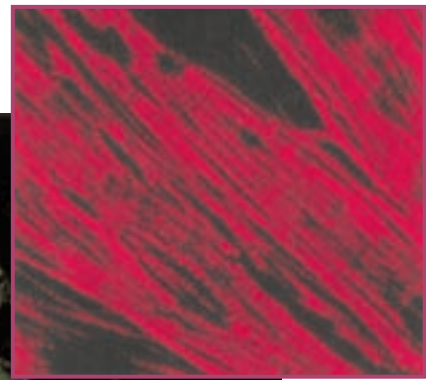
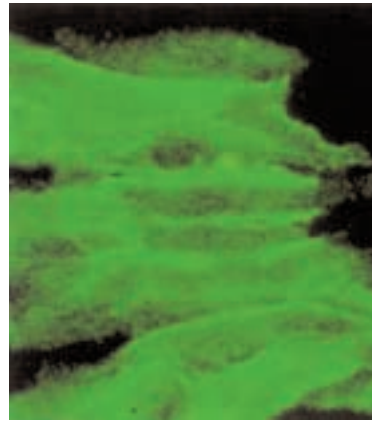
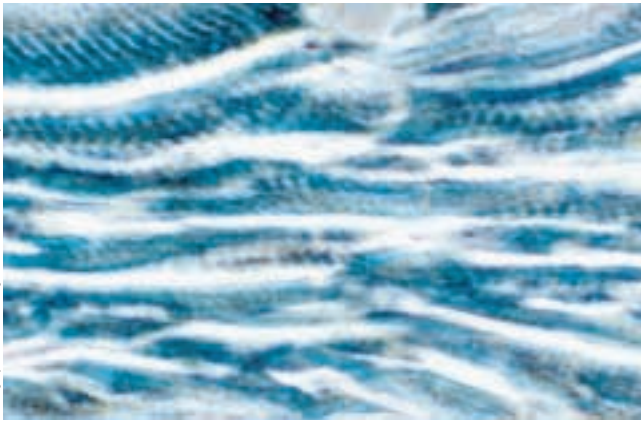




4. LA MYOSINE, une protéine essentiellement présente dans les muscles, apparaît en rouge dans des cellules dérivées de cellules souches embryonnaires de souris (en haut, à droite). Greffées dans

un cœur de souris, ces cellules s'insèrent dans le muscle cardiaque (à gauche). On les visualise par un marqueur fluorescent vert (à droite).

ces cellules endodermiques, qui se ramifient en prolongements, lesquels deviendront les poumons. Pour construire des organes, on devra apprendre à commander les interactions des cellules souches pluripotentes. La difficulté est redoutable, mais quelques embryologistes étudient le problème.

Les cellules greffées ne seront pas rejetées si le système immunitaire reconnaît qu'elles font partie du soi. On devrait éviter les rejets en modifiant génétiquement les cellules souches embryonnaires humaines pour qu'elles fonctionnent comme des «donneurs universels», compatibles avec n'importe quel receveur. On pourrait aussi créer des cellules souches embryonnaires génétiquement identiques aux cellules du receveur.

La création d'un type de cellules universellement compatibles imposerait l'inhibition ou la modification de nombreux gènes. Ces modifications empêcheraient les cellules d'exprimer à leur surface les protéines qui indiquent au système immunitaire qu'elle ne font pas partie du soi. Ces modifications seraient difficiles : on devrait sélectionner les cellules après les avoir exposées à diverses substances.

Pour fabriquer des cellules génétiquement identiques à celle du futur receveur, on pourrait aussi combiner la technique de culture des cellules souches embryonnaires et celle du clonage. À l'aide d'une aiguille de verre mesurant un dixième du diamètre d'un cheveu, on pourrait transférer une cellule somatique (une cellule qui n'est ni un ovule ni un spermatozoïde) ou son noyau dans un œuf non fécondé dont on aurait retiré les chromosomes. L'œuf, portant seulement l'information génétique de la cellule somatique «donneuse», se

développerait après une activation par un choc électrique.

Dans plusieurs études réalisées chez l'animal, une cellule d'animal adulte a été utilisée comme donneuse de gènes, et la cellule modifiée a été implantée dans l'utérus d'une «mère porteuse». C'est ainsi que des biologistes ont obtenu la brebis Dolly, des souris et des veaux clonés. Pour fabriquer des cellules destinées à être transplantées sur un receveur, il faudrait utiliser une de ses cellules pour en prélever le noyau, qui serait introduit dans un œuf non fécondé, lequel commencerait à se diviser. On cultiverait l'embryon seulement jusqu'au stade blastocyste. L'embryon servirait alors à produire des cellules souches embryonnaires, génétiquement identiques aux propres cellules du malade.

Les cellules souches embryonnaires humaines pourraient avoir d'autres applications : comme ces cellules pourraient, théoriquement, produire un nombre illimité de cellules humaines, elles seraient utilisées pour la recherche de protéines humaines rares. De telles expériences nécessitent un grand nombre de cellules pour

que la quantité produite soit suffisante pour les analyses. Enfin, comme les cellules souches embryonnaires ressemblent aux cellules des tout jeunes embryons, elles pourraient être utilisées pour la détection de substances qui perturbent le développement et provoquent l'apparition de malformations.

Enfin, ces cellules permettraient aux biologistes d'étudier les tout premiers événements cellulaires et moléculaires du développement humain sans craindre d'enfreindre les règles de l'éthique : les expériences ne seront pas critiquables, puisque les cellules souches embryonnaires ne peuvent engendrer d'embryon.

Les embryologistes examineront ainsi des questions fondamentales posées depuis des décennies : comment les cellules embryonnaires se différencient-elles ? Comment s'organisent-elles en organes et en tissus ? Les enseignements tirés de l'étude des souris, des grenouilles, des poissons et des drosophiles sont vraisemblablement transposables en grande partie à l'homme, mais l'étude de ces mécanismes sur notre propre espèce sera bien plus satisfaisante.

Roger PEDERSEN est professeur de gynécologie et d'obstétrique à l'Université de San Francisco.

Roger A. PEDERSEN, *Studies of In Vitro Differentiation with Embryonic Stem Cells*, in *Reproduction, Fertility and Development*, vol. 6, n° 5, pp. 543-552, 1994.

Michael G. KLUG et al., *Genetically Selected Cardiomyocytes from Differentiating Embryonic Stem Cells Form Stable Intracardiac Grafts*, in *Journal of Clinical Investigation*, vol. 98, n° 1, pp. 216-224, juillet 1996.

T. DEACON et al., *Blastula-Stage Stem Cells Can Differentiate into Dopaminergic and Serotonergic Neurons after Transplantation*, in *Experimental Neurology*, vol. 149, pp. 28-41, janvier 1998.

