

Le transport des sédiments

Les sédiments sont transportés depuis les zones sources jusqu'aux zones de dépôt par trois types de processus :

- glissements en masse par gravité en l'absence de fluides (avalanches de débris "rockfalls", glissements de terrain, "landslides");
- écoulements gravitaires en présence de fluides ("debris flows", "grain flows", "mudflows", turbidités);
- écoulements d'eau, d'air ou de glace.

1- Glissements en masse en l'absence de fluides

Dans ce type de processus, les fluides ne jouent qu'un rôle mineur, par leur effet lubrifiant à la base des unités transportées. Ces processus déplacent des masses considérables de sols et débris rocheux sur des distances courtes (de l'ordre du km). Leur impact sédimentaire est important, car ils mettent les matériaux mobilisés à la disposition du système fluvial. Les glissements en masse gigantesques sont observés sur la Lune et sur Mars où, en l'absence de système fluvial, ils forment l'essentiel des processus sédimentaires :

2- Écoulements gravitaires

Dans ces phénomènes, les particules sédimentaires sont en suspension dans un fluide, mais leur mouvement est dû à la gravité, non au déplacement du fluide lui-même (à la différence d'un écoulement liquide conventionnel). On distingue quatre types d'écoulements gravitaires: (1) les «grain flows», (2) les "débris flows", (3) les "fluidised sediment flows" et (4) les courants de turbidité (= "turbidity currents") (fig. 10).

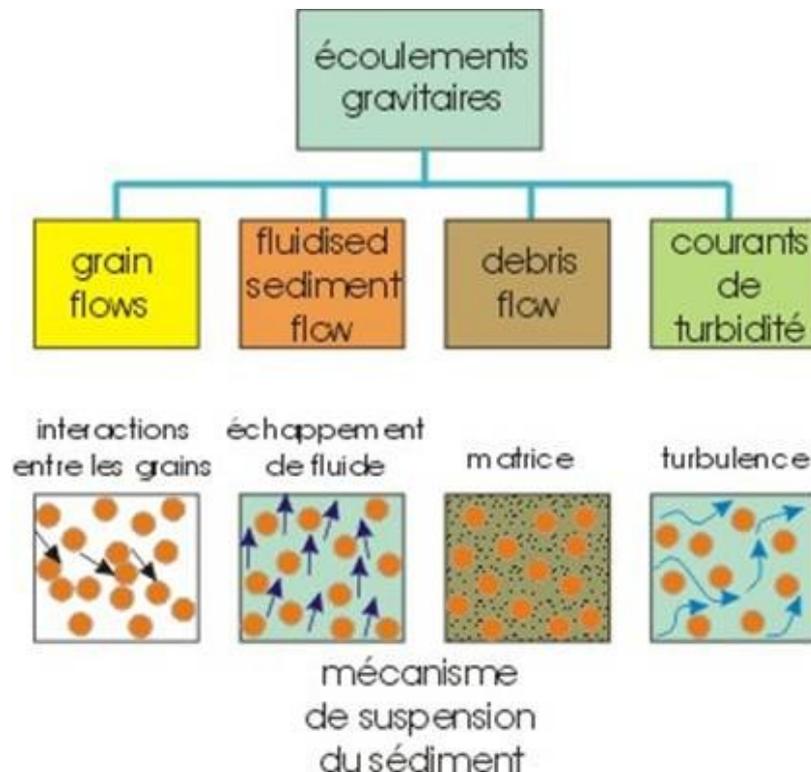
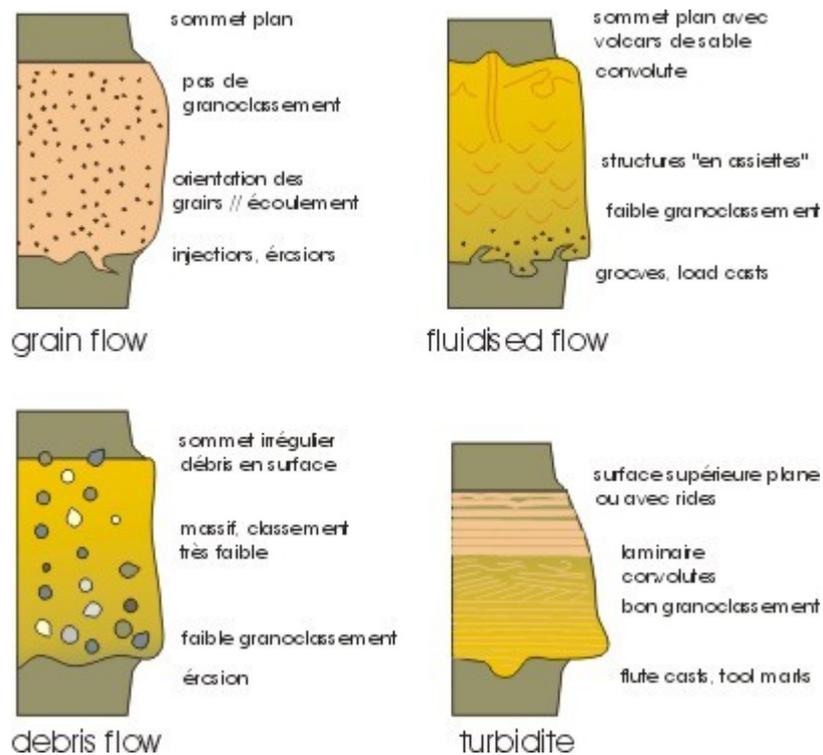


