

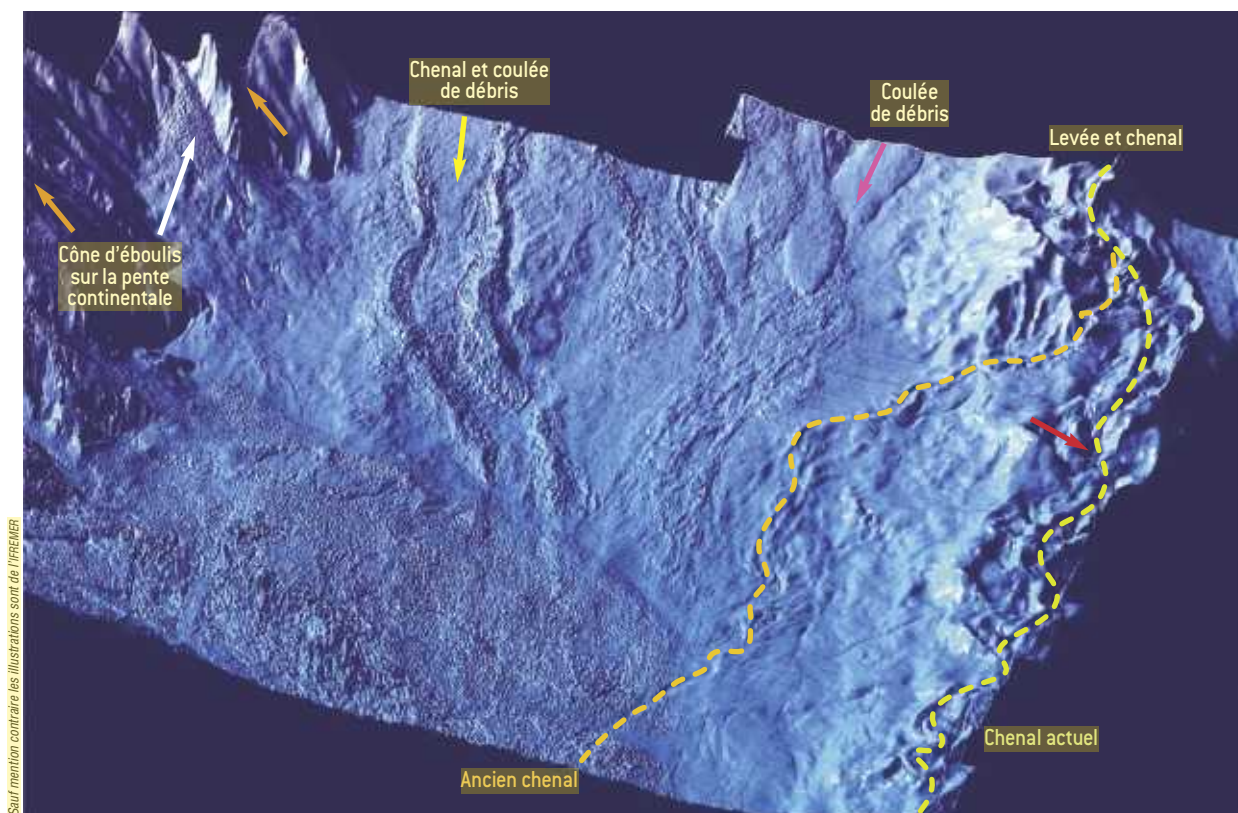
– jusqu’à 2500 kilomètres – donnent une idée de la distance parcourue par ces avalanches. En outre, étant donné la profondeur de ces vallées et la hauteur de leurs flancs (constitués de sédiments déposés par les courants qui débordent), on estime que les courants sont épais de plusieurs centaines de mètres. Ainsi, les masses transportées par les avalanches dans ces vallées sont gigantesques : elles se mesurent parfois en millions de mètres cubes. Celle de 1929 à Terre-Neuve couvrit ainsi 150 000 kilomètres carrés (quatre fois la Bretagne) d’une couche de près d’un mètre d’épaisseur...

Quel mécanisme explique un phénomène d’une telle ampleur ? Rappelons qu’en général, la zone côtière se prolonge sous la mer par un plateau plus ou moins avancé, caractérisé par une profondeur d’eau inférieure à 100-200 mètres. Ce plateau est dominé par l’action des marées, de la houle et des tempêtes. Au large, il est bordé par un talus escarpé entaillé par des canyons, dont les pentes surplombent les grands fonds océaniques (la profondeur moyenne des océans est d’environ 4000 mètres).

