

SÉDIMENTATION GRAVITAIRE ET ENVIRONNEMENTS DU TALUS

MOTS-CLÉS

- ▶ Cônes sous-marins (*deep sea fans*).
- ▶ Glissements et coulées en masse, *slumps*, olistostromes.
- ▶ Courants de turbidité (faible et forte densité), turbidites.
- ▶ Séquences de Stow, de Bouma, de Lowe, faciès gravitaires de Mutti, faciès de dépôts, faciès de transit, courants de contour, contourites, flyschs.
- ▶ BSR (*bottom simulating reflectors*), hydrates de gaz.

Du fait de la pente « relativement forte », le rebord de la plate-forme et le talus continental sont le siège d'une grande instabilité sédimentaire. Les sédiments, sous forme de **glissements en masse** ou de **courants de turbidité** (*fig. 28.6*), dévalent alors la pente ou suivent le cours des canyons sous-marins qui l'entament (*fig. 31.1*) sous l'effet de la gravité. Ils s'accumulent à leur débouché édifiant de vastes **éventails ou cônes sous-marins** (*deep sea fans*). Au fur et à mesure qu'ils s'accumulent, les sédiments gravitaires font progresser le talus vers le large.

31.1 LES PHÉNOMÈNES GRAVITAIRES

Les phénomènes gravitaires sont nombreux et variés, ils forment un continuum caractérisé par une participation croissante des fluides aux processus. On peut toutefois distinguer deux lignées suivant que le matériel déplacé garde ou non sa cohésion (*fig. 31.2*) ; dans les deux cas, la dilution par les fluides aboutit aux **courants de turbidité**.

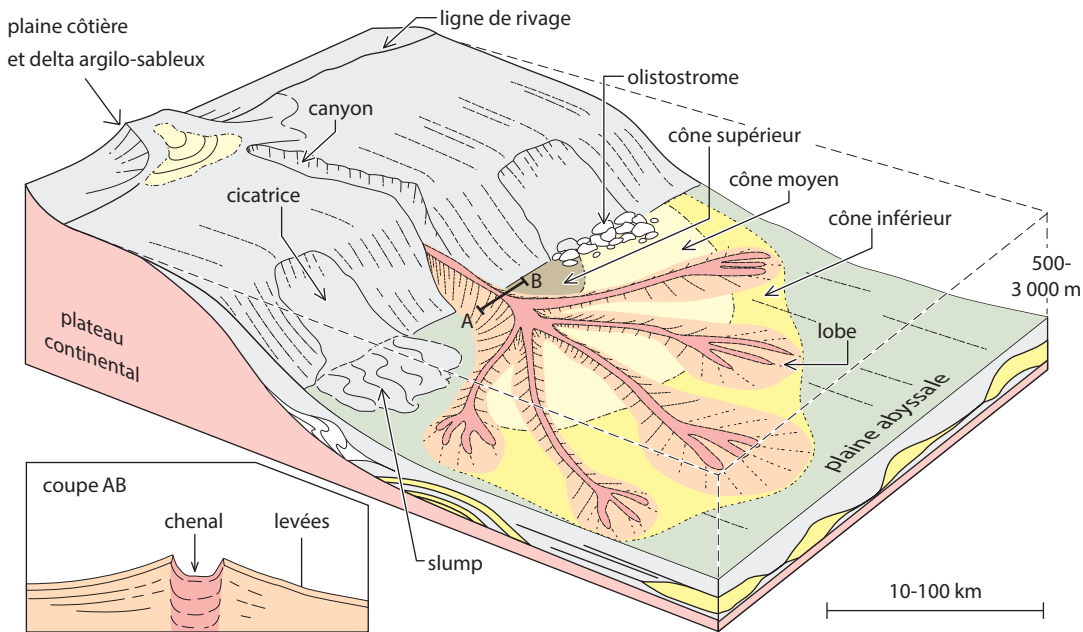


Figure 31.1 Modèle de dépôt d'un cône sous-marin et processus gravitaires sur le talus.

Dans ce modèle, le cône se développe à partir d'une source unique de matériaux argilo-sableux apportés par un delta et convoyés par un canyon sous-marin.

31.1.1 Les processus gravitaires

De manière générale, on peut distinguer, en fonction de la cohésion du matériel, de l'implication croissante des fluides et des modes transport/mise en suspension du matériel (fig. 31.2 A et B) :

- **Les écoulements** caractérisés par un dépôt de blocs détachés de la plate-forme, plus ou moins brisés et la formation de brèches chaotiques. La reptation, processus lent et continu de glissement superficiel, est sans doute très sous estimée car elle aboutit à des dépôts homogènes à déformations minimales.
- **Les glissements accompagnés de déformations (slumping)**. Les **slumps** (fig. 31.2 C) présentent des déformations (plis, failles, chevauchements) à ne pas confondre avec des figures tectoniques mais le matériel a glissé sur une distance relativement faible et a conservé sa structure interne (stratification) ;
- **Les glissements en masse (sliding)** sur une distance pouvant atteindre plusieurs kilomètres d'une énorme coulée bréchique (**olistostrome**, fig. 31.2 D et E) constituée de blocs plus ou moins importants (**olistolites**, fig. 31.2 E). Par fluidisation du matériel, on passe progressivement aux **coulées en masse (mass flows)** correspondent au déplacement en masse d'un matériel dont la cohérence est de plus en plus faible. On distingue suivant le mécanisme de transport et de maintien en suspension des éléments et la granulométrie de ceux-ci (fig. 31.3) :
 - les **coulées de particules (grain flow)**, sortes d'avalanches en écoulement granulaire (les grains sont soumis à des forces de pression dispersives) donnant une sédimentation massive (**avalanchite**) ;

