



# Des avalanches sous la mer

*Les avalanches sous-marines transportent plus de matière à la surface de la Terre que tout autre phénomène. Après des dizaines d'années d'observation, les géologues comprennent aujourd'hui leurs causes, leurs natures et leur pouvoir dévastateur.*

Bruno Savoye



**D**écembre 2000 à bord du navire océanographique *L'Atalante*, nous nous apprêtons à plonger à bord du robot submersible *Victor*. Après avoir cartographié un vaste réseau d'anciennes vallées (ou paléovallées) sous-marines au large du fleuve Congo, nous réalisons une série de plongées jusqu'à 5 000 mètres de profondeur le long de la vallée actuelle. La dernière plongée de *Victor* a lieu dans le canyon sous-marin qui prolonge l'estuaire du Congo. La structure géologique de cette gorge sous-marine nous intrigue, notamment parce que, par endroits, elle entaille le fond sur près de 1 400 mètres. À 2 580 mètres de profondeur, *Victor* achève sa descente, et nous nous attendons à découvrir le fond du canyon, mais... les écrans vidéo se brouillent. Plus d'images, aucun parasite, rien. Aussitôt c'est le branle-bas chez les ingénieurs, qui, croyant à une panne, relancent plusieurs fois le système. En vain. Inquiet, car *Victor* « vit » l'une de ses premières campagnes, je donne l'ordre de remonter. Trente mètres au-dessus du fond, les écrans tournent brusquement au rouge sang, puis à mesure que nous montons, nous voyons sur les écrans une image se reconstituer sur laquelle une sorte de neige semble tomber à gros flocons. Nous ne retrouvons une visibilité correcte qu'à 200 mètres au-

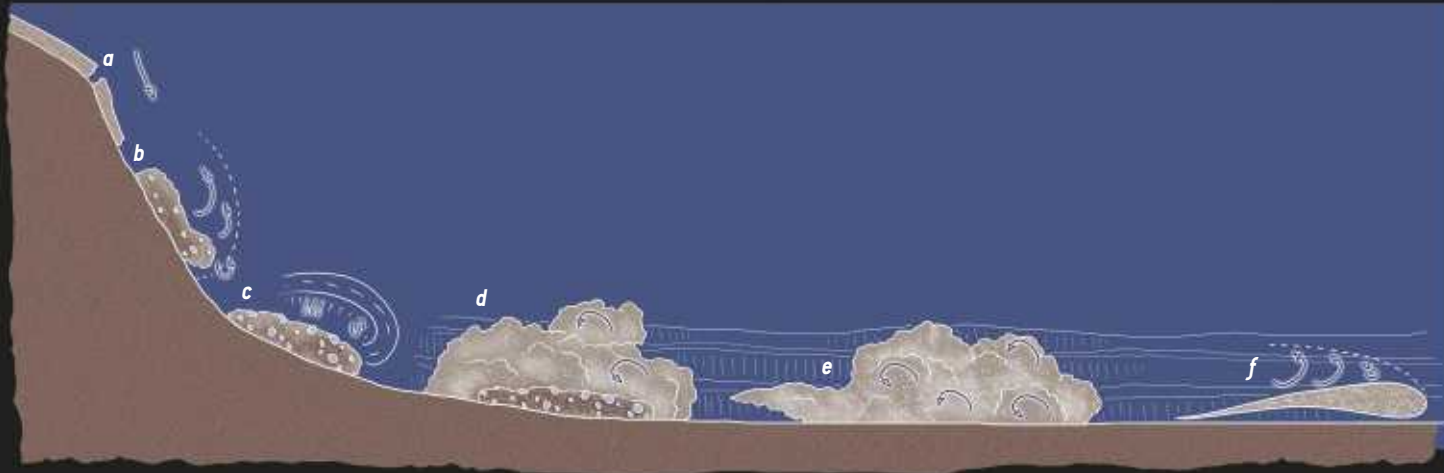
dessus du fond. *Victor* n'est pas en panne, mais est au cœur d'une avalanche sous-marine. Par la suite, le système de localisation acoustique fonctionnant bien, nous replongerons dans l'avalanche pour estimer sa vitesse : quatre kilomètres par heure. Nous venons d'assister au travail de l'une des plus grandes forces à l'œuvre au fond des océans !