M. KENNEDY et al., *A Common Precursor for Primitive Erythropoiesis and Definitive Haematopoiesis*, in *Nature*, vol. 386, pp. 488-493, 3 avril 1998.

J.A. THOMSON et al., *Embryonic Stem Cell Lines Derived from Human Blastocysts*, in *Science*, vol. 282, pp. 1145-1147, 6 novembre 1998.

Les tsunamis

FRANK GONZÁLEZ

On ne peut lutter contre des vagues hautes comme des immeubles de dix étages et rapides comme un cyclomoteur. En revanche, on évite des dégâts si l'on sait prévoir leur arrivée sur les côtes.



1. LES TSUNAMIS LES PLUS VIOLENTS détruisent tout sur leur passage (cette image est un montage photographique). Face à des vagues de 30 mètres de haut, qui se déplacent à près de 15 mètres par seconde, les populations doivent fuir aussi rapidement que possible.

Une vague plus haute que prévu Papouasie-Nouvelle-Guinée

17 juillet 1998

Hauteur maximale des vagues : 15 mètres

Nombre de victimes : 2 200



Palani Mohan, Sipa Press

Le village de Sissano, quatre jours après le tsunami. Les taches vides étaient occupées par des constructions.

Cette barre de sable aujourd'hui dénudée, le long de la côte Nord de la Papouasie-Nouvelle-Guinée, était couverte d'habitations avant d'être balayée par trois vagues gigantesques. Le séisme à l'origine de la catastrophe était de magnitude 7,1, faible par rapport à ceux qui déclenchent habituellement ce type de catastrophe. Les vibrations sismiques ont-elles déclenché d'autres phénomènes sous-marins, tels un glissement de terrain ou l'explosion d'une poche de gaz ?

D'autres tsunamis d'amplitude inattendue ont causé des désastres, comme au Nicaragua, en 1992, mais le fond marin n'a jamais été étudié précisément. Deux expéditions ont exploré le fond de la mer près du lieu de la catastrophe en Papouasie-Nouvelle-Guinée : elles ont repéré une légère dépression qui correspondrait à un glissement de terrain, sans déterminer si cette anomalie est liée à la dernière catastrophe ou si elle a été créée lors d'un séisme antérieur.

Cette soirée du 17 juillet 1998 s'annonçait tranquille pour les habitants de Sissano, d'Arop, de Warapu et des autres villages installés entre le lagon de Sissano et la mer de Bismarck, sur la côte Nord de Papouasie-Nouvelle-Guinée. Lentement, le soleil a disparu sous l'horizon... puis, brusquement, la gigantesque énergie accumulée depuis des années dans les roches sous-jacentes par la convergence des plaques tectoniques fut libérée. Le séisme principal, de magnitude 7,1, fut ressenti sur la côte du lagon à 18 heures 49. Les déformations du fond de la mer engendrèrent un gigantesque raz-de-marée.

John Sanawe, un habitant d'Arop, à l'extrémité Sud du banc de sable, a survécu à la catastrophe et a raconté ce qui s'était passé : juste après la secousse principale, la mer s'est dressée au-dessus de l'horizon, jusqu'à 30 mètres de haut, avec un bruit d'orage éloigné. Le bruit s'était ensuite transformé en un vrombissement d'hélicoptère, puis il s'était progressivement atténué, pendant que la mer se retirait en-deçà de son niveau de plus basse marée. Après quatre à cinq minutes de silence, une première vague, haute de trois à quatre mètres, était arrivée, accompagnée d'un grondement semblable à celui d'un avion à réaction volant en rase-mottes. J. Sanawe avait couru vers sa maison, mais la vague l'avait rattrapé. Une deuxième vague l'avait entraîné dans une mangrove, à un kilomètre de là, sur la plage intérieure du lagon, et avait rasé le village.

D'autres villageois furent moins chanceux. Plusieurs s'emparèrent sur les branches brisées des mangroves ; d'autres furent écrasés par les débris. Parmi les survivants, une trentaine au moins furent atteints de gangrène et on dut les amputer. Des crocodiles et des chiens errants dévorèrent des cadavres avant l'arrivée des secours, ce qui compliqua le décompte des victimes, mais il est maintenant établi que ce raz-de-marée a tué plus de 2 200 personnes, dont plus de 230 enfants. Les vagues de plus de 15 mètres qui ont frappé la côte pendant 15 minutes ont surpris de nombreux habitants, et même ceux qui connaissaient le risque n'avaient nulle part où se réfugier sur le banc de sable.

Ces vagues étaient la manifestation d'un tsunami, un violent raz-de-marée. La plupart des tsunamis se produisent dans l'océan Pacifique, et 86 pour

cent d'entre eux résultent de tremblements de terre sous-marins le long de la ceinture de feu du Pacifique, où la collision de plaques tectoniques crée une zone de forte sismicité.

Depuis 1990, dix tsunamis ont tué plus de 4 000 personnes, chiffre élevé dû à l'accroissement des populations côtières. Pour la même période, 82 tsunamis ont été ressentis sur toute la surface du Globe (on n'en comptait naguère que 57 par décennie, parce que les moyens de détection et de communication mondiales étaient moins bons). Depuis le tsunami qui a frappé le Nicaragua en 1992 (voir l'encadré de la page 68), un «bulletin des tsunamis» a été créé : diffusé par courrier électronique, il transmet rapidement toutes les informations disponibles aux spécialistes du monde entier, qui collaborent ainsi plus facilement.

Les États-Unis ne sont pas à l'abri : des désastres comparables à ceux du Nicaragua ou de Papouasie-Nouvelle-Guinée ont aussi durement frappé Hawaii et l'Alaska. En outre, des résultats récents indiquent que de telles catastrophes pourraient aussi toucher la côte Ouest des États-Unis, où de nombreux

géologues pensaient que le risque était faible : des séismes se produiraient tous les 300 à 700 ans le long de la zone de subduction cascadienne, région de la côte Nord-Ouest du Pacifique où la plaque de l'océan Pacifique plonge sous le continent Nord-américain. Ce danger a été confirmé en avril 1992, lorsqu'un tremblement de terre de magnitude 7,1, à la pointe méridionale de la zone de subduction, provoqua un petit raz-de-marée près du cap Mendocino, en Californie. Cet événement a accéléré la mise en place du premier réseau de surveillance des tsunamis.