 Voir § 26.4.1

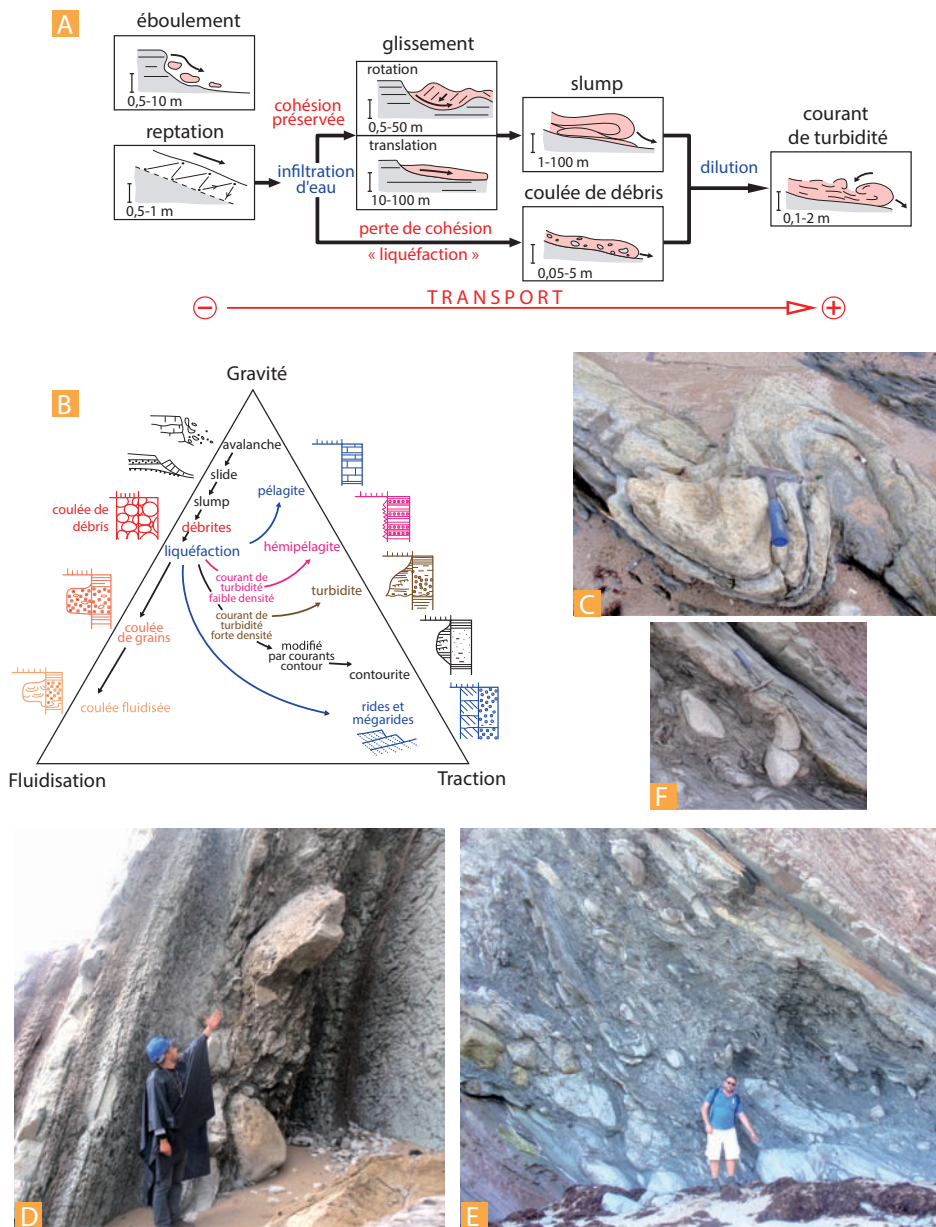


Figure 31.2 Les phénomènes gravitaires et dépôts associés (Photographies M. Renard).

A. Les différents processus gravitaires. Il existe un continuum entre les différents processus qui correspond à une cohésion de moins en moins importante du matériel mobilisé liée notamment à l'importance croissante du rôle joué par les fluides au cours du transport.

B. Classement des différents dépôts sédimentaires en domaine océanique profond en fonction de l'importance relative des processus mis en jeu : gravité, fluides et traction (force considérée parallèle au déplacement du courant).

C. Slump de calcaires de bordure de plate-forme glissés dans les hémipélagites du Crétacé supérieur (baie de Loya, Hendaye, France).

D, E et **F.** Olistostromes (coulées en masse) intercalés dans les marnes hémipélagites du Crétacé supérieur (baie de Loya, Hendaye, France). Les blocs métriques de calcaires gris-vert correspondent à un calcaire à Pithonelles (environnement de bordure de plate-forme) du Crétacé supérieur. Ces calcaires sont connus en place dans la région de Dax (carrières de Tercis), à 80 km au nord de la baie de Loya. Le détail du passage (**F**) avec les hémipélagites supérieures met en évidence la plasticité du matériel au moment du dépôt.

- les **coulées de débris** (*debris flow*). Ce sont des mélanges très hétérométriques dont les éléments (des blocs aux graviers) sont portés par une matrice de silts argileux et d'eau. Leur sédimentation aboutit à des conglomérats mal classés ou **débrites** ;
- les **coulées fluidisées**, coulées de particules très diluées par une phase liquide, en voie d'expulsion, qui maintient les grains en suspension. Elles forment une sorte de boue dans laquelle l'eau est animée d'un mouvement ascendant (**figures d'échappement d'eau en assiette** (*dish structure*), volcans de boue). Il s'opère un classement horizontal et vertical en fonction de la vitesse du courant ; la séquence qui en résulte est voisine de celle des turbidites ;

 Voir fig. 28.11

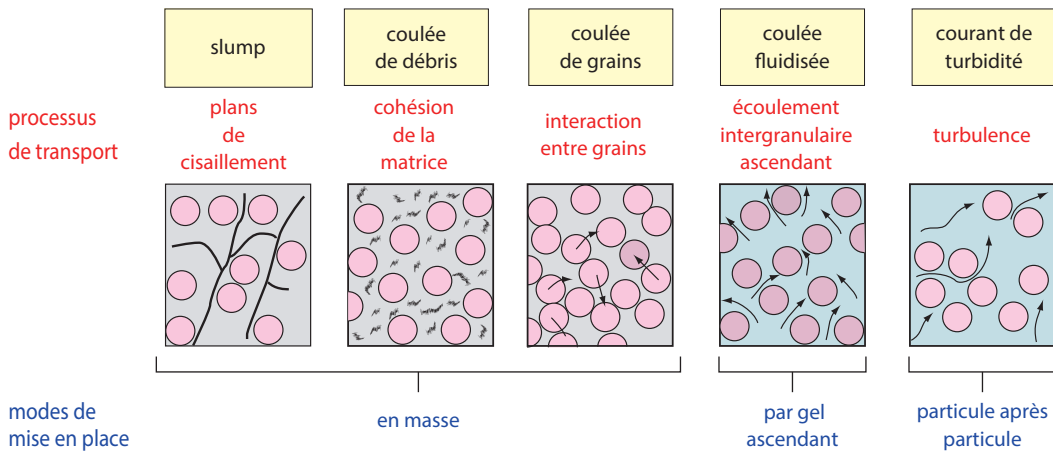


Figure 31.3 Processus de transport, mécanismes de cohésion et de mise en place des différents types de dépôts gravitaires.