Il y a seulement 50 ans, le fond des océans était plus mystérieux que la Lune. On décrivait les abysses comme des endroits tranquilles, où rien ne semblait se passer. Tout a changé depuis que l'évolution des techniques d'exploration – particulièrement la cartographie acoustique – a rendu accessible la géologie de vastes régions sous-marines jusqu'alors inconnues. Les cartes dressées ont révélé de nombreux canyons creusés par le passage régulier des avalanches sous-marines, des écoulements qui démarrent près des continents et atteignent souvent les plaines abyssales. Ce système de transport de matière vers les grands fonds a un impact notable sur la sédimentation et la vie dans les grands fonds. À l'IFREMER, nous avons acquis de nombreuses connaissances sur ce phénomène dans le cadre de projets européens et de collaborations avec l'industrie. Nous allons en exposer l'essentiel ici.

Les avalanches sous-marines représentent la plus importante forme de transport de matière à la surface de la Terre. Un petit calcul simple et... faux l'illustre.

**1. Cette avalanche sous-marine turbulente** a été déclenchée par un glissement de terrain sur la pente continentale (à l'arrière-plan), qu'elle a dévalée jusqu'à la plaine abyssale (premier plan). Nommées courants de turbidité, les avalanches turbulentes

empruntent les chenaux creusés par les avalanches précédentes ; elles transportent d'énormes quantités de sédiments vers les plaines abyssales, « cannibalisent » les sédiments présents sur leur passage et peuvent rompre les câbles téléphoniques.