Ce décor posé, imaginons une particule de terre arrachée à une montagne par la pluie. En quelques semaines ou en quelques siècles, *via* rivières et fleuves, cette particule atteint la mer. Son voyage ne s’arrête pas là, car, petit à petit, marées et courants marins évacuent les sédiments fluviaux, mais aussi éoliens vers le sommet du talus continental. Progressivement, les sédiments s’accumulent au bord de l’abîme, forment des amas de plus en plus instables, qui finissent par dévaler la pente. Ces mouvements sont simi-

laire aux glissements de terrain qui se produisent à terre ou encore aux processus pyroclastiques des éruptions volcaniques explosives (des nuées ardentes dévalant les pentes). Toutefois, c’est surtout avec les avalanches de neige que l’analogie est frappante : l’accumulation rapide de sédiments (l’équivalent de fortes chutes de neige) forme un manteau mal consolidé en haut d’une pente, qui finit par s’écrouler, soit parce que le seuil de stabilité est dépassé, soit sous l’influence d’une stimulation extérieure (un séisme). Cette similitude explique que les études de risques en mer reprennent souvent les méthodes utilisées pour les avalanches de neige (recherche des pentes fortes, estimation des épaisseurs de sédiments non consolidés, etc.). Toutefois, à la différence des avalanches de neige, les avalanches sous-marines se produisent aussi sur des pentes très faibles (moins de un degré) et prennent facilement des proportions gigantesques.

De fait, les mouvements d’eau qu’elles déclenchent sont souvent si importants qu’ils engendrent des tsunamis en surface. Ce fut par exemple le cas en 1929 à Terre-Neuve (voir l’encadré page 42) ou en 1979 à Nice. Il est très vraisemblable que le séisme du 26 décembre 2004 à Sumatra (magnitude 9) a déclenché de grandes avalanches. Nous ignorons quelle fut leur contribution au tsunami, mais nous observons que les séismes pratiquement aussi puissants (magnitudes 8,6 et 8,7) qui secouèrent à nouveau la région le 28 mars 2005 n’ont pas créé de raz-de-marée. D’après certains sismologues, cela s’explique par des mouvements de l’écorce terrestre plus horizontaux que verticaux.



Surf merion contre les illustrations sont de l'IREMER

3. Ce paysage sous-marin a été cartographié en Asie par sonar. Il révèle les traces de différents types d’avalanches sous-marines. À gauche, deux canyons entaillent la pente continentale (flèches orange). Une zone d’écroulis est visible entre les deux canyons (flèche blanche). Dans la plaine (au centre), un large couloir emprunté par des coulées de débris se des-

sine sur le fond (flèche jaune). Des coulées de débris sont visibles sur la pente à droite (flèche rose). De ce même côté, où se trouve une île, une longue vallée sous-marine est visible cheminant jusqu’au centre de la plaine (flèche rouge). Régulièrement empruntée par des avalanches turbulentes, cette vallée alimente la plaine abyssale en sédiments.

Cependant, il est tout aussi possible qu'aucun tsunami n'ait été formé parce que, par manque de matière, aucune avalanche ne pouvait plus se déclencher. Pour le savoir, il faut aller voir...

Les géologues distinguent aujourd'hui trois grandes sortes d'avalanches : les glissements en masse, les écoulements laminaires et les écoulements turbulents. Équivalents sous-marins des glissements de terrain observés sur terre, les glissements en masse se produisent quand un pan du talus continental en équilibre instable se décroche brusquement et dévale la pente. Selon la pente, un glissement en masse se transforme plus ou moins vite en écoulement, c'est-à-dire en un mouvement global de nombreuses particules en suspension.

Écoulements laminaires

Les écoulements laminaires (non turbulents) se produisent quand un matériau cohésif, par exemple une suspension dense d'argile, se met en mouvement (le matériau n'a pas incorporé assez d'eau pour rompre la cohésion). Ils sont donc caractérisés par des concentrations et des viscosités (la résistance à

l'écoulement) élevées. Un écoulement laminaire s'arrête quand son « moteur », c'est-à-dire la gravité, devient moins fort que les frottements des sédiments sur le fond. La coulée se dépose alors instantanément sur place : on dit qu'elle « gèle ».

