- les Délégués du service de la sécurité civile,
- les services des Mines et de l'Energie et des Méthodes Administratives et de l'Informatique, tous deux mandatés ou désignés pour le valider d'après la définition du cahier des charges de l'étude,
- les services des régions où se déroule l'étude,
- les communes intéressées par l'étude.

L'étude est réalisée par bassin de risque. La gestion du risque est donc plus globale et prend en compte des zones à priori non exposées aux risques, mais pouvant avoir des conséquences sur le risque en aval.

L'élaboration du P.P.R. se traduit par quatre étapes qui donnent lieu à la rédaction de plusieurs cartes techniques et d'une carte réglementaire.

1- La carte informative

La carte informative des phénomènes naturels résulte d'une exploitation d'informations variées (archives, études et cartes déjà réalisées, photographies aériennes...) afin d'évaluer la fréquence, la sensibilité des secteurs géographiques concernés, et de déterminer les facteurs naturels ou anthropiques jouant un quelconque rôle dans ces phénomènes. Elle est présentée au 1/25 000 agrandie au 1/10 000.

2 - La carte des aléas

La carte des aléas localise et hiérarchise les zones exposées à des phénomènes potentiels. Cette carte interprétative, qui classe les aléas en plusieurs sous-groupes (fort, moyen, faible et nulle), résulte d'une approche purement qualitative des différents aléas, en termes

de nature, probabilité d'occurrence et intensité des phénomènes. Cette cartographie est réalisée sur des fonds topographiques à l'échelle du 1/25 000 agrandis au 1/10 000.

Les aléas dus aux mouvements de terrain, de par leur forte diversité, sont classés en fonction par exemple d'un potentiel de dommage par type de construction. Cette démarche qualitative intègre une certaine marge d'incertitude, d'autre part d'orienter les prescriptions réglementaires. Cette analyse est réalisée principalement à partir de la superposition de la carte des aléas et celle de l'occupation des sols.

Cette phase peut faire l'objet d'une représentation cartographique.

3 - Le plan de zonage du P.P.R.

Le plan de zonage du P.P.R. a pour but de prévenir le risque en réglementant l'occupation et l'utilisation des sols. Cette réglementation s'applique à des zones dans lesquelles sont définies les interdictions et les prescriptions réglementaires. Ce document peut être établi au 1/ 5000 dans les zones où les enjeux sont importants. Les zones sont délimitées en confrontant la carte des aléas à l'appréciation des enjeux. Chaque famille de phénomène est représentée par une couleur différente, chaque type de phénomène par un figuré et les niveaux d'aléas sont représentés par des tons de couleurs différentes. Le plan de zonage est finalement annexé au P.O.S. à l'échelle du 1/5 000 imposant parfois une transcription plus ou moins complexe.

Des documents complémentaires peuvent être éventuellement joints à l'étude dans un souci de clarté. Il s'agit notamment de documents techniques intermédiaires qui ont pu être réalisés au cours de l'étude (cartes géomorphologiques, hydrologiques, de hauteur de submersion, de facteur de prédisposition pour les mouvements de terrain...).

L'homme et les formations superficielles

L'homme est lié directement au contact de ces formations les exploite depuis toujours pour y trouver les matières premières de son industrie : pierres dures des alluvions pour l'outillage préhistorique, limons pour la céramique et la confection de torchis, fer fort pour la métallurgie, granulats pour la construction...

C'est sur les formations superficielles que s'exerce l'agriculture et on peut constater que leur nature dépend de nombreux facteurs pas toujours en rapport avec la nature lithologique du substratum rocheux.

Les alluvions renferment en leur sein des nappes phréatiques considérables. Elles jouent un rôle de filtre qui améliore la qualité des eaux et, avec les autres formations superficielles, sont un ralentisseur efficace des eaux de ruissellement en période de pluie.

Enfin, les formations superficielles témoignent de l'histoire d'une région depuis des temps immémoriaux (anciens), c'est pour cela qu'elles intéressent tant géologues et archéologues.