- les **courants de turbidités** (*turbidity flow*) ou de densité. Il s'agit de courants d'une densité supérieure au fluide ambiant constitués d'un mélange de particules de dimensions variables en suspension dans un liquide turbulent. Les caractéristiques hydrodynamiques des courants de turbidité ont été décrites au chapitre 28. Les tris qui s'opèrent au cours du déplacement conduisent à une séquence sédimentaire (**la séquence turbiditique : séquence de Stow, de Bouma et de Lowe**, fig. 31.4), à base nette et limite supérieure graduelle, constituée de dépôts par **traction** et de dépôts par **décantation**.

 Voir fig. 28.6

31.1.2 Les mécanismes déclencheurs des phénomènes gravitaires

Ces glissements et courants résultent d'instabilité sédimentaire. Leur mise en mouvement peut être déclenchée par différents processus : séismes, tempêtes, mouvements tectoniques mais aussi simple accumulation sédimentaire ou une surcharge, foisonnement ou encore remaniement interne du sédiment par suite de compaction. Les séismes sont sans aucun doute un processus majeur et certains utilisent la fréquence des dépôts turbiditiques comme indice de **paléosismicité**.

La conjonction séisme-glissement a permis de montrer que la vitesse de ces courants de turbidité peut être très importante (glissement du grand banc de Terre-Neuve en 1929, fig. 28.6 B). Cependant, les séismes ne sauraient être les seuls déclencheurs, la simple accumulation sédimentaire en bordure de la plate-forme ou dans la partie haute du talus peut aboutir à une instabilité. Depuis quelques années, des mécanismes de dégazage internes aux sédiments sont suspectés.

 Voir encart 28.6

Encart 31.1 – Hydrates de gaz et glissement gravitaire

La mise en évidence des **BSR (bottom simulating reflectors)**, pseudo-rélecteurs sismiques parallèles au fond de la mer, est reliée à la présence, en quantité importante dans les sédiments marins d'hydrates de gaz, c'est-à-dire de méthane et de molécules d'eau sous forme cristalline solide, en raison de la pression élevée et de la faible température des eaux. Dans l'océan actuel, ces hydrates sont stables pour des profondeurs supérieures à – 300 m (*fig. 36.22B*) mais toute augmentation de la température ou toute *diminution de la*

profondeurs sont susceptibles de les déstabiliser et de conduire à une libération importante de gaz dans les sédiments (la déstabilisation de 1 m³ de méthane hydrate libère environ 140 m³ de méthane gazeux). Ces gaz produiraient un foisonnement et un niveau de décollement favorisant le glissement. La baisse du niveau marin entraînant une diminution de pression qui déstabilise les hydrates de gaz, on pourrait ainsi expliquer une donnée de la stratigraphie séquentielle : la fréquence des dépôts gravitaires dans le *cortège de bas niveau*.



Voir chap. 35.8,
fig. 35.19

31.2 LES SÉQUENCES GRAVITAIRES

Du point de vue sédimentologique, les dépôts accumulés sous l'action de courants gravitaires turbiditiques présentent une continuité latérale très importante, de l'ordre de plusieurs kilomètres. La bonne connaissance des comportements physiques de ce type d'écoulement associée aux observations de terrain permet de définir des successions sédimentaires types (séquences) correspondant à un événement gravitaire donné. Ces séquences, dites turbiditiques, diffèrent les unes des autres par la granulométrie des particules transportées car elles résultent d'écoulements de densité différentes (*fig. 31.4A*).

31.2.1 La séquence turbiditique de Stow

La **séquence de Stow** (1980) est la moins épaisse et celle qui est composée des sédiments les plus fins (argiles et silts, *fig. 31.4*). Elle est donc naturellement considérée comme correspondant à un écoulement de faible densité et se déposant dans la partie la plus distale du cône sous-marin (*fig. 31.5*). Dans sa définition idéale, la séquence de Stow comporte 8 termes : T0 à la base à T8 au sommet, l'ensemble présentant un granoclassement décroissant. La base de la séquence est légèrement érosive et présente quelques structures de type convolutes et laminations lenticulaires (T0 à T3). Dans le reste de la séquence, qui correspond à une diminution de la vitesse de l'écoulement, seules quelques laminations de matériel très fin peuvent s'observer. La séquence de Stow peut se résumer ainsi :

- T0 : base légèrement érosive et lenticulaire ;
- T1 : lamines avec quelques convolutes ;
- T2 : lamines ondulées ;
- T3 : laminations fines et régulières ;
- T4 : laminations peu visibles ;
- T5 : laminations légèrement silteuses ;
- T6 : lentilles silto-boueuses stratifiées ;
- T7 : boue non stratifiée ;
- T8 : boue micro-bioturbée.