Les coulées de débris représentent un cas particulier d'écoulement laminaire. Elles transportent une grande variété d'éléments hétérogènes au sein d'une matrice sableuse ou argileuse. Il peut s'agir de graviers, de « galets mous » d'argile de tailles millimétriques à centimétriques (des blocs d'argiles arrachés au fond et polis par les frottements), de galets ou même de blocs rocheux. En raison de cette multitude de constituants, les propriétés et les comportements des coulées de débris varient. D'un point de vue physique, elles se comportent comme des fluides de Bingham (qui ne s'écoulent qu'après qu'une force minimale leur a été appliquée). Plusieurs mécanismes ont été proposés pour expliquer la façon dont les particules, voire les blocs, sont portées dans l'écoulement – pression de dispersion, rigidité de la matrice, flottabilité –, mais un seul point est avéré : les expériences effectuées par Hampton en 1972 ont montré que les particules qui participent à un tel écoulement se répartissent selon leur taille dans le sens de la longueur. Tandis que les blocs et les fragments les plus grossiers se concentrent dans la tête de l'écoulement, les éléments les plus petits sont dans la queue. Par ailleurs, quand la coulée gèle, les débris les plus gros migrent vers les bords de la coulée et vers le haut. Tous ces phénomènes de tri produisent des sédiments caractéristiques.

Quant aux écoulements turbulents, ils forment des avalanches, qui sont aussi capables de transporter d'énormes masses, et sont constituées d'une « tête » turbulente (le front d'écoulement) et d'un « corps » prolongé par une « queue » très diluée. L'incorporation d'eau est maximale au sein de la tête, là où l'épaisseur du courant est aussi la plus grande. L'épaisseur d'un écoulement turbulent varie de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres selon la vitesse, la pente, la largeur de la vallée empruntée, etc.

Pour décrire les écoulements turbulents, on utilise des modèles qui les assimilent à un fluide newtonien, c'est-à-dire à un fluide de viscosité constante, qui, comme l'eau, coule dès que le support est en pente. Leur turbulence se traduit par de nombreux mouvements désordonnés, dont l'effet global est de maintenir en suspension les particules transportées. D'un point de vue physique, l'analogie avec les avalanches de neige poudreuse est manifeste, puisque le processus est aussi turbulent et énergétique (voir la figure 4). Dans les écoulements turbulents sous-marins, ce sont les particules mises en mouvement par la pesanteur qui entraînent l'eau. Cette dernière n'est qu'un partenaire passif du mélange, même si elle peut faciliter le déclenchement de l'avalanche et en amplifier les effets.

Après son déclenchement, une avalanche sous-marine se développe en trois phases. Pendant la première, elle s'amplifie en érodant et en entraînant les sédiments meubles rencontrés sur son chemin, ce qui la densifie et l'accélère. Ensuite se déroule la phase de transport, pendant laquelle des quantités égales de sédiments sont en permanence arrachées et déposées tout au long du chemin. Au cours de cette phase de transport, qui peut se prolonger sur des centaines de kilomètres, le bilan des masses arrachées et déposées est

Un nouveau type d'avalanches

En 1995, T. Mulder, de l'Université de Bordeaux 1, et J. Syvitski, de l'Université du Colorado, ont mis en évidence une nouvelle sorte de courant de turbidité sous-marin : les courants hyperpycniaux. Habituellement, l'eau douce étant moins dense que l'eau de mer, les sédiments véhiculés par les fleuves forment de grands panaches en surface. Toutefois, la charge sédimentaire en suspension transportée par certains fleuves peut, par exemple lors de crues exceptionnelles, être assez importante pour que la densité de la suspension des sédiments dans l'eau douce soit supérieure à celle de l'eau de mer. Dans ce cas, l'écoulement turbulent du fleuve plonge au fond de la mer et emprunte les réseaux de canyons : c'est un courant hyperpycnal.

Un tel courant diffère d'un courant de turbidité classique parce qu'il est sans cesse alimenté en sédiments par le fleuve. De tels courants ont d'abord été découverts dans les lacs, l'eau des rivières étant souvent plus dense que l'eau des lacs. En mer, il a fallu attendre plus longtemps pour les mettre en évidence. Ainsi, avec T. Mulder, nous avons récemment étudié les courants hyperpycniaux du Var, un fleuve méditerranéen typique, caractérisé par des crues soudaines et violentes au printemps et à l'automne. Nous avons constaté que pendant les crues du Var, tandis que les débits sont décuplés, la charge en suspension mesurée à l'embouchure du fleuve dépasse plusieurs dizaines de kilogrammes par mètre cube. Environ une fois tous les quatre ans, cette charge devient si importante qu'un courant hyperpycnal s'amorce. Des carottes prélevées par l'IFREMER en 1986 et en 1996 face au fleuve et au large ont révélé la structure particulière des dépôts hyperpycniaux. Comme un courant hyperpycnal accélère progressivement au cours de la montée en charge de la crue, il dépose des particules de plus en plus grossières, ce qui se traduit par une évolution granulométrique caractéristique. Ce travail sert depuis de référence aux géologues qui veulent caractériser un dépôt hyperpycnal.