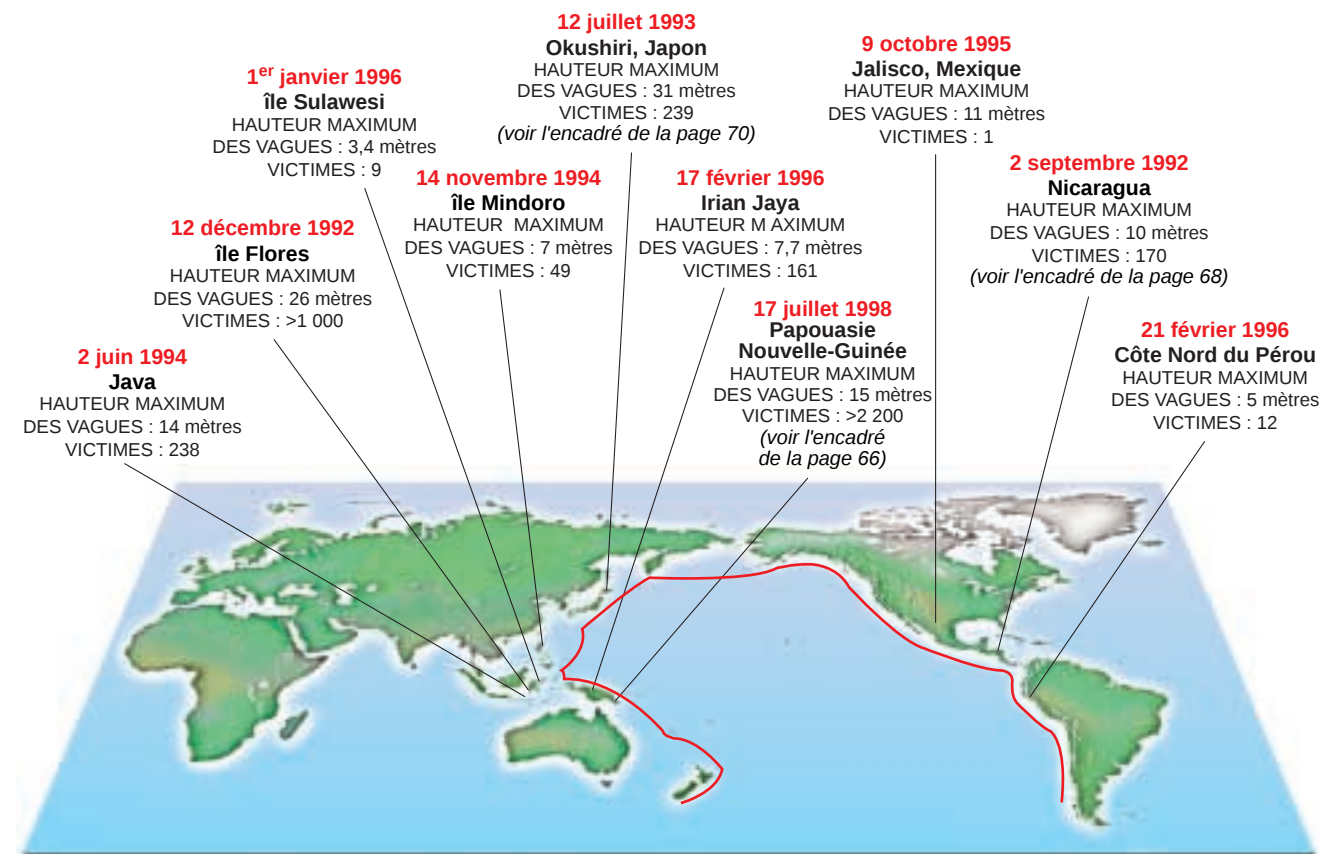
La vague de port

Qu'est-ce exactement qu'un tsunami ? En japonais, «tsu-nami» signifie littéralement «vague de port» : c'est une vague, de quelques mètres de haut tout au plus, mais dont la longueur peut atteindre 750 kilomètres en plein océan, qui se propage à travers l'océan à la vitesse d'un avion de ligne et se transforme en déferlantes destructrices dans les eaux côtières. Malgré sa vitesse de déplacement, un tsunami est complètement inoffensif en eau profonde, et

la vague, de très faible pente, passe la plupart du temps inaperçue.

Les tsunamis se propagent sur de longues distances, jusqu'à plusieurs milliers de kilomètres. L'île d'Hawaii, au milieu de l'océan Pacifique, est ainsi particulièrement exposée aux grands tsunamis qui traversent le Pacifique : elle a été touchée 12 fois depuis 1895. Le tsunami le plus destructeur avait son origine à 3 700 kilomètres de là, dans la zone des îles Aléoutiennes, près de la côte de l'Alaska (voir l'encadré de la page 72). Toutefois, les tsunamis les plus dévastateurs sont ceux qui prennent naissance près des côtes, tels celui qui a frappé la Papouasie-Nouvelle-Guinée en 1998 ou celui qui a suivi l'explosion du volcan Krakatoa, en Indonésie, en 1883 (les vagues, hautes comme des immeubles de 12 étages, tuèrent plus de 30 000 personnes dans un rayon de 120 kilomètres). James Lander, du Centre américain d'informations géophysiques, a calculé que 90 pour cent des victimes des tsunamis sont à moins de 200 kilomètres de la source.

Un tsunami se déroule en trois étapes : le déclenchement, par le déplacement vertical brusque de la colonne



2. DIX TSUNAMIS ONT TUÉ plus de 4 000 personnes depuis 1990. La collision des plaques tectoniques le long de la ceinture de feu du Pacifique (schématisée en rouge) déclenche fréquem-

ment des vagues meurtrières (environ une par an) qui traversent l'océan et dont la plus récente a balayé la côte de Papouasie-Nouvelle-Guinée en 1998.

Un séisme lent, silencieux et meurtrier Nicaragua

2 septembre 1992

Hauteur maximale des vagues : 10 mètres

Nombre de victimes : 170



Des survivants font la queue pour obtenir du ravitaillement.



Un village côtier, le lendemain de la catastrophe.

On doit apprendre aux habitants des régions côtières à se réfugier vers les points les plus hauts du relief quand ils ressentent un séisme. Toutefois, au Nicaragua, en 1992, le tsunami qui tua 170 personnes et laissa 13 000 sans abri n'avait été annoncé que par de faibles secousses, et la population n'avait pas perçu le danger. Cinq à dix pour cent des séismes sont ainsi silencieux.

Les vibrations caractéristiques des séismes ont une courte longueur d'onde et elles s'atténuent rapidement en se propageant ; elles n'ont pas franchi la distance qui séparait le foyer sous-marin du continent. Les ondes de longueurs supérieures ont atteint la côte, mais elles accélèrent beaucoup moins le sol et elles n'ont pas été détectées par les sismographes standards, insensibles aux périodes supérieures à 20 secondes. Ce séisme a peut-être dégagé cinq fois plus d'énergie que ne le laisse croire la magnitude de 7,0. Cet événement a clairement montré que les systèmes de détection et d'alerte aux tsunamis devaient être équipés de sismographes à large bande passante.

d'eau ; la propagation, de la haute mer vers les côtes ; le déferlement sur le rivage. La description et la modélisation de ces trois étapes permettent la prévision des conséquences d'un tsunami déclenché en un point donné, ainsi que la reconnaissance des zones à risque. L'efficacité de ces prévisions est toutefois encore limitée par les défauts de la modélisation du déclenchement et du déferlement des vagues.