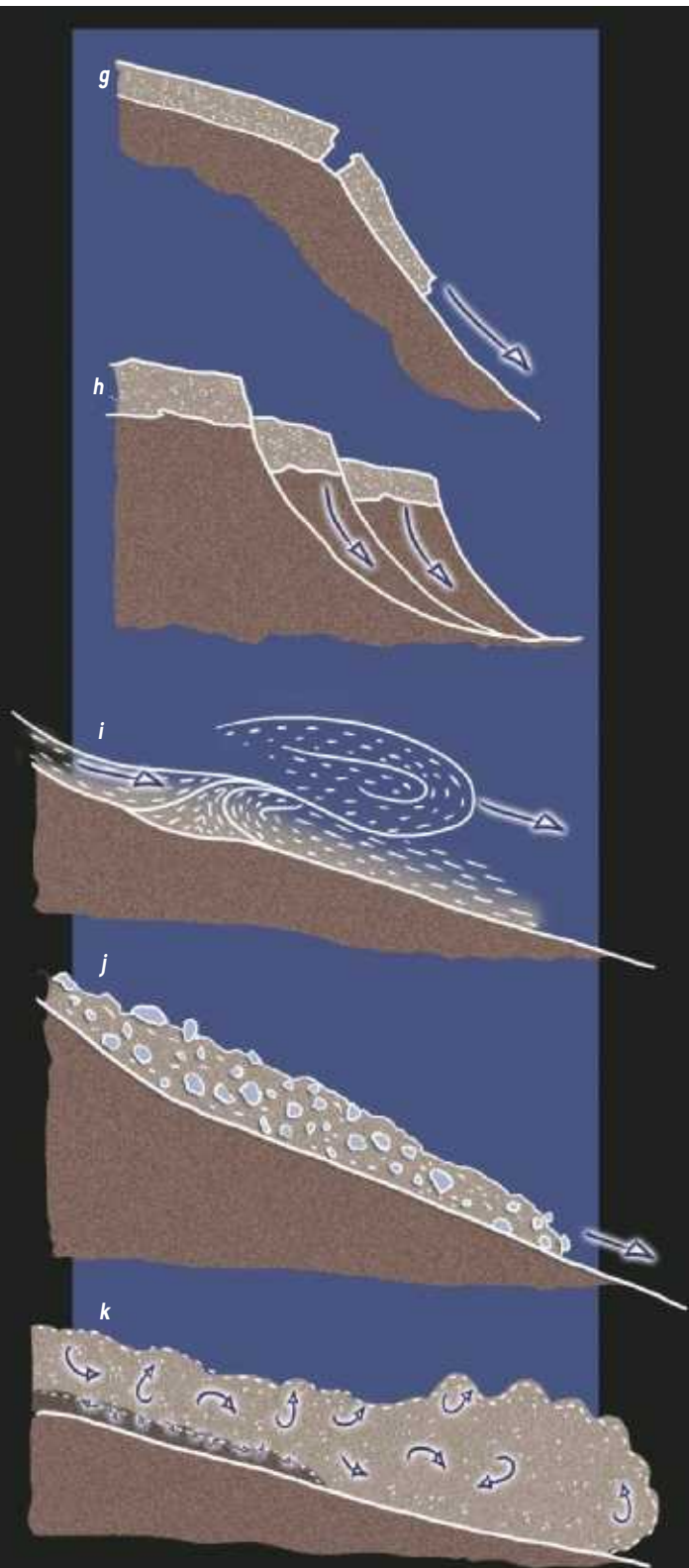


**2. Une avalanche** sous-marine met en jeu les mêmes types de processus gravitaires que les mouvements de matière à terre. Dans les glissements de terrain (*g* et *h*) et les slumps (*affaissement en i*), les distances parcourues et la déstructuration des sédiments d'origine sont limitées. Au contraire, dans les coulées de débris (écoulement laminaire en *j*) et les courants de turbidité (écoulements turbulents en *k*), la déstructuration des sédiments d'origine est totale et les distances parcourues sont très grandes. On observe fréquemment qu'une avalanche commencée par un glissement de terrain (*a*), se transforme en un slump (*b*), puis en un écoulement laminaire (*c*) où la turbulence apparaît (*d*) puis se développe tout à fait (*e*) longtemps avant que l'avalanche, perdant son énergie et déposant sa matière, ne finisse par se déposer dans la plaine abyssale (*f*).

Supposons que dans une région donnée, une avalanche se déclenche tous les 100 ans, et corresponde, en moyenne, à un dépôt de sédiments de trois centimètres d'épaisseur. Notons que si ces chiffres sont plausibles, les taux de sédimentations varient d'un endroit à l'autre et selon les époques : au large de l'Amazonie, par exemple, jusqu'à 26 mètres de sédiments se sont déposés tous les 1 000 ans pendant la dernière glaciation (il y a environ 20 000 ans) contre moins d'un mètre pour 1 000 ans aujourd'hui. Au large du fleuve Congo, trois centimètres de sédiments par siècle représentent 300 mètres d'épaisseur en un million d'années et jusqu'à 30 kilomètres en 100 millions d'années... Si à ce rythme, les océans ne sont toujours pas comblés, c'est que notre calcul est simpliste : d'une part, les sédiments se tassent avec le temps ; d'autre part, le socle océanique finit par s'enfoncer. Néanmoins, cette estimation illustre l'ampleur de ce type de sédimentation à l'échelle géologique.

## Géographie sous-marine

Du reste, l'œuvre accomplie prouve assez cette ampleur. Au cours des âges, la sédimentation océanique a comblé d'immenses bassins, qui, plissés par la tectonique, ont fourni les roches sédimentaires des montagnes ou des bassins sédimentaires. Au large du Nigeria, se trouve une pile sédimentaire de 12 kilomètres d'épaisseur... La sédimentation océanique est également à l'origine de vastes réseaux de vallées sous-marines, que les avalanches empruntent et creusent à chaque passage. De tels réseaux de vallées sous-marines sont présents face à l'embouchure de la plupart des grands fleuves. Celui du Gange, le plus vaste du monde, couvre 2,2 millions de kilomètres carrés, soit quatre fois la France. La largeur des vallées – de plusieurs centaines de mètres à deux kilomètres de largeur – reflète celle des courants qui les sillonnent. Leurs longueurs