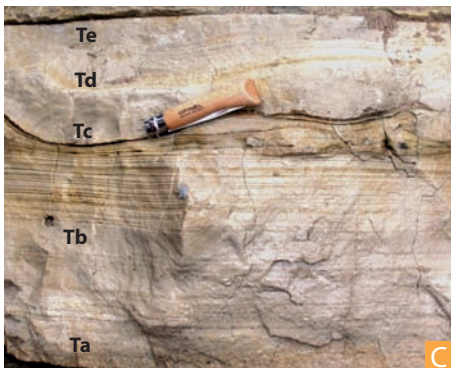
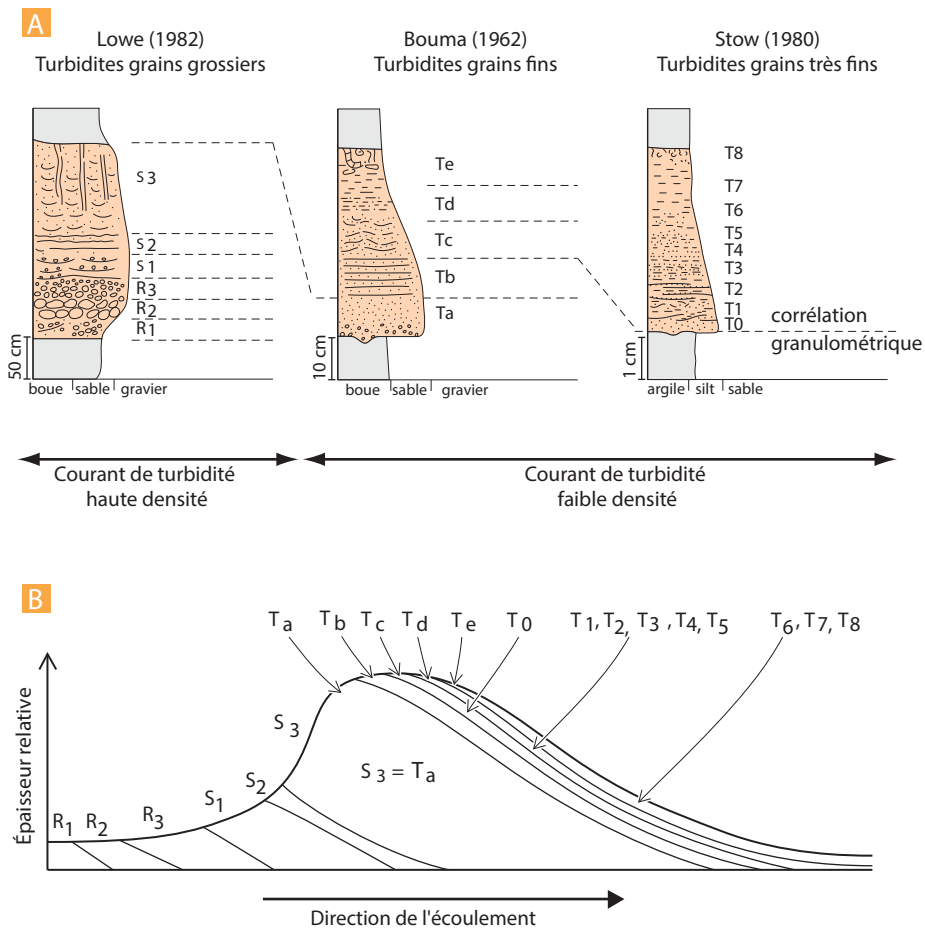


Figure 31.4 Les séquences gravitaires turbiditiques.

A. Les trois séquences turbiditiques sont alignées selon la direction de l'écoulement. La corrélation indiquée n'est basée que sur l'aspect granulométrique des dépôts.

B. Enchaînement théorique des trois séquences turbiditiques le long d'un seul et même événement gravitaire, épaisseurs relatives des différents termes (vision essentiellement dynamique des dépôts).

C. La séquence de Bouma : exemple dans le flysch Éocène inférieur de Bidart (Pyrénées Atlantiques, France).

D. La séquence de Lowe : exemple de la partie sableuse dans la série des hémipélagites du Crétacé supérieur de la Baie de Loya (Hendaye, Pyrénées Atlantiques, France). (Photos : M. Renard).

31.2.2 La séquence turbiditique de Bouma

La **séquence de Bouma** (1962) est sans doute la séquence gravitaire type la plus connue mais elle ne rend compte que d'une partie des processus gravitaires (dépôts de granulométrie moyenne). Cette séquence, décimétrique à métrique, comprend de bas en haut cinq termes déposés dans un contexte d'énergie décroissante (*fig. 31.4 A et C*) :

- Ta : c'est un terme grossier granoclassé (granodécroissance) constitué de sable grossier (rudites à arénites). Il présente assez fréquemment des figures de base de banc (érosion, figures de charge et de courant, pistes) ; il peut contenir des fossiles allochtones (Foraminifères benthiques par exemple). L'hydrodynamisme du dépôt est fort (régime d'écoulement supérieur, domaine des antidunes) ;
- Tb : terme moins grossier (sables moyens à fins) à laminations horizontales parallèles. L'hydrodynamisme, moins fort, correspond au domaine des lits plats supérieurs ;
- Tc : terme plus fin (sables fins à silt grossiers) à stratifications obliques, rides de courant, convolutes et figures d'échappement d'eau (structure en cupules). L'hydrodynamisme correspond au domaine des mégarides et des rides ;
- Td : terme fin, silto-argileux, à lamines parallèles. L'hydrodynamisme est faible (domaine des lits plans inférieurs), la sédimentation se fait à la fois par traction et décantation ;
- Te : terme pélitique, dépourvu de structure, à faune autochtone et bioturbations, correspondant à une sédimentation gravitaire fine, par décantation (queue de turbidite) mélangée à la sédimentation pélagique.

La séquence de Bouma complète ne s'exprime que dans l'axe des chenaux secondaires du cône médian (**turbidites proximales**, *fig. 31.5*). En se déplaçant latéralement au niveau des levées du chenal, la partie grossière de la séquence (termes **Ta** et **Tb**) disparaît, les séquences ne comportent plus que les niveaux fins (**Tc** à **Te**). Il en est de même plus au large, au niveau du cône externe (**turbidites distales**, *fig. 31.5*) où les séries turbiditiques, composées d'un empilement de termes **Tc** et **Td** puis uniquement de termes **Te**, passent graduellement aux hémipélagites et pélagites de la plaine abyssale.

Dans la partie haute du cône, au niveau du chenal principal (*fig. 31.5*), on observe que des dépôts très grossiers de coulées de débris conglomératiques, la plupart du temps, désorganisés et de **fluxoturbidites**, turbidites très proximales, grossières et mal classées. Sur les bords, les faciès de levées, correspondant aux débordements du chenal, ne comprennent que les termes fins (Td et Te).