Comment apparaît un tsunami ? Plusieurs phénomènes créent des vagues à la surface de la mer. Le vent, d'abord, déforme la surface de l'eau en ondes assez courtes qui ne créent que des mouvements superficiels : un plongeur en apnée atteint facilement les profondeurs où la houle ne se fait plus sentir, et même les fortes tempêtes de pleine mer, qui produisent des creux de 30 mètres ou plus, ne déplacent pas les eaux profondes. Les marées, en revanche, qui balaient les côtes du Globe deux fois par jour, créent, comme les tsunamis, des courants qui déplacent les eaux profondes. Elles sont toutefois régulières, soumises aux attractions conjuguées de la Lune et du Soleil, et les vagues qu'elles créent sont rarement très hautes.

Les tsunamis, événements catastrophiques qui mettent la mer en mouvement sur toute son épaisseur, sont déclenchés par une déformation du fond océanique, lors du mouvement relatif de deux plaques tectoniques le long d'une faille ou, plus rarement, lors d'une éruption volcanique, de l'impact d'une météorite ou d'un glissement de terrain sous-marin. L'eau suit alors le mouvement du fond. Comme on n'enregistre jamais directement cette déformation du fond, les modèles n'en donnent qu'une description simplifiée, même dans le cas d'un séisme : on suppose que les plaques tectoniques se chevauchent suivant une surface plane rectangulaire.

Toutefois, même avec une description aussi simple, le calcul de la hauteur initiale du tsunami nécessite la connaissance de dix paramètres, telles la quantité de déplacement de part et d'autre du plan de faille ou la longueur et la largeur de celui-ci. Immédiatement après le séisme, les enregistrements des sismographes n'indiquent que l'orientation du plan de faille, la localisation du séisme, sa magnitude et sa profondeur. Tous les autres paramètres doivent être estimés : la première simulation sous-estime souvent l'ampleur des inondations d'un facteur cinq à dix.

Photographies de Paolo Bosio, Gamma Liaison

Dans ce modèle à un seul plan de faille, la surface de rupture, calculée à partir des enregistrements sismiques, est souvent surestimée : la précision spatiale des données sismiques est insuffisante. De ce fait, le calcul prévoit que l'énergie libérée est dissipée sur une surface plus grande qu'elle n'est ; l'amplitude du mouvement vertical du fond marin et la hauteur de la vague initiale sont sous-évaluées. C'est seulement quand le tsunami a déferlé que les données sur les inondations et les enregistrements sismiques complémentaires permettent un calcul plus précis de sa hauteur initiale. L'étude des répliques qui se produisent pendant les mois qui suivent le séisme initial permet finalement de mieux comprendre la répartition de l'énergie sismique et, en particulier, de mieux délimiter la zone de rupture de la faille. Des résultats satisfaisants nécessitent en général plusieurs mois de travail, mais chaque simulation réussie accroît la fiabilité des prévisions futures.