Fig. 10 : classification des 4 types d'écoulements gravitaires en fonction des interactions entre grains et fluide.

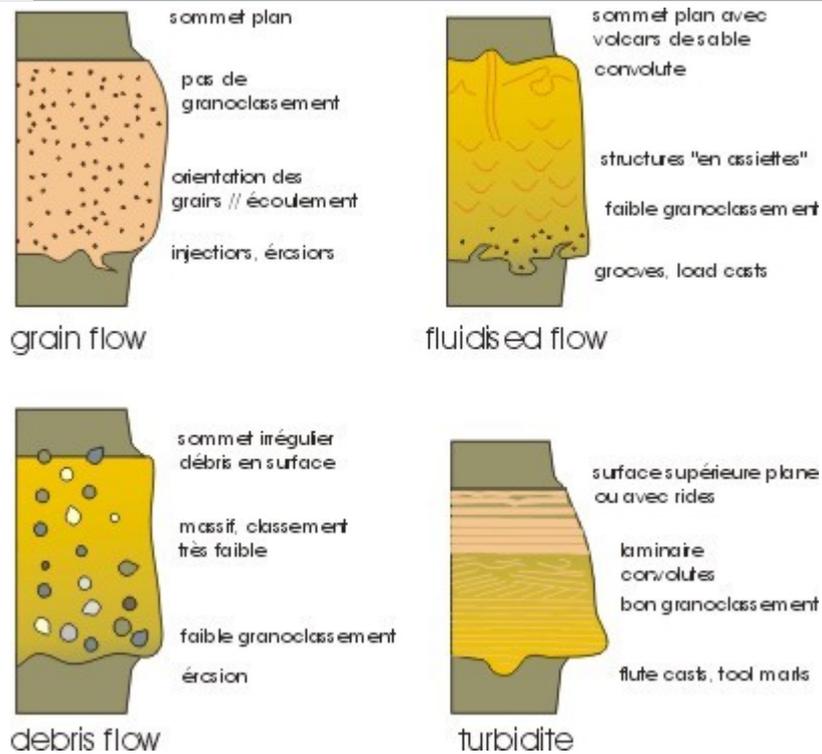
a- grain flows

Les grains flows se déclenchent **lorsque la pente d'un dépôt est supérieure à la pente d'équilibre**. **Les particules sont maintenues en mouvement par des forces dispersives dues aux collisions entre les grains**. L'air (l'eau) n'agit que comme un lubrifiant mais ne propulse pas les grains. De **grandes stratifications entrecroisées** peuvent être produites, mais chaque unité est homogène et ne présente pas de structure interne (fig. 10). L'exemple le plus connu de grain flow est l'avalanche de sable provoquée au revers d'une dune devenue trop raide.