31.2.3 La séquence turbiditique de Lowe

Afin de rendre compte de l'ensemble des dépôts turbiditiques, il convient d'ajouter aux séquences de Stow et de Bouma correspondant aux **courants turbiditiques de faible densité**, la séquence de Lowe (1982) qui correspond aux **courants turbiditiques de forte densité** et comporte du matériel relativement grossier (graviers à sables) en plus du matériel fin. La séquence type est donc composée de dépôts sableux massifs et de turbidites plus épaisses (*fig. 31.4 A et D*). Les dépôts sont influencés par des forces de traction à la base puis de manière plus ou moins progressive par des processus de décantation. La terminologie utilisée pour décrire les différents termes de cette séquence diffère en fonction de la granulométrie dominante : R1 à R3 pour les séquences conglomératiques et S1 à S3 pour les dépôts sableux (*fig. 31.4 D*). La séquence de Lowe peut parfois se trouver coiffée par une turbidite sableuse de faible densité de type Bouma *pro parte*. De la base au sommet, la séquence de Lowe est composée de :

- R1 : graviers à stratifications planes et obliques ;
- R2 et R3 : séquences de granoclassement inverse (conglomérats à graviers) ;



Voir fig. 28.13

- S1 : sables grossiers à moyens avec structures en auges ;
- S2 : laminations de sables moyens ;
- S3 : suspension et figures d'échappement d'eau.

Les séquences turbiditiques sont rarement complètes. D'une part une séquence peut être érodée par la suivante (disparition des termes sommitaux) et d'autre part, l'énergie du courant ne permet pas toujours son développement (fig. 31.5).

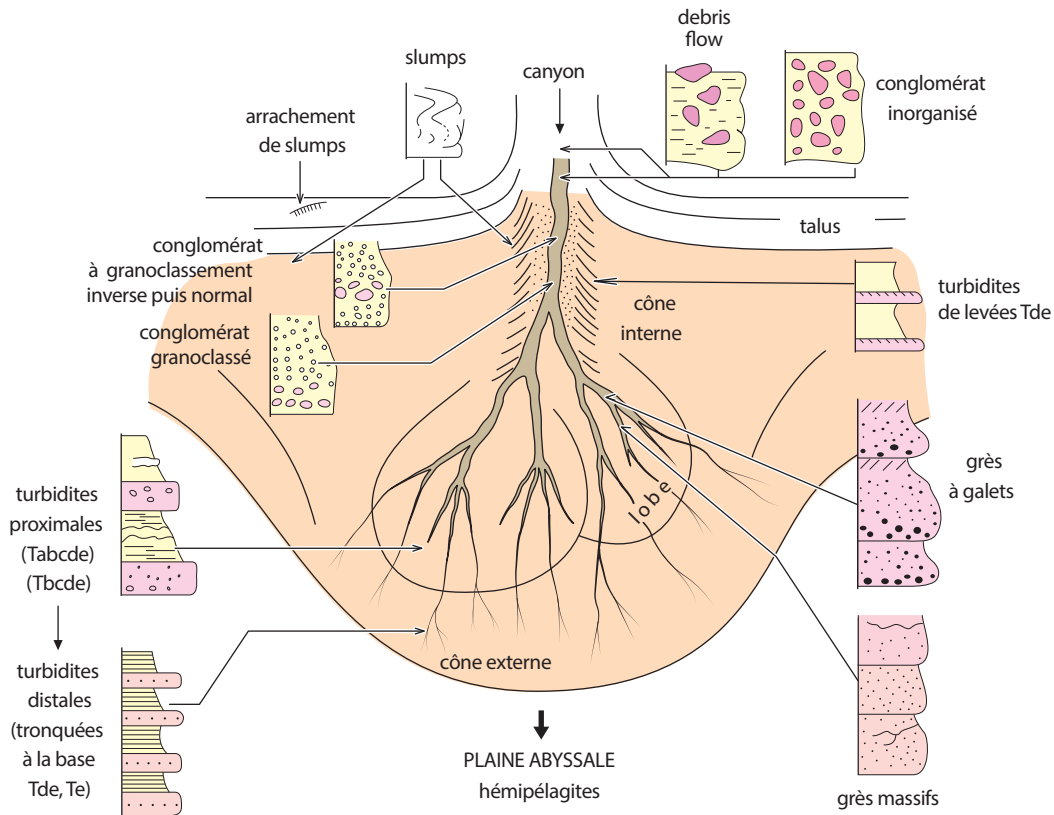


Figure 31.5 Variation de l'expression sédimentaire des différentes séquences gravitaires à l'échelle du cône sous-marin.

31.3 LES SÉRIES GRAVITAIRES

Les séries gravitaires sont constituées de l'empilement de séquences élémentaires types vues précédemment, plus ou moins tronquées. Le caractère principal de la sédimentation gravitaire est son aspect **discontinu dans le temps**. La durée du dépôt est très brève (le temps de la décantation d'une bouffée turbide) et **l'épaisseur de la séquence n'a aucune relation avec le temps, elle dépend uniquement de la quantité de matériel mobilisée**. Dans une série gravitaire, les interturbidites (hémipélagites souvent très peu épaisses) représentent toujours un temps beaucoup plus important que les séquences de turbidites (qui peuvent pourtant être très développées).

Encart 31.2 – Flyschs et molasses

On distinguait classiquement les **flyschs** (fig. 31.6), séries gravitaires constituées d'empilements de séquences de Bouma plus ou moins tronquées, anté et syntectoniques (donc concordantes), particulièrement bien représentées dans les domaines orogéniques alpins et les **molasses**, formations d'avant-pays qui peuvent être du même type, mais post-tectoniques (discordantes). Cette distinction n'est pas pertinente du point de vue sédimentologique car le terme de molasse recouvre des sédimentations très variées, allant du domaine continental au domaine marin et dont la majorité n'a rien à voir avec les processus gravitaires.



Figure 31.6 Le flysch Éocène de Zarautz (Pays basque espagnol).

Il correspond à l'alternance monotone de dépôts hémipélagiques de type marnes et calcaires dans lesquels s'intercalent de très nombreuses turbidites gréseuses (termes c.d.e principalement) d'épaisseurs variables. Il représente la transition entre le cône externe et la plaine abyssale. (Photo L. Le Callonnec). Le lecteur pourra trouver d'autres exemples de flysch à la fig. 14.15.

31.3.1 L'organisation séquentielle des dépôts dans le cône sous-marin

Les séries gravitaires montrent une organisation verticale permettant de distinguer deux ensembles (fig. 31.7). Un premier, correspondant aux dépôts avals (plaine abyssale, cône inférieur, partie inférieure et moyenne du cône moyen), est caractérisé par la prédominance des sédiments fins (décantation) par rapport aux sédiments gravitaires plus grossiers qui s'organisent en **séquences stratocroissantes** (leur épaisseur augmente par rapport à celles des couches de sédiments fins) et **granocroissantes** (leur granulométrie devient plus forte). Les dernières séquences se terminent par des niveaux ravissants. Le second correspond à la partie haute du cône moyen et au cône supérieur, il est caractérisé par la prédominance, en corps chenalisants, des sédiments grossiers (flots de débris, conglomérats) organisés en séquences **stratodécroissantes** et **granodécroissantes**.