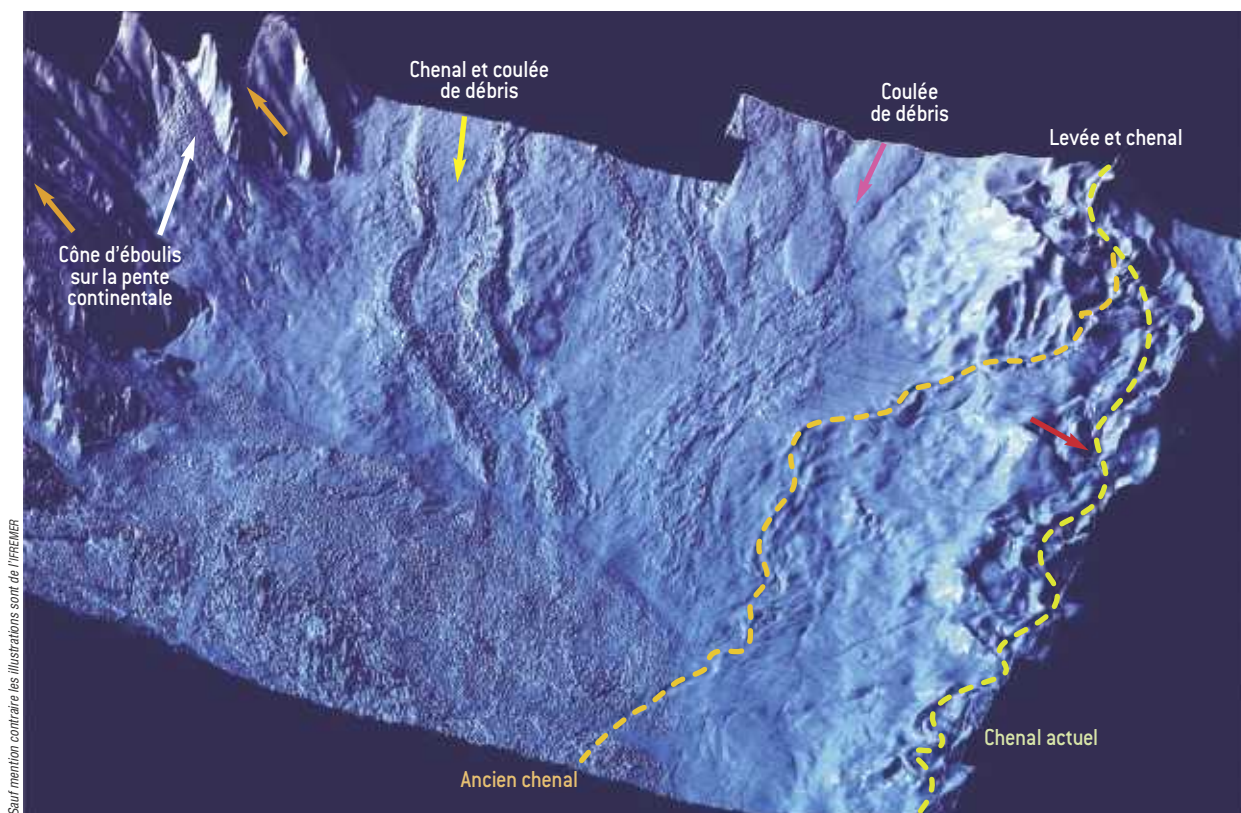
– jusqu’à 2500 kilomètres – donnent une idée de la distance parcourue par ces avalanches. En outre, étant donné la profondeur de ces vallées et la hauteur de leurs flancs (constitués de sédiments déposés par les courants qui débordent), on estime que les courants sont épais de plusieurs centaines de 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-

laires 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.