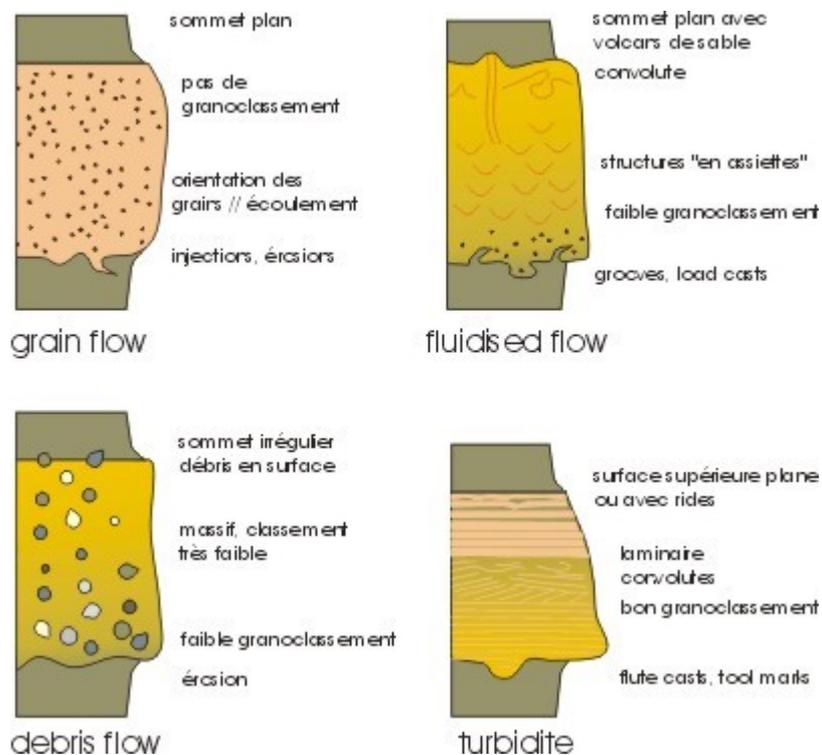
b- fluidised sediment flows

Ce type d'écoulement gravitaire est constitué **de grains maintenus en suspension par un excès de pression du fluide intergranulaire**. Les fluidised sediment flows demeurent en mouvement aussi longtemps que cet excès de pression est maintenu. **De nombreuses structures sédimentaires caractéristiques sont produites: figures de charge ("load casts"), "convolute laminations", volcans de sable ("sand volcanoes"), figures en assiettes ("dish structures"), structures d'échappement de fluide ("fluid escape structures")**. L'exemple le plus connu de ce phénomène est les sables mouvants (= "quick sand"): ces sables saturés en eau (par exemple suite à un dépôt rapide) perdent leur cohésion lors de l'application d'une pression extérieure. A l'échelle géologique, cette pression extérieure est souvent le fait d'une onde sismique.



c- debris flows et mudflows

Les mudflows sont des **écoulements de boue sous l'action de la gravité**. Si on a de gros éléments (galets, blocs), on l'appelle **debris flow**. Ces écoulements ont l'aspect du béton frais et se mettent en mouvement lorsque de fortes pluies ont saturé d'eau leur fraction fine. Leur vitesse de propagation peut atteindre une centaine de km/h et ils provoquent le déplacement de blocs de taille parfois considérable. Ces unités sont **mal classées avec localement un granoclassement inverse** à la base (Fig. 11).



d- courants de turbidité

Les courants de turbidité sont des écoulements gravitaires dans lesquels le sédiment est maintenu en suspension par la turbulence du fluide interstitiel. Ils se produisent lorsqu'un choc (tremblement de terre, vague) ébranle une masse de sédiment. Ce mélange d'eau et de sédiment possède une densité plus grande que celle de l'eau et se déplace vers le bas sous l'effet de la gravité. Insistons une fois de plus sur le fait que ce n'est pas le fluide qui fait se mouvoir le courant de turbidité, mais la pesanteur. Le fluide ne fait que maintenir les particules en suspension.