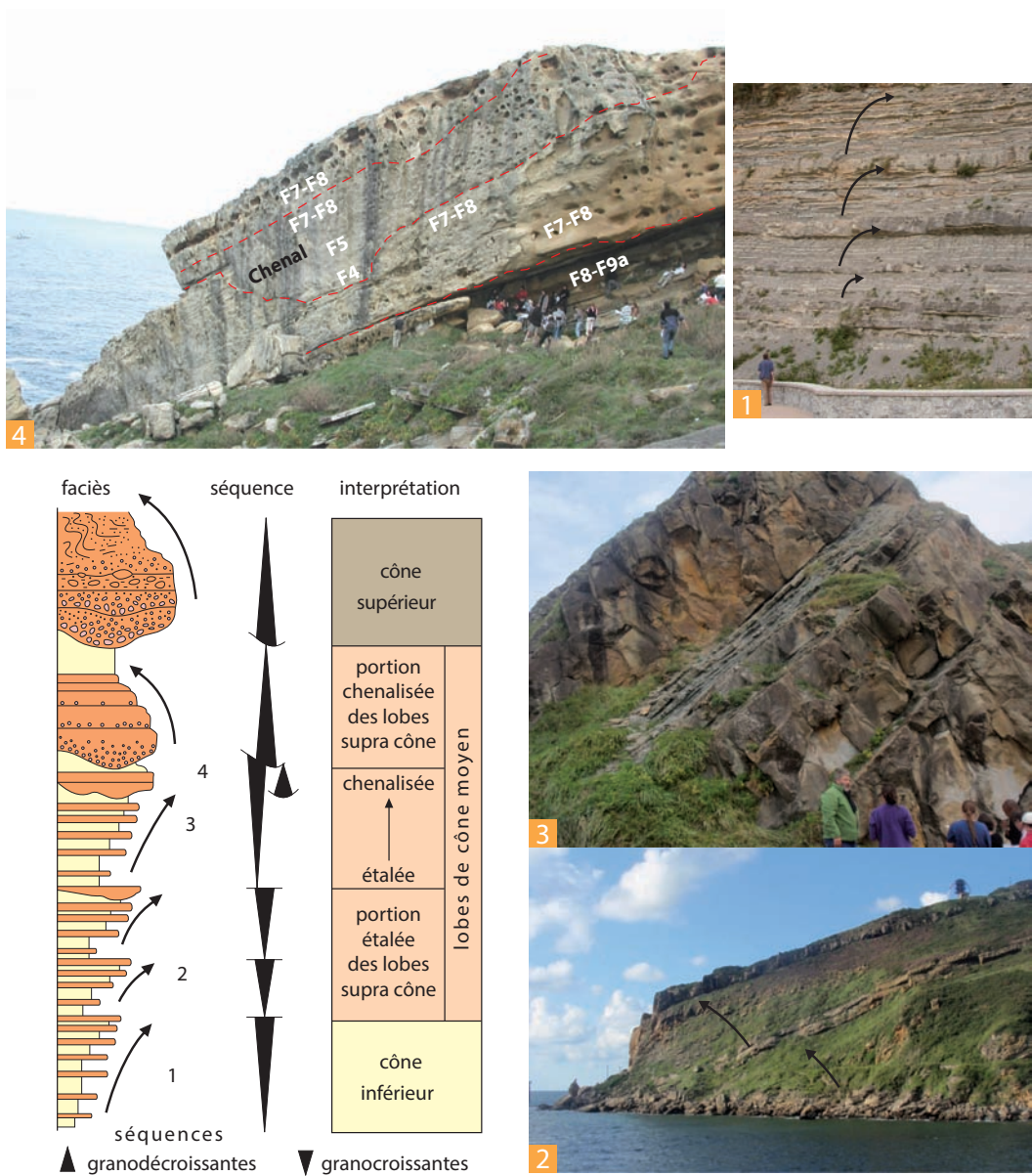


Figure 31.7 Modèle d'organisation verticale des séquences dans un cône sous-marin.

Ce modèle, basé sur l'étude d'affleurements anciens, est potentiellement remis en cause par les données de la sismique obtenues sur les cônes actuels qui montrent l'absence de lobes terminaux et l'importance des systèmes chenaux-levées. Les numéros, en face de la coupe, indiquent le positionnement approximatif des photos dans la série. Les exemples sont pris dans l'Éocène inférieur du Pays basque espagnol (province Gipuzkoa).

La photo 1 illustre le passage de la plaine abyssale au cône inférieur (Hondarabia). La photo 2 présente des séquences strato- et grano-croissantes (Ria de Pasaïa, massif du Jaizkibel). La photo 3 illustre les séquences sableuses amalgamées (plage d'Orio). La photo 4 (massif du Jaizkibel, Cap du Figuier) montre l'un des chenaux imbriqués remplis de sédiments de granulométries grossières, grano-décroissantes (faciès F4 à F9 selon la terminologie de Mutti, fig. 31.8), caractéristiques du cône moyen et supérieur. (Photos M. Renard).

31.3.2 Les faciès gravitaires de Mutti

Mutti (1992) a tenté d'établir une synthèse des phénomènes gravitaires tentant de prendre en compte d'une part l'ensemble des faciès connus et d'autre part de les relier aux variations de l'hydrodynamisme et plus particulièrement à celles liées aux modifications de la topographie de la pente (fig. 31.8).