**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.

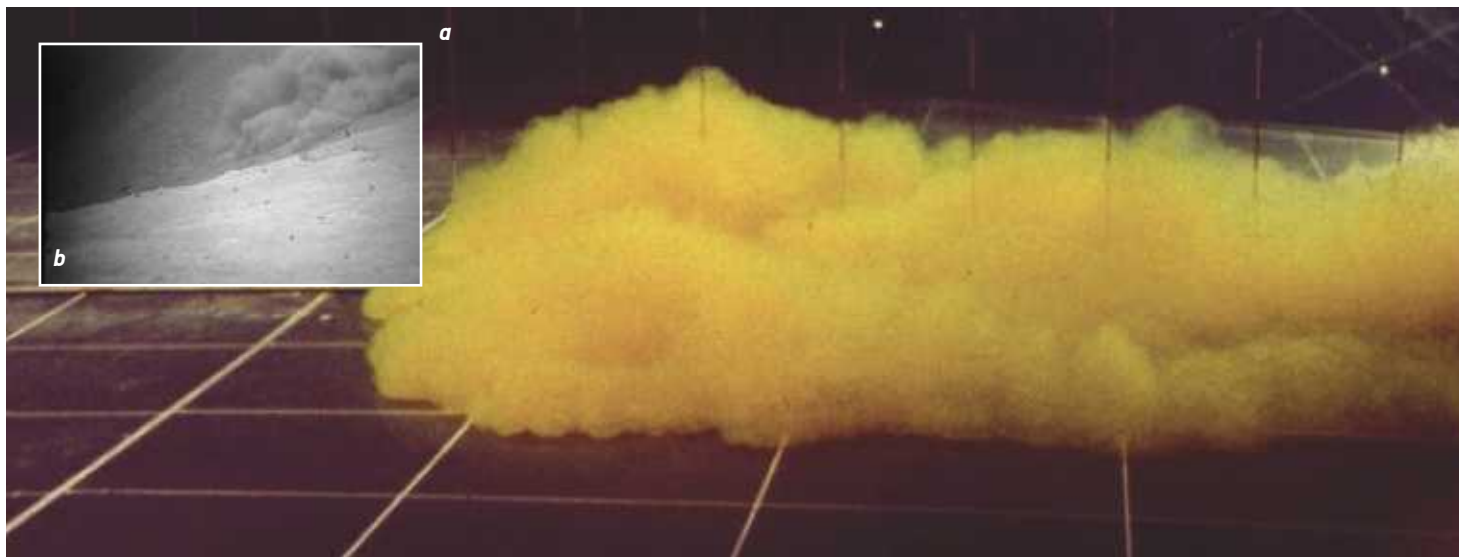
Pour décrire les écoulements turbulents, on utilise des modèles qui les assimilent à un fluide newtonien, c'est-à-dire à un fluide de viscosité constante, qui, comme l'eau, coule dès que le support est en pente. Leur turbulence se traduit par de nombreux mouvements désordonnés, dont l'effet global est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

**E**n 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 hyperpycnaux. 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 hyperpycnaux 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 hyperpycnaux. 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.



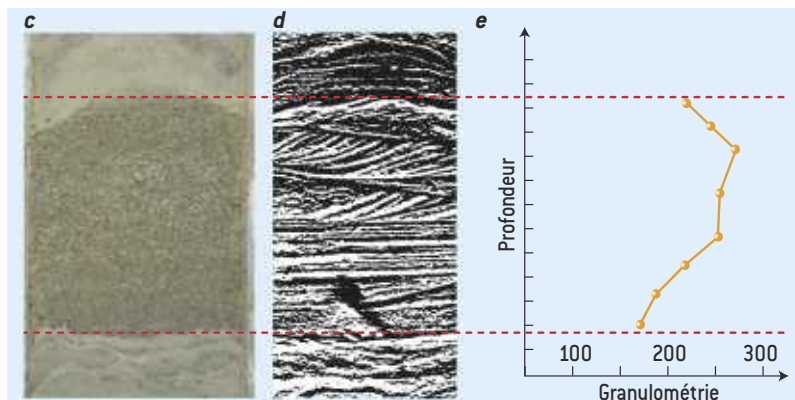
équilibré. Finalement, la troisième phase est celle de la décélération de l'écoulement, puis de sa mort. Celle-ci est en général due à la disparition de la turbulence, qui se produira par exemple parce que l'écoulement s'étale dans la plaine abyssale. Toutefois, un écoulement turbulent peut aussi s'arrêter 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 détritique 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