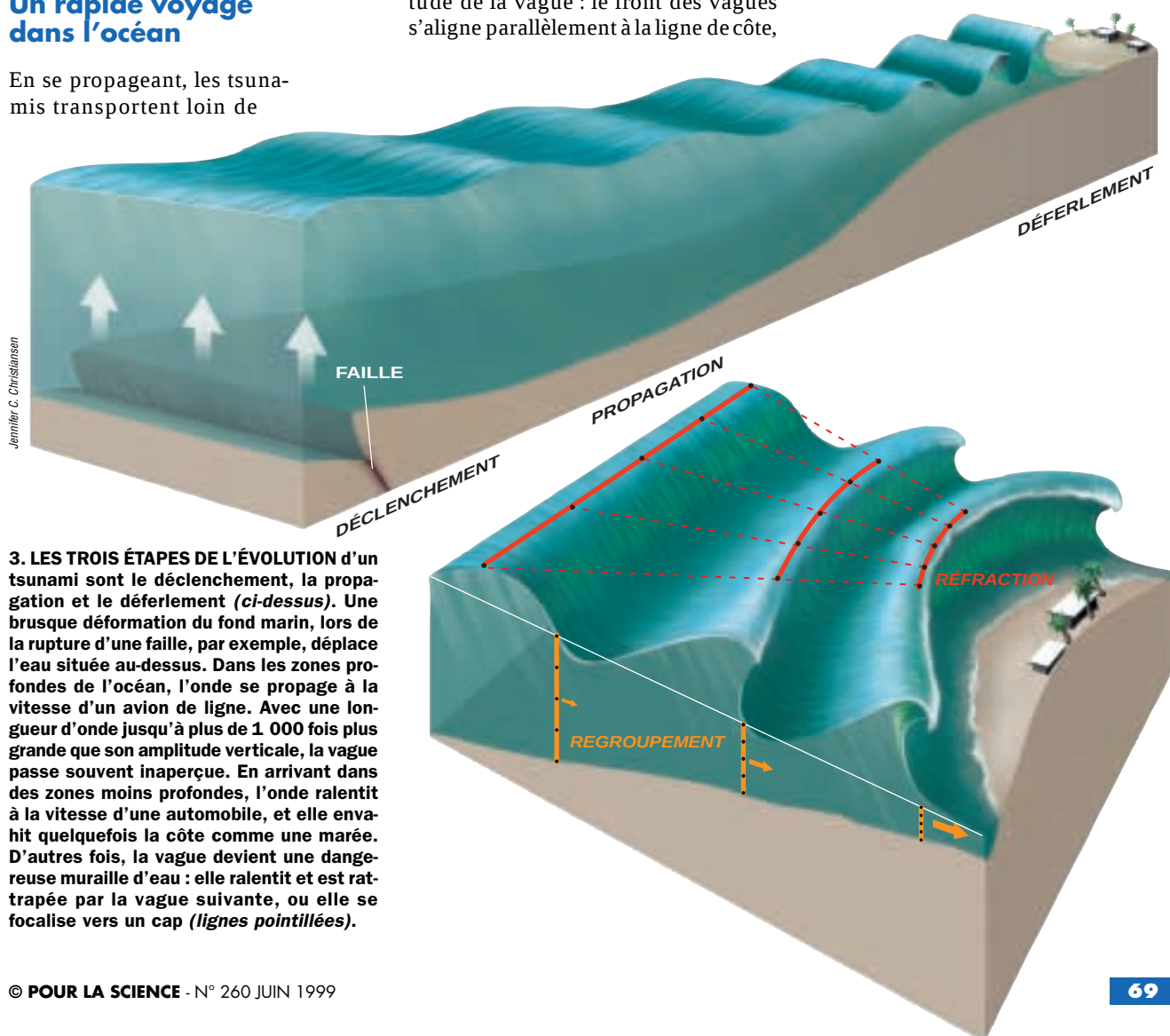
Un rapide voyage dans l'océan

En se propageant, les tsunamis transportent loin de

la source l'énergie libérée lors du séisme, comme les vibrations transportent l'énergie sismique à travers l'écorce terrestre. La hauteur de la vague est si petite par rapport à sa longueur d'onde et à la profondeur de l'eau, et la longueur d'onde est si grande par rapport à la profondeur que l'on peut utiliser la théorie des ondes longues linéaires. Celle-ci indique que la hauteur de l'onde ne détermine pas sa propagation et que sa propagation est d'autant plus rapide que la couche d'eau est épaisse et que la longueur d'onde est grande. Si l'on considère, par exemple, une onde plane, le passage de l'onde dans un plan correspond au seul passage de la quantité d'eau nécessaire à l'élévation du niveau de la mer sur la hauteur de la vague. Or, la vitesse de déplacement de l'eau ne dépend pas de la profondeur et, plus celle-ci est grande, plus le débit qui traverse le plan est grand, donc plus l'onde passe rapidement. Le relief sous-marin modifie la forme des vagues à l'approche des côtes, quand la couche d'eau est mince par rapport à l'amplitude de la vague : le front des vagues s'aligne parallèlement à la ligne de côte,

s'enroulant autour des caps. C'est le phénomène de réfraction. Ces déviations résultent du ralentissement des vagues quand le fond remonte ; ce ralentissement, dans les parties les plus entamées du front, engendre la rotation du front et le regroupement des vagues près de la côte : les vagues se rattrapent et se regroupent. La réfraction des ondes et le regroupement des vagues concentrent l'énergie : les vagues se dressent, et des courants très intenses sont créés.

Cette dernière étape du tsunami, le déferlement, est peut-être le plus difficile à modéliser : la vague est si haute (jusqu'à plusieurs dizaines de mètres) que la théorie linéaire n'est plus applicable. Quand elle n'est pas arrêtée par des falaises côtières ou par d'autres obstacles, une vague peut pénétrer sur plusieurs centaines de mètres à l'intérieur des terres. La submersion est aussi favorisée pour les séismes de subduction : lorsque la plaque océanique avance sous la plaque continentale, le



3. LES TROIS ÉTAPES DE L'ÉVOLUTION d'un tsunami sont le déclenchement, la propagation et le déferlement (*ci-dessus*). Une brusque déformation du fond marin, lors de la rupture d'une faille, par exemple, déplace l'eau située au-dessus. Dans les zones profondes de l'océan, l'onde se propage à la vitesse d'un avion de ligne. Avec une longueur d'onde jusqu'à plus de 1.000 fois plus grande que son amplitude verticale, la vague passe souvent inaperçue. En arrivant dans des zones moins profondes, l'onde ralentit à la vitesse d'une automobile, et elle envahit quelquefois la côte comme une marée. D'autres fois, la vague devient une dangereuse muraille d'eau : elle ralentit et est rattrapée par la vague suivante, ou elle se focalise vers un cap (*lignes pointillées*).

fond de l'océan est soulevé au large et la côte est abaissée. Vers le large, le front d'onde forme une crête, mais vers le continent, il forme une dépression. Ainsi, le retrait de la mer avant l'arrivée d'un tsunami favorise sa pénétration dans les terres. Les modèles comme les observations semblent indiquer que la vague est d'autant plus haute et pénètre d'autant plus loin qu'elle est précédée d'un creux.

Une population avertie

La prévision des tsunamis ne sauve des vies et ne limite les dégâts matériels que si les populations sont conscientes de la menace et réagissent de façon appropriée. Ainsi, le Japon, situé près des zones de collision de quatre plaques tectoniques, s'est trouvé à proximité de l'origine de plus du quart des tsunamis décrits de manière fiable

depuis 1895. Pourtant, au cours du XX^e siècle, seulement 15 pour cent des 150 tsunamis qui ont frappé le Japon ont fait des dégâts matériels ou des victimes. Ce chiffre est bien inférieur à ceux que l'on relève dans les pays qui se sont peu préoccupés d'informer leur population. Ainsi, près de la moitié des 34 tsunamis qui ont frappé l'Indonésie sur la même période ont fait des dégâts ou des victimes.

Cette différence résulte des moyens importants que le Japon a consacrés à la prévention des risques liés aux tsunamis : information, système d'alerte et protection des rivages, notamment par la plantation de forêts côtières et par la construction de digues. L'efficacité de ces mesures a été démontrée le 12 juillet 1993 : un séisme de magnitude 7,8, dans la mer du Japon, a fait déferler un tsunami en plusieurs points de la petite île d'Okushiri (voir l'encadré ci-dessous).

Cinq minutes après la secousse principale, l'agence météorologique japonaise annonçait à la radio et à la télévision qu'un tsunami était en route. Déjà, des vagues de 10 à 20 mètres avaient frappé la côte près du foyer du séisme, tuant de nombreuses personnes qui n'avaient pas eu le temps de fuir. À Aonae, petit village de pêcheurs au Sud de l'île, la plupart des 1 600 habitants avaient gagné les points les plus élevés dès qu'ils avaient senti les secousses. Cinq minutes plus tard, des vagues de cinq à dix mètres de haut détruisaient des centaines de commerces et d'habitations. Plus de 200 personnes périrent dans ce désastre, mais la rapidité de la réaction des habitants en sauva beaucoup plus.

Au contraire, en 1992, le tsunami qui frappa l'île de Flores, en Indonésie, tua plus de 1 000 personnes ; les survivants ont rapporté que la plupart des

L'information sauve des vies

Okushiri, Japon

12 juillet 1993

Hauteur maximale des vagues : 31 mètres

Nombre de victimes : 239

En 1993, des incendies se sont allumés après le tsunami qui a ravagé Aonae, petit village de pêcheurs sur la péninsule d'Okushiri. Des vagues de cinq à dix mètres de haut ont déferlé sur la côte moins de cinq minutes après le déclenchement d'un séisme de magnitude 7,8, entre 15 et 30 kilomètres du rivage, dans la mer du Japon. Les vagues ont submergé des digues construites après le passage d'un précédent tsunami, ont balayé les commerces, les habitations, les véhicules, les navires à quai et le matériel lourd stocké dans les docks, les transformant en autant de projectiles meurtriers et destructeurs. Les chocs provoquèrent des courts-circuits et des incendies que des débris rendirent inaccessibles aux véhicules des pompiers.