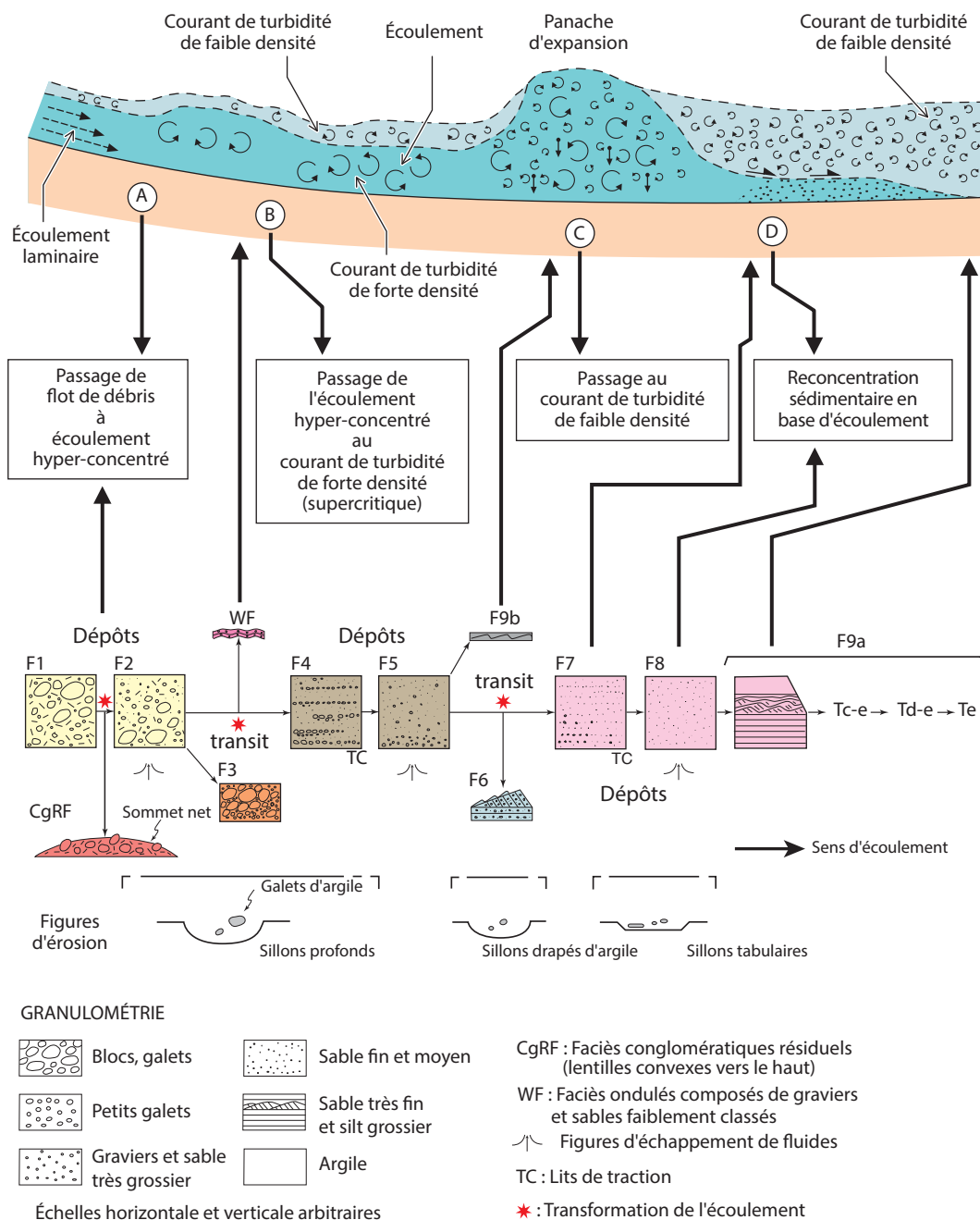


Figure 31.8 Modèle d'enchaînement des faciès gravitaires de Mutti (1972) et de leurs relations avec les fluctuations des conditions hydrodynamiques de l'écoulement au cours de la progression des coulées gravitaires sur la pente.

Se rapporter au texte pour les caractéristiques des différents faciès F1 à F9.

Neuf faciès (F1 à F9) ont été individualisés, ils se répartissent en deux grands types : les **faciès de dépôt** (faciès très grossiers : F1-F2, faciès grossiers : F4-F5 et faciès fins : F7-F9) et les **faciès de transit** (F3 et F6). On passe d'un type à l'autre lors de transformation de l'écoulement au cours de la descente sur la pente à la faveur des ressauts topographiques (fig. 31.8). Ainsi, les faciès très grossiers (F1-F2 : conglomérats à matrice) correspondent aux dépôts de flots de débris et d'écoulements hyperconcentrés, les faciès grossiers (F4-F5 : cailloutis et sables grossiers) à des dépôts de courants de turbidités de forte densité et les faciès fins (F7-F9 : sables moyens à fins, silts et boues) à des dépôts de courants de turbidité de moyenne et faible densité.

La séquence de Lowe (partie basale) s'exprime principalement dans les faciès F4 et F5 ; celles de Bouma et de Stow dans les faciès F7 à F9.

Les zones de transits sont caractérisées par des figures d'érosion, par des faciès particuliers (dépôts conglomératiques résiduels : F3, litages et rides : F6) ou par une absence de dépôts.

Ainsi, en fonction de la masse sédimentaire mobilisée dans le glissement, de sa granulométrie initiale et de la distance parcourue par la coulée, la succession des faciès sera complète ou non, continue ou non (fig. 31.9). Pour les granulométries grossières, les différents faciès (F1, F2, F4 et F5) sont accolés et se succèdent rapidement, le corps turbiditique se terminant par un drapage de faciès fins F9b. Au fur et à mesure de la baisse de la granulométrie, on observe une ségrégation des différents types de faciès et un développement des zones de transit. Pour les granulométries les plus fines, on observe le faciès F9a, à l'intérieur duquel se déclinent, après une très longue migration sans dépôts, les différents termes supérieurs de la séquence de Bouma.