Les sédiments déposés par les courants de turbidité sont appelés "turbidités" (Fig. 11). Une séquence turbiditique idéale a été mise en évidence et formalisée: il s'agit de la "**séquence de Bouma**" (1962). Elle comprend de la base au sommet :

- **unité massive et grossière, granodécroissante; (terme A)**
- **une unité à laminations planes, granodécroissante (terme B) ;**
- **une unité à stratifications obliques (terme C) ;**
- **unité avec alternance de sable fin, et de pélite (terme D) ;**
- **une unité pélitique laminaire et granodécroissante (terme E) ;**

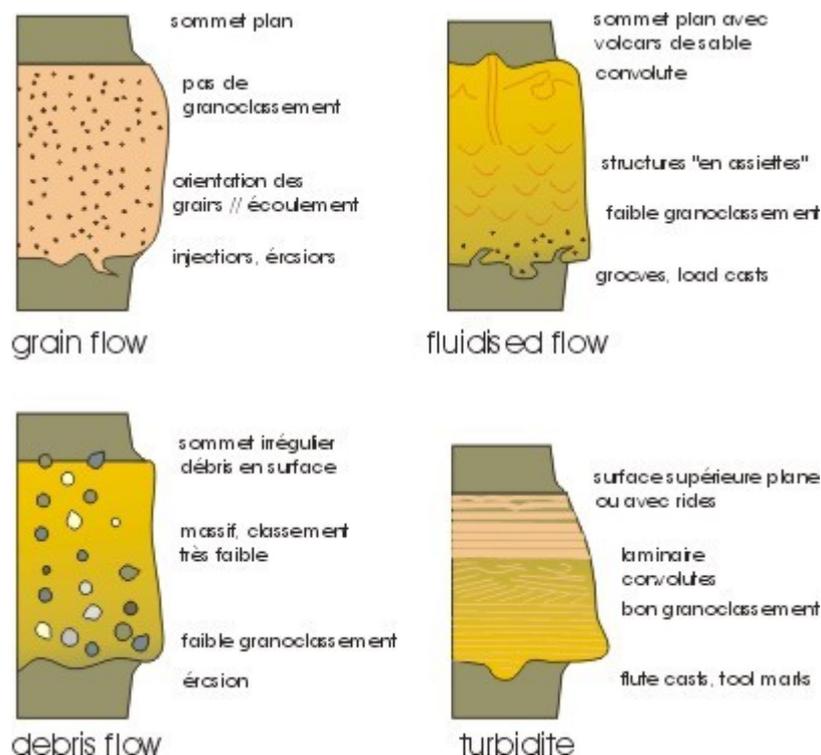


Fig. 11: lithologie, texture et figures sédimentaires des 4 types d'écoulements gravitaires.

3- Écoulement des fluides

a- écoulement laminaire- écoulement turbulent

La capacité d'un fluide à mobiliser et transporter des sédiments dépend de nombreux facteurs dont les principaux sont sa densité, sa viscosité et sa vitesse. Pour mémoire, la densité de l'eau de mer est d'environ $1,03 \text{ g/cm}^3$, celle de l'eau douce de 1 g/cm^3 , celle de la glace de $0,9 \text{ g/cm}^3$. Par contre, la densité de l'air est très faible, de l'ordre de $0,001 \text{ g/cm}^3$. En ce qui concerne la viscosité, celle de l'air est très faible, celle de la glace est élevée et celle de l'eau est intermédiaire. Les principales différences entre sédiments éoliens (sable fin et silt), glaciaires (galets, sable, boue) et alluviaux sont la conséquence de ces densités et viscosités distinctes.

La vitesse de l'agent de transport détermine le type d'écoulement : soit laminaire, ou turbulent.

- **écoulement laminaire : les filets d'eau restent parallèles entre eux**: ce régime tranquille est réalisé par exemple pour un écoulement d'eau étalé sur de grandes surfaces ainsi que pour des fluides visqueux comme les coulées boueuses.
- **régime turbulent, les filets d'eau se mélangent et forment des tourbillons** et ne restent plus parallèles entre eux et parallèles au fond. Ceci a une conséquence importante quant à la capacité d'érosion et de transport du fluide: la composante ascendante des tourbillons et filets d'eau maintient les sédiments en suspension ou favorise leur érosion.

