

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.

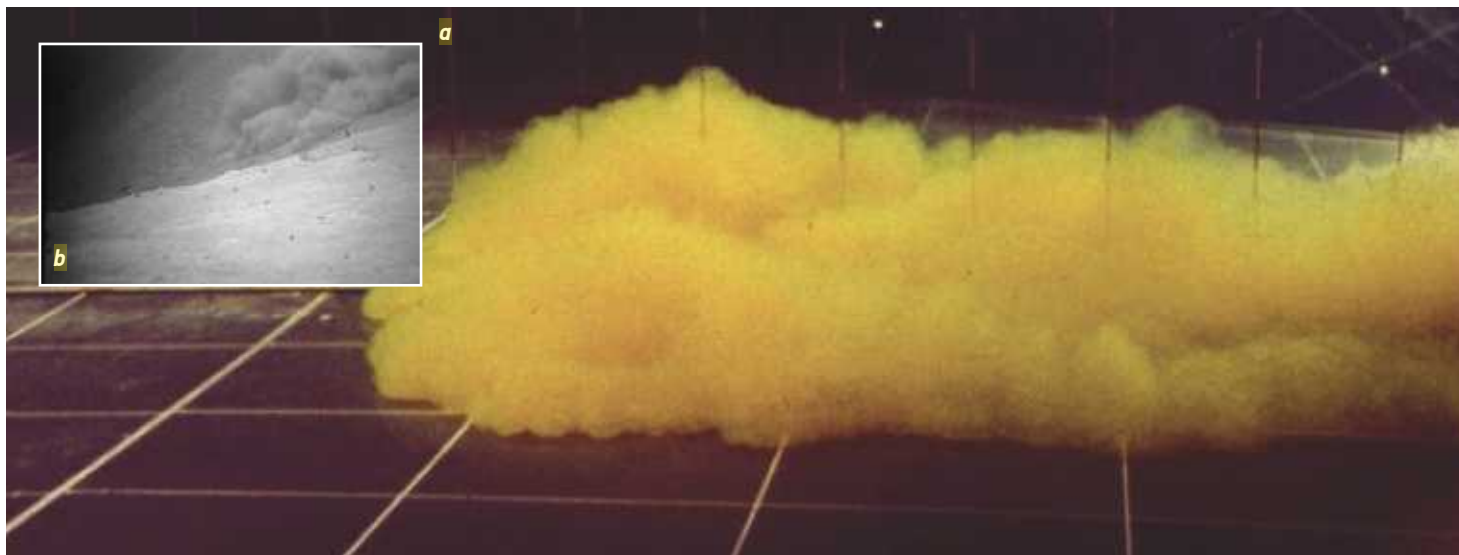
Pour décrire les écoulements turbulents, on utilise des modèles qui les assimilent à un fluide newtonien, c'est-à-dire à un fluide de viscosité constante, qui, comme l'eau, coule dès que le support est en pente. Leur turbulence se traduit par de nombreux mouvements désordonnés, dont l'effet global est 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.



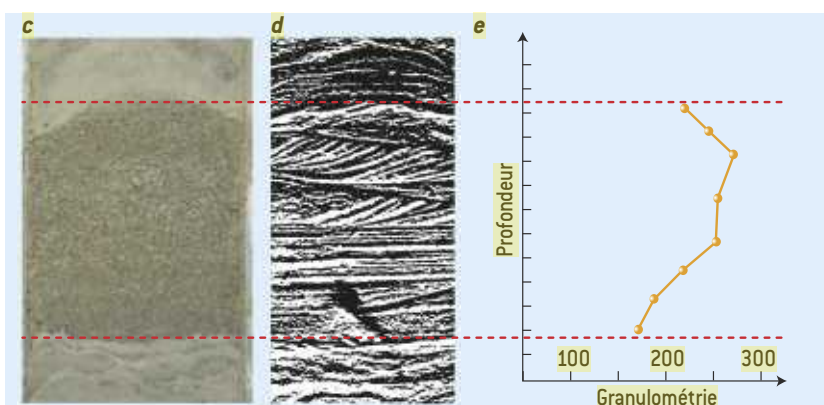
équilibré. Finalement, la troisième phase est celle de la décélération de l'écoulement, puis de sa mort. Celle-ci est en général due à la disparition de la turbulence, qui se produira par exemple parce que l'écoulement s'étale dans la plaine abyssale. Toutefois, un écoulement turbulent peut aussi s'arrêter parce que la pente devient faible (voire s'inverse) ou encore parce que trop de particules qu'il transporte se déposent sur le fond. Les processus de sédimentation dominant généralement pendant la troisième phase.