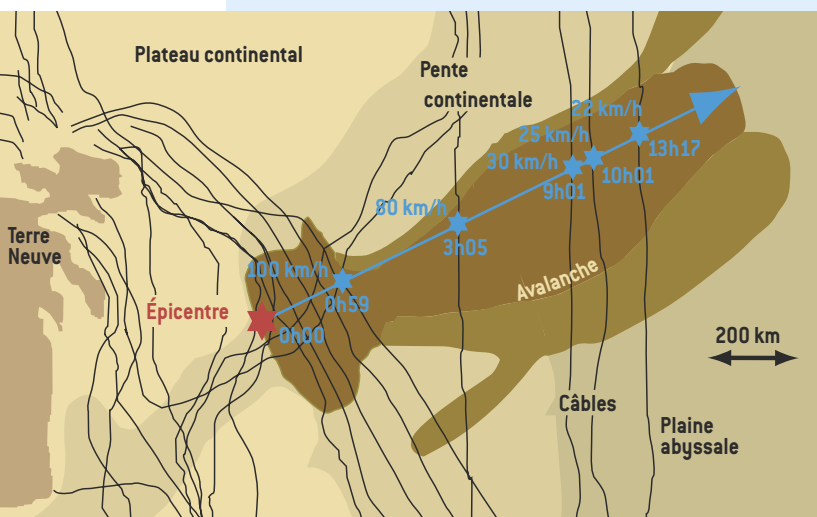
C urieusement, c'est en Suisse, qu'à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, des géologues proposèrent le concept d'avalanches sous-marines. Ils avaient observé que dans le prolongement du delta du Rhône dans le lac Léman, des courants subaquatiques saisonniers chargés de sédiments en suspension avaient creusé 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.

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.



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.

lors de la naissance de l'océan, alors que celui-ci était encore peu profond. Ce mécanisme explique la présence de gisements pétroliers importants au pied des talus continentaux, voire plus au large. Les techniques d'aujourd'hui rendent possibles les forages en haute mer, mais les coûts associés sont énormes. C'est pourquoi la croissance fine de la structure des réservoirs pétroliers d'origine turbidique est un gros enjeu. Par ailleurs, les installations pétrolières posées au fond sont parfois directement menacées par les glissements et les avalanches. L'IFREMER collabore avec les pétroliers tant pour les aider à apprécier le risque associé aux avalanches que pour les aider à établir la structure sédimentaire des pièges à pétrole.

## Quels enjeux ?

C'est ainsi qu'IFREMER et la Société *Elf-Aquitaine Production* (qui fait aujourd'hui partie de *Total*) ont lancé en 1998 le projet de recherche ZaiAngo visant à explorer, décrire et comprendre la marge continentale face au Gabon, au Congo et à l'Angola et plus particulièrement le réseau de vallées sous-marines du Zaïre. Ce projet faisait suite à la découverte par 1350 mètres de fond du champ pétrolier Girasol à l'intérieur de certaines paléovallées sous-marines du Zaïre. Situées au large de l'Angola, ces vallées vieilles de 15 millions d'années sont recouvertes aujourd'hui par près de 2000 mètres de sédiments. L'objectif principal du projet était de mieux connaître leur structure interne.