Le "nombre de Reynolds" permet de mettre en évidence la transition écoulement laminaire-écoulement turbulent. Il est défini comme suit :

$$\mu Re = 2rV$$

où V est la vitesse du fluide; μ sa viscosité; r le rayon du "cylindre de fluide"; en surface, c'est la profondeur du chenal dans lequel se fait l'écoulement.

Pour des Re de 500 à 2000, l'écoulement est laminaire ; c'est le cas

- _ des glaciers (qui ne sont de bons agents de transport que parce que la viscosité élevée de la glace retarde le dépôt des sédiments), des écoulements aqueux sur de grandes surfaces ("sheet flows"),
- _ des fleuves à débit lent.

Pour des Re > 2000, l'écoulement est turbulent: c'est le cas de la plupart des rivières, des courants de turbidité et du vent. Il faut ajouter à ceci un effet particulier dû à la présence d'une couche-limite turbulente à proximité immédiate des substrats, même dans le cas d'un écoulement laminaire. Cette couche limite favorise l'érosion et le transport.

b- mise en mouvements des sédiments

La mise en mouvement d'une particule sur le fond peut être largement expliquée par le principe de Bernoulli. Brièvement, ce principe établit que la somme des vitesses et pression d'un fluide sur un objet doit être constante. En d'autres termes, cela signifie que quand la vitesse d'un courant s'accélère autour d'un objet, la pression diminue. L'illustration classique de ce principe est l'écoulement de l'air autour d'une aile d'avion: l'air passant au-dessus de l'aile parcourt un chemin plus grand et accélère; sa pression diminue donc par rapport à l'air circulant en dessous de l'aile et est responsable de l'apparition d'une force ascensionnelle. Ce phénomène est le même pour un grain au fond d'un chenal et est responsable de sa mise en suspension. Dès que le grain est en suspension, le trajet des lignes de courant devient symétrique et d'autres forces prennent le relais pour rendre compte de son transport.

c- transport des sédiments

Il y'a plusieurs modes de transport (Fig. 12). Il s'agit du :

- le roulement et de la traction le long du fond,
- la saltation (transport par bonds, suite à des chocs successifs)
- et le transport en suspension.

Les particules en mouvement par roulement, traction et saltation constituent la charge de fond ("bedload"), généralement formée de galets et de sable. La charge en suspension est surtout constituée d'argile et de silt. La charge en suspension des écoulements turbulents est beaucoup plus importante que celle des écoulements laminaires.

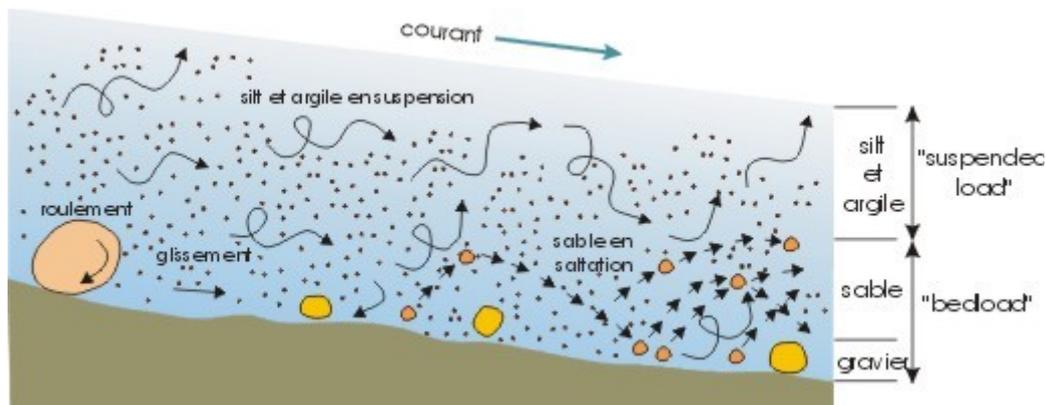


Fig. 12- modes de transport des particules dans un courant.