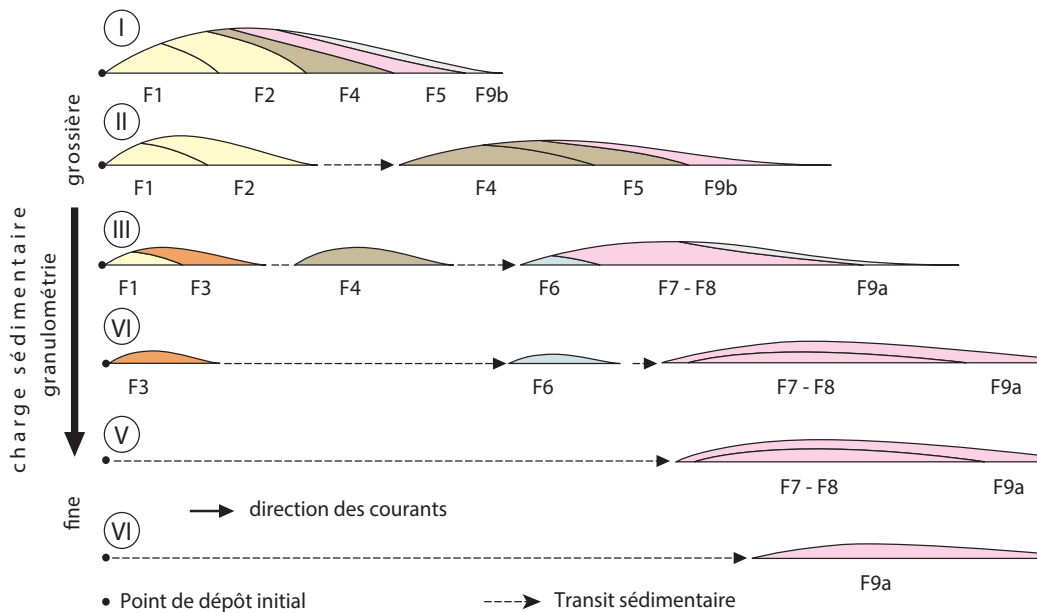


Figure 31.9 Répartition des faciès dans les corps turbiditiques en fonction de la granulométrie initiale de la bouffée gravitaire et de la distance de transport.

Au fur et à mesure de la baisse de la charge sédimentaire et de sa granulométrie, on observe une disparition progressive des faciès grossiers, un étalement du domaine de chaque faciès et une séparation spatiale des différents types avec un développement des zones de transit. On pourra comparer ce schéma avec celui de l'enchaînement théorique des séquences de Lowe, de Bouma et de Stow (fig. 31.4).

Alors que les glissements en masse et les courants de turbidité sont perpendiculaires au rebord de la plate-forme littorale, il se développe au pied des talus des courants qui leur sont parallèles et qui suivent les contours du relief océanique (**courants de contour**). Ils peuvent reprendre le matériel sédimentaire pélagique ou gravitaire pour donner des dépôts (les **contourites**) où les figures de rides et de mégarides sont fréquentes. Les contourites sont principalement caractérisées en sismique (fig. 31.10 A). Au niveau des faciès, la bioturbation masque souvent les structures. Néanmoins, une séquence type, dite de Stow-Faugère, a été proposée (fig. 31.10 B).

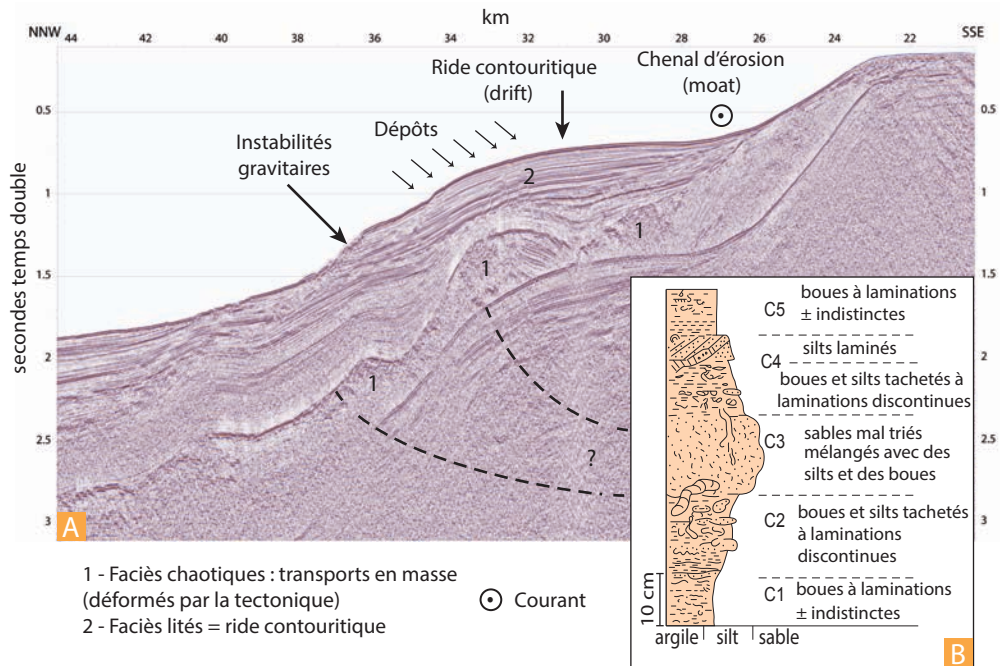


Figure 31.10 Les contourites.

A. Aspect en sismique d'une ride contouritique en mer d'Alboran. (Campagne océanographique MARLBORO, d'après E. d'Acremont et C. Gorini, UPMC, Paris.)

B. La séquence contouritique dite de Stow-Faugère. La caractéristique principale de cette séquence est sa symétrie par rapport au terme C3.

À retenir

- Le rebord de la plate-forme et le talus sont le siège d'instabilités sédimentaires : les sédiments peuvent dévaler la pente ou être canalisés dans les canyons sous-marins et s'accumuler à leurs débouchés sous forme de cônes sous-marins.
- En fonction de la cohésion du matériel et de la quantité croissante de fluides mobilisés, on distingue les écroulements, les slumps, les glissements et coulées en masses et les courants de turbidités.
- L'activité sismique est un déclencheur majeur des processus gravitaires mais le rôle de foisonnements intrasédimentaires, liés à une déstabilisation d'hydrates de gaz, est fortement suspecté.
- Les sédiments turbiditiques s'organisent en séquences dites de Stow, de Bouma et de Lowe (en fonction de la granulométrie), qui combinent des dépôts par traction (dans la partie inférieure) et par décantation (partie supérieure).

- Ces séquences ne s'expriment que dans la partie moyenne distale du cône, aussi pour rendre compte de l'ensemble des processus gravitaires, Mutti a défini un enchaînement de 9 faciès qui traduit les modifications de l'hydrodynamisme au cours d'un glissement gravitaire. Les faciès grossiers (F1-F2) correspondent aux flots de débris et aux écoulements hyperconcentrés, les faciès moyens (F4-F5) aux courants de turbidités de forte densité et les dépôts fins (F7 à F9) aux courants de moyenne et faible densités. La partie basale de la séquence de Lowe s'exprime dans les faciès F4 et F5, celle de Bouma dans les faciès (F7 à F9).