Outre ces applications industrielles, vers où se dirige la recherche sur les avalanches sous-marines ? Pour le

moment, notre connaissance de ce phénomène est surtout empirique. Pour progresser, il va nous falloir associer la collecte de données d'observation *in situ* et la modélisation. Depuis quelques années, on tente de placer des instruments de mesure dans le passage des avalanches afin de préciser leurs caractéristiques. Pour le moment, les problèmes de capteurs et d'ancrage restent difficiles à résoudre, mais il est d'ores et déjà clair que les géologues disposeront de stations d'observations utilisables d'ici à quelques années. Quant à la modélisation, elle devra combiner le développement de codes numériques et la réalisation d'expériences de calibration en bassin afin de simuler les différents types d'avalanche. On espère ainsi apprécier plus précisément ce qui déclenche les avalanches, ainsi que leur impact tant sur le fond que sur les structures industrielles qu'elles rencontrent sur leur chemin, tels les câbles sous-marins, les pipelines ou gazoducs, les têtes de puits de forage... Plus généralement, on voudrait aussi connaître leur influence sur les écosystèmes des profondeurs marines.

**Bruno SAVOYE**, géologue, est responsable du Laboratoire de sédimentologie marine du Centre IFREMER de Brest.

B. SAVOYE, *Océans, marge et pétrole profond*, in *Accès*, pp. 262-263, 2002.

N. BABONNEAU et al., *Morphology and architecture of the present canyon and channel system of the Zaire deep-sea fan*, in *Marine and Petroleum Geology*, vol. 19, pp. 445-467, 2002.

A. HUGOT et al., *Nouvelle modélisation des écoulements gravitaires sous-marins : application à l'effondrement de Nice de 1979*, in *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 333, série II, 133-139, 2001.

Auteur & Bibliographie

## Abonnement Spécial Été



**54 € seulement**  
au lieu de ~~77,80 €\*~~

**30% de réduction**

### Les avantages de l'abonnement

- ☒ Je profite d'un tarif avantageux
- ☒ Je bénéficie de tous les services de [www.pourlascience.com](http://www.pourlascience.com)
- ☒ Je reçois **Pour La Science** directement chez moi, avant sa parution en kiosque
- ☒ Je lis un n° de plus de **Pour La Science**

En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-dessus sont susceptibles d'être communiquées à des tiers. Elles peuvent donner lieu à l'émission de documents d'avis et de notification auprès de Pour La Science. Pour plus d'informations, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'autres organismes. En cas de refus de votre part, il vous suffira de nous prévenir par simple courrier.

\*Par rapport au prix hors taxes

Offrez-vous **Pour La Science**  
**13 n°s au prix de 12 !**

### BON D'ABONNEMENT

À retourner, accompagné de votre règlement à  
Abonnements **Pour La Science** - 8 rue Férou - 75278 Paris cedex 06

☐ **OUI**, je m'abonne à **Pour La Science**  
avec l'offre spéciale été : 13 n°s dont 1 spécial  
pour **54 € seulement** au lieu de **77,80 €\***

☐ Je règle par :

☐ Chèque ci-joint

☐ Carte bancaire

Numéro de la carte :

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ \*\* Date d'expiration \_\_\_\_\_

Signature :

\*\*Inscrire les 3 derniers chiffres de la série de 7 figurant au dos de votre carte.

### Mes coordonnées :

Nom : \_\_\_\_\_

Prénom : \_\_\_\_\_

Adresse : \_\_\_\_\_

Ville : \_\_\_\_\_

Code Postal : \_\_\_\_\_

ENPLSES

# Un outil universel de la physique

*Les diagrammes inventés par Richard Feynman ont sorti l'électrodynamique quantique d'une impasse calculatoire. Ils ont bouleversé la pratique de la physique des particules et de bien d'autres domaines.*

David Kaiser

**L**e légendaire physicien George Gamow expliquait un des avantages de son métier : il pouvait s'allonger sur un divan et fermer les yeux, personne ne savait s'il travaillait ou dormait. La facétie fait sourire, mais c'est une mauvaise représentation du travail des théoriciens dont la recherche n'est pas constituée de pensées abstraites déconnectées de la pratique calculatoire.