Les géologues distinguent deux types d'écoulements turbulents : les courants de turbidité et les bouffées turbides. Les premiers, caractérisés par une alimentation continue par l'arrière, peuvent durer plusieurs dizaines d'heures, voire des jours. En revanche, les bouffées turbides sont des écoulements de quantités limitées de matériaux, brefs – ils durent de quelques minutes à quelques heures – et de longueur réduite.

Nombre d'avalanches commencent par un glissement de terrain, qui donne un écoulement laminaire (voir la figure 2), lequel se transforme souvent en un écoulement turbulent : de l'eau est incorporée au sein de la matière en mouvement, de sorte que les particules, dont la concentration dans l'écoulement diminue, sont de plus en plus libres de se mouvoir et que des tourbillons se forment.

Un tel enchaînement – glissement de terrain, écoulement laminaire, courant de turbidité – s'est déroulé à Nice en 1979 lors de l'agrandissement de l'aéroport. Les travaux de remblayage avaient créé un amas instable au bord d'une pente sous-marine très forte située à quelques centaines de mètres du rivage. Ce remblai a brusquement glissé, entraînant une partie de la plate-forme aéroportuaire en construction. Ce glissement évolua vite en une avalanche sous-marine, qui coupa deux câbles téléphoniques situés à 80 et à 110 kilomètres de l'aéroport plusieurs heures après le glissement initial. Dans le même temps, un tsunami submergea le port d'Antibes.

Puisque glissements de terrain et écoulements laminaires peuvent évoluer vers la turbulence, il serait intéressant de savoir qui, des avalanches laminaires ou turbulentes, contribue le plus aux transferts de matière vers le fond. Nous pensons pour notre part que les courants de turbidité sont en volume les plus gros contributeurs, même



4. Les courants de turbidité sont des écoulements turbulents comparables aux avalanches de neige, comme l'illustrent les volutes photographiées en bassin d'essai ci-dessus (a) ou depuis un sous-marin (b). Pour identifier la nature et la structure des dépôts laissés par une avalanche, les spécialistes prélèvent des carottes dans le fond de la mer (c). Si l'on soumet des échantillons aux rayons X, des différences de densité invisibles à l'œil nu apparaissent (d). L'image ainsi obtenue guide le prélèvement d'échantillons à différents niveaux du dépôt, dont la granulométrie est ensuite mesurée à l'aide d'un granulomètre laser. La courbe donnant la granulométrie en fonction de la hauteur (e) montre ici que la taille des particules croît en début de sédimentation, ce qui est inhabituel dans les dépôts laissés par les courants de turbidité (turbidites). En bas, la vallée sous-marine du Var dans les Alpes-Maritimes a été creusée sur une quinzaine de mètres de profondeur par l'avalanche de 1979, ce qui a créé une paroi, où est visible un empilement de turbidites.



5. Le canyon sous-marin du Var, très souvent parcouru par des courants de turbidité, est tapissé de dunes de galets. La longueur d'onde de ces courants, donnée par la distance entre les stries sur cette image sonar du canyon, est un indicateur de la vitesse des avalanches. Ainsi, on note que sur les côtés (*flèche rouge*), cette vitesse est moindre qu'au centre (*flèche bleue*) puisque les dunes sont plus rapprochées.

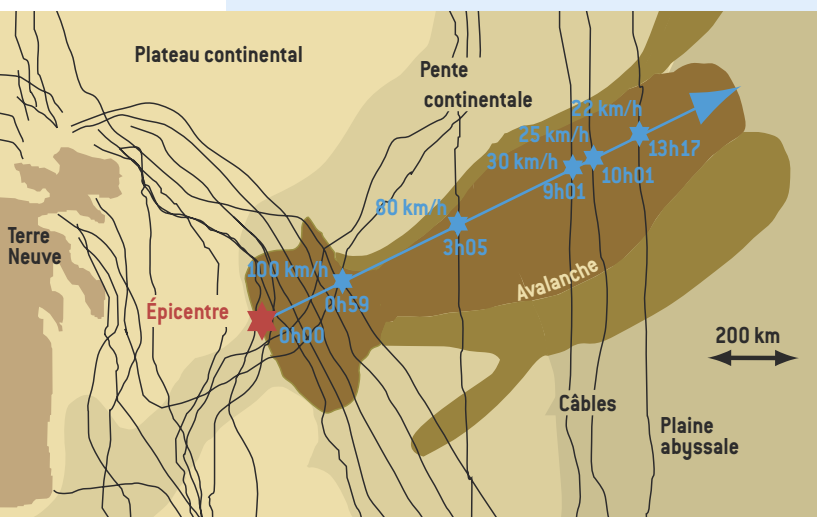
si le sujet suscite encore un débat chez les géologues. Cette conviction est renforcée par l'observation, tant sur les pentes sous-marines actuelles et sur les glacis continentaux (au pied de ces pentes) que sur terre (sur le fond émergé d'anciennes mers), de la présence très fréquente de turbidites, les dépôts sédimentaires produits par les courants de turbidité. Avalanche après avalanche, d'épaisses séquences sédimentaires se sont accumulées sur parfois des kilomètres d'épaisseur.