La granulométrie des particules sédimentaires a donc une influence majeure sur leur transport (et sur leur vitesse de sédimentation). Ces relations sont synthétisées par le diagramme de Hjulstrom (Fig. 13). Ce graphe (essentiellement basé sur des expériences en laboratoire) montre la vitesse minimale d'un courant nécessaire pour mobiliser, transporter et déposer des grains de quartz de granulométrie variable. Si l'on examine d'abord la partie supérieure de ce graphe (érosion des particules), la portion de la courbe représentant l'érosion des particules moyennes à grossières (sable fin à galets) semble logique: la vitesse du courant nécessaire pour mobiliser des grains augmente avec leur granulométrie. Pour les particules fines, par contre, la courbe montre une augmentation de la vitesse du courant avec la diminution de la granulométrie. Ce comportement paradoxal est la conséquence de la cohésion élevée des particules fines, surtout liée à un effet électrostatique. La partie inférieure du graphe montre la relation entre la granulométrie des particules et la vitesse du courant lors de leur dépôt.

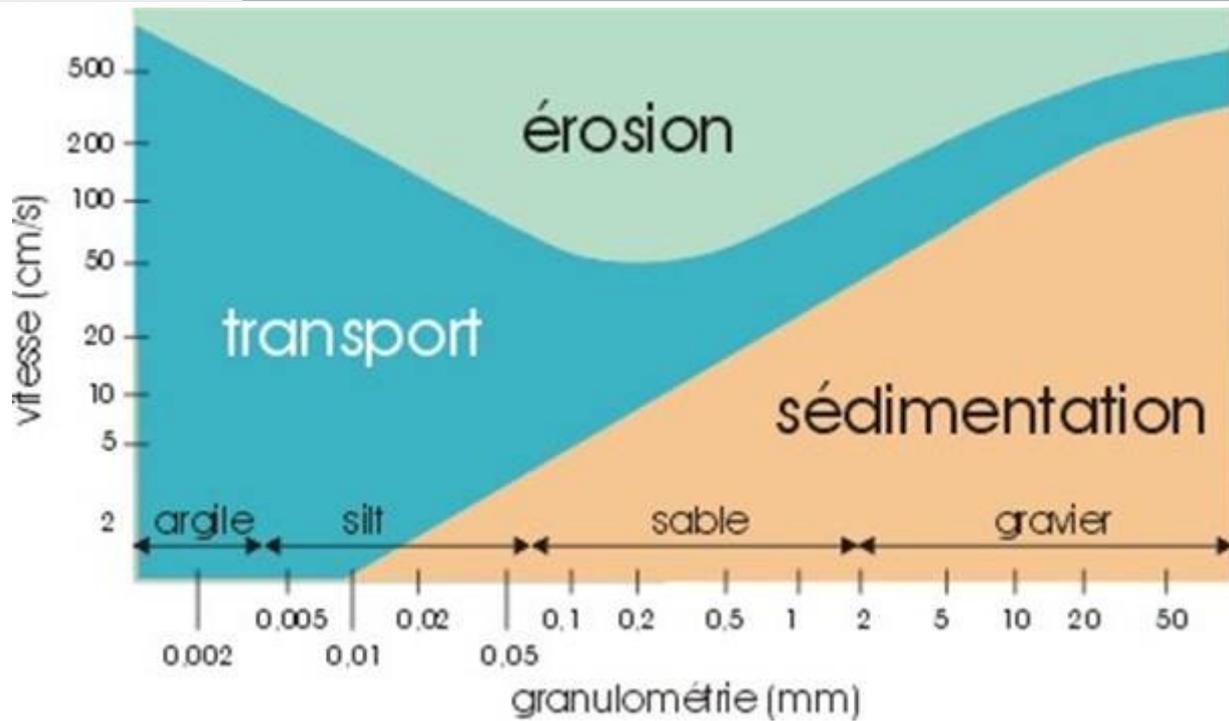


Fig. 13- diagramme de Hjulstrom.

L'action du transport est de continuer celle de l'altération (surtout de l'eau) et conduit un tri minéralogique et mécanique. Le tri minéralogique est fonction de la résistance à l'altération et à l'usure (exemple : le quartz, très dure, constitue la quasi-totalité des roches détritiques). L'usure des particules qui subissent des chocs conduit à l'arrondissement des cailloux (sphère), l'examen morphoscopique des grains permet d'évaluer l'usure et de donner une idée sur l'agent du transport