Les systèmes d'alerte et le bon comportement des habitants ont fortement limité le nombre de victimes : l'agence japonaise de météorologie avait donné l'alerte à temps, de sorte que de nombreux habitants se réfugièrent sur les hauteurs dès qu'ils ressentirent la secousse ; certains même n'attendirent pas l'alerte et s'enfuirent.

L'analyse de ce tsunami a montré que l'on peut limiter le nombre de victimes par des mesures de prévention. Les relevés détaillés des dégâts causés aux réseaux de transports et de communications, les récits des survivants et des services de secours, les mesures du déferlement et des inondations, ainsi que des relevés aériens, ont permis de constituer une banque de données précieuse pour les autres sites à haut risque. Cette structure urbaine est en effet comparable à d'autres côtes urbanisées, contrairement aux pays moins développés touchés par des tsunamis au cours de cette décennie.



La péninsule incendiée et dévastée après le tsunami.



Un véhicule de pompiers a été endommagé par la catastrophe.

habitants de la côte n'avaient pas compris que les secousses sismiques annonçaient l'arrivée d'un tsunami et qu'ils n'avaient pas essayé de se réfugier vers l'intérieur des terres. En 1998, la population de Papouasie-Nouvelle-Guinée ignorait également les risques, de sorte que le nombre de victimes a été considérable pour un événement de cette importance : lorsqu'ils ont ressenti le séisme, des villageois sont même allés observer le phénomène sur la plage ! Un séisme avait certainement, déjà, provoqué l'affaissement de la zone du lagon de Sissano en 1907, mais le tsunami résultant avait été trop faible pour faire beaucoup de victimes, et il était oublié.

Comment évaluer le danger des tsunamis ? L'analyse des événements récents est indispensable, et les consultations d'archives apportent d'autres informations précieuses. J. Landier et ses collègues ont rassemblé des informations sur plus de 200 tsunamis qui ont touché les côtes américaines depuis le XVIII^e siècle. Ils ont évalué à trois milliards de francs le coût cumulé des dégâts et à 470 le nombre de victimes, surtout en Alaska et à Hawaï. Dans ces régions, c'est la zone de subduction des Aléoutiennes qui menace : la probabilité qu'un séisme de magnitude au moins égale à 7,4 s'y produise avant 2008 est estimée à 84 pour cent.

Les archives ne mentionnent pas, toutefois, que la zone de subduction cascadienne menace les États de Washington, de l'Oregon et de la Californie du Nord. Brian Atwater, du Bureau géologique américain, a repéré dans l'État de Washington des dépôts de sable et de graviers qui auraient été apportés par des raz-de-marée consécutifs à des séismes de cette zone. Cette hypothèse est confortée par la découverte de dépôts analogues après les récents tsunamis de Flores, d'Okushiri, de Papouasie-Nouvelle-Guinée ou du Nicaragua. Au moins un des segments de la zone de subduction cascadienne semble être sur le point de rompre ; il risque de créer un grand séisme et un tsunami violent. Le risque est aussi élevé que dans le Sud de la Californie : on estime à 35 pour cent la probabilité que cette catastrophe survienne avant 2045.

En 1992, un tsunami qui a dévasté le cap Mendocino a montré aux États-Unis que des mesures s'imposaient. Les géographes de l'État de Californie ont établi des cartes qui répertorient tous les risques naturels pour les villes côtières d'Eureka et de Crescent City :

Ni le premier, ni le dernier Îles Aléoutiennes orientales

1^{er} avril 1946

Hauteur maximale des vagues : 35 mètres

Nombre de victimes : 165



Photographies de Corbis

Des parcmètres ont été aplatis à Hilo, sur l'île d'Hawaii.

Plusieurs tsunamis ont frappé les rivages de la ceinture de feu du Pacifique au cours de cette décennie, mais des vagues destructrices ont laissé des traces bien avant. Les séismes le long de la zone de subduction des Aléoutiennes ont engendré les pires tsunamis de l'histoire des États-Unis. Le 1^{er} avril 1946, un séisme de magnitude 7,8 provoqua un tsunami qui détruisit un phare en Alaska, tuant les cinq gardes-côtes qui l'occupaient. Le même tsunami arriva cinq heures plus tard à Hilo, à Hawaii, où il surprit la population. Des vagues de huit mètres de haut, chargées de débris de toutes sortes, entraînèrent des enfants qui attendaient le début de l'école et balayèrent un hôpital. En tout, 165 personnes périrent, dont 159 à Hawaii, et les dégâts s'élevèrent à 170 millions de francs.

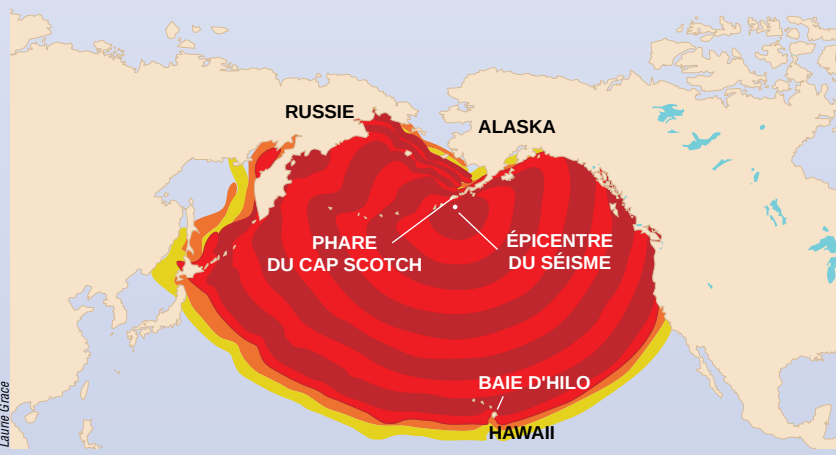
Le centre d'alerte aux tsunamis du Pacifique fut fondé en 1948, à la suite de cette catastrophe. Le centre régional d'alerte aux tsunamis d'Alaska fut fondé trois ans après la catastrophe du 28 mars 1964, qui tua plus de 100 personnes. Aujourd'hui, la reconnaissance des risques provenant de la zone sismique de la côte Ouest des États-Unis a conduit à d'autres actions préventives : cartographie des zones inondables par les tsunamis, établissement d'un réseau de détection en haute mer et campagnes de sensibilisation du public.



Le phare du cap Scotch avant le tsunami.



Le phare du cap Scotch après le tsunami.



les risques d'inondations consécutives à un tsunami, de séisme, de liquéfaction du sol ou de glissement de terrain y sont indiqués. Ces cartes indiquent les conséquences d'un fort tremblement de terre et du tsunami associé. Près de 300 000 personnes vivent ou travaillent à proximité immédiate du rivage, qui est fréquenté par environ autant de touristes. Un tsunami pourrait balayer cette population quelques minutes seulement après un grand tremblement de terre, ne laissant que très peu de temps pour donner l'alerte. Le montant des dégâts serait de 8 à 35 milliards de francs.