Depuis le milieu du XX<sup>e</sup> siècle, les physiciens théoriciens utilisent des « hiéroglyphes », dénommés diagrammes de Feynman, qui les aident à effectuer des calculs difficiles. Toutefois, les physiciens ont dû apprendre à s'en servir.

Le physicien théoricien américain Richard Feynman inventa ces diagrammes à la fin des années 1940 afin de simplifier les calculs quantiques des interactions électromagnétiques (électrodynamique quantique ou QED pour *Quantum electrodynamics*). Ces diagrammes intéressèrent vite les spécialistes du noyau atomique et de la physique des particules, puis les spécialistes du problème à  $n$  corps en théorie de la matière condensée. À la fin des années 1960, des physiciens commencèrent à les utiliser pour mener des calculs en théorie de la gravitation. Les diagrammes de Feynman ont amélioré la pratique calculatoire des physiciens, tout comme les calculs par ordinateur ont permis le décryptage du génome.

## Les physiciens englués

Feynman présenta ses diagrammes novateurs lors d'un colloque organisé dans un hôtel des Pocono Mountains en Pennsylvanie au printemps 1948. Vingt-huit théoriciens s'y étaient réunis pendant plusieurs jours pour d'intenses discussions et la plupart travaillaient à des problèmes d'électrodynamique quantique « non triviaux », selon l'euphémisme de l'époque.

En électrodynamique quantique, les électrons et les autres particules fondamentales échangent des photons virtuels (des particules « fantômes » de lumière) qui véhiculent l'interaction électromagnétique. Une particule virtuelle emprunte son énergie au vide pour commencer une existence éphémère à

partir de rien. Ces particules virtuelles restituent l'énergie empruntée et disparaissent en un temps très court déterminé par le principe d'incertitude de Heisenberg.

Deux difficultés principales sabordaient les efforts des physiciens. D'abord, ils savaient, depuis le début des années 1930, que l'électrodynamique quantique conduisait à des quantités infinies. Les physiciens répondaient à des questions élémentaires (par exemple : quelle est la probabilité pour que deux électrons se rencontrent ?) par des approximations acceptables du premier ordre ; hélas, dès qu'ils tentaient de pousser leurs calculs à une précision supérieure, la validité des calculs s'effondrait. La source de la difficulté était le photon virtuel, susceptible d'emprunter une quantité quelconque d'énergie, voire une quantité infinie, tant qu'il la restituait vite : des quantités infinies surgissaient.

Le second problème était le formalisme, d'une insupportable lourdeur, un cauchemar algébrique où il fallait combiner les contributions des différents termes. Les électrons pouvaient interagir en échangeant un nombre arbitraire de photons : plus ils échangeaient de photons, plus les expressions, qu'il fallait sommer, devenaient inextricables.

Tous les espoirs n'étaient cependant pas perdus : Heisenberg, Pauli, Dirac et les autres architectes de l'électrodynamique quantique pensaient qu'ils pouvaient simplifier ce calcul compliqué, en raison de la faible valeur de la charge  $e$  de l'électron ( $e^2$  est approximativement égal à  $1/137$  dans des unités adéquates). À chaque fois que l'on introduit un nouveau photon échangé par une paire d'électrons, on introduit un facteur  $e^2$ . Un scénario où les électrons n'échangent qu'un photon comporte donc un facteur  $e^2$ , celui où les électrons échangent deux photons ne pèse que d'un facteur  $e^4$ , beaucoup plus petit. Ce dernier événement ne contribuerait au calcul total qu'un centième de l'échange d'un seul photon. Le terme correspondant à l'échange de trois photons serait un dix millièmes de fois plus petit ; aussi les calculs pourraient-ils être tronqués après quelques termes.

Ce calcul est une méthode dite perturbative : on ne conserve que les premiers termes, car les contributions des suivants sont supposées insignifiantes. Le calcul est