Après s'être longtemps limitée aux plateaux continentaux, l'exploration pétrolière s'est récemment tournée vers des zones plus profondes de l'océan, de sorte que la connaissance des avalanches et des turbidites est devenue un enjeu industriel. En effet, les avalanches transportent vers les profondeurs beaucoup de matériel détritifique dont du sable, qui, une fois consolidé, forme du grès. Cette roche poreuse constitue un excellent piège pour les hydrocarbures issus de la matière organique déposée

La découverte des courants de turbidité

Curieusement, c'est en Suisse, qu'à la fin du XIX^e siècle, des géologues proposèrent le concept d'avalanches sous-marines. Ils avaient observé que dans le prolongement du delta du Rhône dans le lac Léman, des courants subaquatiques saisonniers chargés de sédiments en suspension avaient creusé des ravins. Cependant, la découverte du phénomène remonte à la catastrophe des Grands Bancs de Terre-Neuve en 1929.

Le 18 novembre de cette année-là, un tremblement de terre de magnitude 7,2 sur l'échelle de Richter se produit au large du Canada. Son épicentre est situé en mer sur le talus du cône du Saint-Laurent, là où passent la plupart des câbles sous-marins télégraphiques reliant l'Amérique du Nord à l'Europe. Tous les câbles situés à l'aplomb de l'épicentre sont instantanément brisés. D'autres, situés en aval de l'épicentre, sont coupés une heure, trois heures et jusqu'à 13 heures après le séisme.



L'heure indiquée 0h00 correspond au déclenchement du courant sur le site de l'épicentre du tremblement de terre du 18 novembre 1929 (*étoile rouge*). Sur la carte, ont été repérés les sites de rupture des câbles télégraphiques sous-marins (*étoiles bleues*), ainsi que les heures de ces ruptures. Les géologues en ont déduit la vitesse de propagation de l'avalanche.

De nombreux indices révèlent la puissance du phénomène sous-marin qui vient de se produire. L'onde de choc est ressentie dans toutes les provinces maritimes autour de 17 heures. À la nuit tombée, vers 19 heures 30, un raz-de-marée atteignant parfois 7,5 mètres de hauteur frappe 200 kilomètres de côtes au Sud de Terre-Neuve. Quarante villes et villages de pêche, abritant une population de 10 000 personnes, sont dévastés et 27 personnes périssent.

On pense alors que le tsunami et la rupture des câbles résultent de l'effondrement du plancher océanique. L'affaire est vite classée, mais deux ingénieurs, A. Hodgson et W. W. Dox-see, effectuent une étude très complète de la catastrophe. Malheureusement, ils ne publieront leur rapport qu'au moment de prendre leur retraite en 1948. Peu après, P. H. Kuenen, de l'Université Columbia, découvre ce rapport et fait le rapprochement avec des expériences qu'il a menées en 1950 avec d'autres géologues. Ils avaient réussi à créer en bassin des courants de haute densité, capables de transporter des sédiments grossiers et dotés d'un très fort pouvoir érosif : exactement ce qu'il faut pour expliquer les ruptures de câbles observées en 1929.

Une thèse s'impose alors : le séisme a causé un gigantesque glissement de terrain (la zone touchée fait plus de 20 000 kilomètres carrés, soit environ la superficie de la Bretagne). Le courant de turbidité qui en a résulté a atteint une vitesse de 70 kilomètres par heure, entraînant la rupture de 12 câbles en 28 endroits. On a reconstitué la progression du courant d'après les heures de rupture des différents câbles. Les nombreuses études réalisées depuis et, en particulier, celle que l'IFREMER a récemment menée avec des chercheurs de la Commission géologique du Canada, ont montré que l'avalanche est née de la fusion de très nombreux glissements déclenchés dans la zone de l'épicentre du séisme et impliquant à chaque fois entre 10 et 40 mètres d'épaisseur de sédiments. Le courant de turbidité a été très puissant, puisqu'on retrouve des galets à plus de 300 kilomètres du glissement. Il a déposé plus de 200 kilomètres cubes de matières solides en une couche de quelques centimètres à un mètre d'épaisseur, couvrant 150 000 kilomètres carrés dans la plaine de Sohm, et ce jusqu'à plus de 5 000 mètres de profondeur. Tout autant que le séisme, c'est le déplacement rapide de l'avalanche qui a engendré le tsunami.