Un plan d'ensemble

En 1997, le Congrès des États-Unis a voté un crédit de 15 millions de francs pour la mise en place d'un programme national de réduction des risques liés aux tsunamis. Ce programme, mené dans les États d'Alaska, de Californie, d'Hawaii, d'Oregon et de Washington, a trois objectifs principaux : le zonage des risques sur la côte, la détection précoce des tsunamis et la détermination de leur importance, et l'information des populations.

L'évaluation des risques se fonde sur l'élaboration de cartes de risques, associées à des plans de secours et d'évacuation. De telles cartes n'ont aujourd'hui été dressées systématiquement qu'à Hawaii. Dans l'Oregon, trois villes seulement en sont pourvues. Six autres sont en cours de réalisation dans l'Oregon, en Californie et dans l'État de Washington. En Alaska, enfin, trois cartes seront dressées.

La confirmation fiable et rapide de l'arrivée d'un tsunami est indispensable aux responsables des services d'alerte. Des marégraphes ont été adaptés à la détection des tsunamis, et le réseau de détection des séismes a été renforcé : il donnera plus rapidement des informations plus complètes sur les caractéristiques des séismes. Ces équipements sont indispensables, mais les sismographes ne détectent que les tremblements de terre, pas les tsunamis, et les marégraphes ne détectent les tsunamis que près de la côte : ils n'apportent aucune information sur les vagues éloignées. Aussi, depuis les années 1950, 75 pour cent des alertes ont été déclenchées à tort. Cette proportion excessive décrédibilise le système d'alerte, fait courir des risques aux populations et coûte cher. La fausse alerte qui a provoqué

Les tsunamis en France

Les côtes du Pacifique subissent en moyenne un tsunami par an. Au centre de cet océan, les îles de la Polynésie française sont donc exposées au risque. Les tsunamis les plus destructeurs des 100 dernières années dans la région se sont produits notamment en avril 1946 et en mai 1960. Le tsunami d'avril 1946, déclenché au large des îles Aléoutiennes, a provoqué des dégâts importants dans tous les archipels polynésiens et a fait des victimes dans l'archipel des Marquises. Le 22 mai 1960, un séisme de magnitude 10 environ s'est produit au large du Chili faisant, avec le tsunami associé, plus de 2 000 victimes dans ce pays. Le tsunami, qui s'est propagé à travers l'océan Pacifique, a causé des dégâts matériels importants sur les côtes éloignées du Japon, des Philippines et d'Hawaï, et a tué plus de 200 personnes au total. Aux Marquises, le niveau des inondations dans les baies de Nuku-Hiva et de Hiva-Oa a atteint sept à dix mètres.

Plus récemment, le 20 juillet 1995, un séisme de magnitude 8,1, au large du Chili, engendra un tsunami dont les vagues montèrent à deux ou trois mètres dans le port de la baie de Taahuku, sur l'île d'Hiva-Oa. Plusieurs bateaux furent emportés par un tourbillon formé derrière la jetée ; deux ou trois coulèrent. Dans la même baie, des vagues d'un à deux mètres furent observées le 21 février 1996 pour un séisme de magnitude 6,6 au large du Pérou.

Sur l'ensemble de la Polynésie, c'est dans l'archipel des Marquises que les amplitudes des vagues associées aux tsunamis sont les plus fortes. Les Marquises sont des îles hautes dont les côtes plongent dans l'océan avec une faible pente, de cinq à dix degrés, et qui présentent de grandes baies ouvertes vers l'océan, dépourvues de barrières de récifs. Ces deux caractéristiques amplifient les tsunamis. Dans les autres archipels de la Polynésie française (îles Gambier, îles de la Société, îles Australes et archipel des Tuamotu), l'énergie des tsunamis est partiellement réfléchiée par des côtes pentues (environ 30 degrés) aux profils plutôt convexes, et les conséquences en sont donc atténuées.

Une antenne du Laboratoire de détection et de géophysique du Commissariat à l'énergie atomique, installée à Tahiti, étudie et surveille ce risque. Les ondes sismiques se propageant beaucoup plus vite que les ondes hydrauliques, la détection rapide des premières alertes de l'arrivée d'un tsunami. Sur ce principe, les données du réseau sismique polynésien sont utilisées pour la localisation du séisme en temps réel, la détermination de ses principaux paramètres (en particulier, sa magnitude) et l'évaluation du

déclenchement éventuel d'un raz-de-marée. Le système a été automatisé pour les forts séismes, potentiellement générateurs de tsunamis.

Parallèlement à l'alerte, notre laboratoire s'intéresse aussi à la simulation numérique et établit des cartes d'inondation pour les Marquises. Un tsunami équivalent à celui de 1960 causerait aujourd'hui, en Polynésie française, des dégâts bien supérieurs et vraisemblablement de nombreuses victimes en raison du développement du tourisme en bord de mer.

En France métropolitaine, en revanche, le risque de tsunami d'origine tectonique est quasi nul. Le dernier tsunami important en Europe s'est produit en 1755. Il a été déclenché par un séisme au large de Lisbonne et il a fait plus de 5 000 victimes sur les côtes du Portugal, de l'Espagne et du Maroc. Il fut à peine observé sur les côtes françaises, assez éloignées de sa zone d'origine.

Toutefois, notre pays n'est pas à l'abri de raz-de-marée déclenchés par des glissements de terrain sous-marins, tel

celui d'octobre 1979 dans la Baie des Anges, en Méditerranée. Au large de Nice, un glissement de terrain a entraîné la destruction d'une partie du chantier du nouveau port de Nice, en face de l'aéroport : la digue en construction s'est effondrée sous la mer, causant la mort d'une dizaine de personnes présentes sur le chantier. À peu près simultanément, un mini raz-de-marée a été observé le long d'une portion de côte de 60 kilomètres, entre Cannes et Menton. À dix kilomètres du chantier, la ville d'Antibes a été inondée par une vague de deux mètres de haut environ.

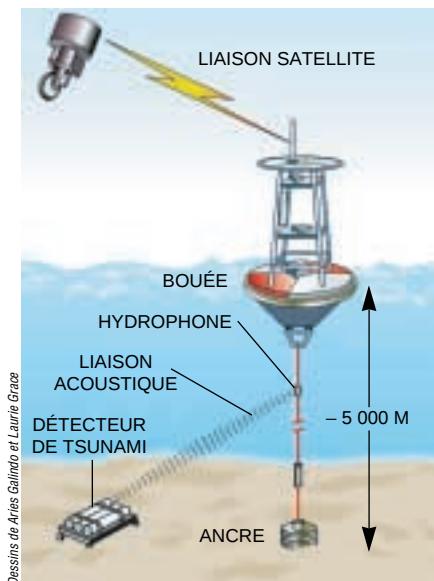
Le mécanisme exact de cette catastrophe n'est pas encore

totalement déterminé. Selon nos simulations numériques, l'inondation observée vers l'aéroport s'explique par l'effondrement de dix millions de mètres cubes : trois millions de mètres cubes de remblai et sept millions de mètres cubes de sédiments sous-jacents, situés entre 0 et 150 mètres de profondeur. Toutefois, les oscillations du niveau de la mer dans la baie ne semblent explicables que par le déplacement de 50 à 100 millions de mètres cubes de sédiments situés sur les fortes pentes au large de Nice. La forme de la baie à Antibes aurait amplifié ces oscillations et favorisé la pénétration de la mer dans la ville. L'effondrement des remblais apportés pour la construction du port de Nice a-t-il déclenché cette avalanche sous-marine plus importante ou, au contraire, les remblais ont-ils été emportés par l'effondrement des couches sous-jacentes ?

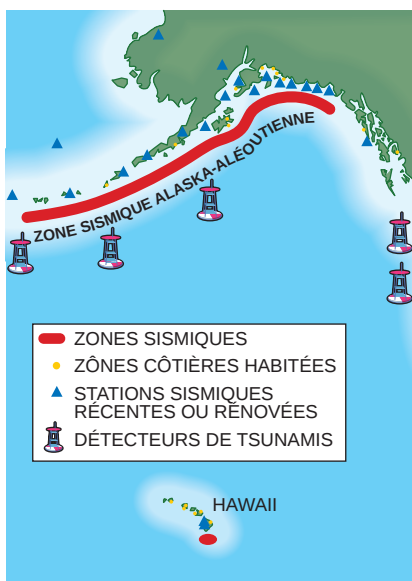
Philippe HEINRICH,
Laboratoire de détection et de géophysique, CEA



Le 16 octobre 1979, une vague de deux mètres de haut à balayé les rues d'Antibes, suite à un glissement de terrain sous-marin.



Dessins de Arias Gallardo et Laurie Graze



4. DES DÉTECTEURS SOUS-MARINS de tsunamis (à gauche) et un réseau de surveillance sismique (triangles bleus sur la carte) renforcé devraient améliorer la détection précoce des tsunamis au large des États-Unis. Les détecteurs sous-marins sont constitués de capteurs posés au fond de la mer, qui envoient par signaux acoustiques leurs enregistrements à une bouée de surface (photographie à droite) ; celle-ci transmet les informations par satellite aux services responsables du déclenchement des alertes.



Michelle G. Bullock, NOAA Corps

l'évacuation d'Honolulu, le 7 mai 1986, a ainsi coûté plus de 200 millions de francs en salaires et en transactions commerciales perdues.

Pour améliorer la situation, les États-Unis installent aujourd'hui un réseau de six stations sous-marines de détection des tsunamis et d'alerte : le système *DART* (l'acronyme anglais de «détection et alerte des tsunamis en pleine mer») devrait être opérationnel et fiable d'ici deux ans. Les sismographes répartis autour de la ceinture de feu du Pacifique permettent de localiser presque instantanément un grand tremblement de terre en Alaska. En quelques instants, avant que l'on n'observe la moindre vague, des programmes informatiques calculent le temps que mettrait un tsunami déclenché par le séisme pour atteindre Hawaii. Près des côtes, des marégraphes détectent l'arrivée d'un tsunami après quelques minutes, et des détecteurs placés en haute mer révèlent le passage d'ondes dangereuses.

Ces détecteurs mesurent, au fond de la mer, la variation de pression associée à la déformation de la surface de l'eau, lorsque la vague passe : cette variation de pression est transmise à un cristal piézoélectrique, dont la fréquence propre de vibration est ainsi modifiée. Même à 6 000 mètres de profondeur, ils détectent un tsunami de seulement un centimètre de haut. Les bateaux et la houle ne perturbent pas

ces mesures, car ils sont de trop petites dimensions pour que les variations de pression qui leur sont associées parviennent au fond : les longueurs d'onde des ondes associées sont courtes et seule la surface de l'eau est mise en mouvement.

Nous avons placé les premiers capteurs au fond du Pacifique Nord en 1986, et nous enregistrons le passage des tsunamis depuis cette date. Toutefois, avec ces systèmes, nous devons repêcher les appareils pour accéder aux informations. Afin de suivre en direct le passage des tsunamis, nous avons alors équipé ces capteurs d'un émetteur acoustique qui envoie les mesures à une bouée ancrée à proximité ; cette dernière transmet les informations par satellite vers des stations au sol. Les bouées relais, la liaison satellite et les capteurs sous-marins ont prouvé leur fiabilité dans de nombreux systèmes de mesures en haute mer ; notamment 70 bouées météorologiques déployées le long de l'Équateur ont renseigné sur le phénomène climatique El-Niño. En revanche, les quatre prototypes de transmetteur acoustique que nous avons testés sont tous tombés en panne assez rapidement ; nous améliorons aujourd'hui cette partie de l'appareillage.

D'ici à deux ans, nous installerons cinq stations dans le Pacifique Nord, de l'Ouest des Aléoutiennes à l'Oregon, et une sixième le long de l'Équateur, afin

d'intercepter le passage des tsunamis déclenchés au large de l'Amérique du Sud. Si nous pouvions disposer plus de bouées, nous réduirions le risque que des tsunamis ne nous échappent, mais nous manquons d'argent. Nous avons donc recours à la modélisation numérique : combinées aux mesures des bouées, les simulations permettront d'obtenir des prévisions plus précises pour aider les services de protection civile, qui n'ont souvent que quelques minutes pour décider de déclencher ou non une alerte, et ainsi sauver des vies.

Frank GONZÁLEZ dirige le programme de recherche sur les tsunamis et le Centre de cartographie des inondations associées aux tsunamis du Laboratoire de l'environnement marin du Pacifique, à Seattle.

James F. LANDER et Patricia A. LOCKRIDGE, *United States Tsunamis (Including United States Possessions) : 1690-1988*, NOAA / National Geophysical Data Center, Publication 41-42, 1989.

F.I. GONZÁLEZ et E.N. BERNARD, *The Cape Mendocino Tsunami*, in *Earthquakes and Volcanoes*, vol. 23, n° 3, pp. 135-138, 1992.

Roy HYNDMAN, *Les tremblements de terre géants du Nord-Ouest du Pacifique*, in *Pour la Science*, février 1996.

Walter C. DUDLEY et Min LEE, *Tsunami!*, University of Hawaii Press, 1998.
