

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.

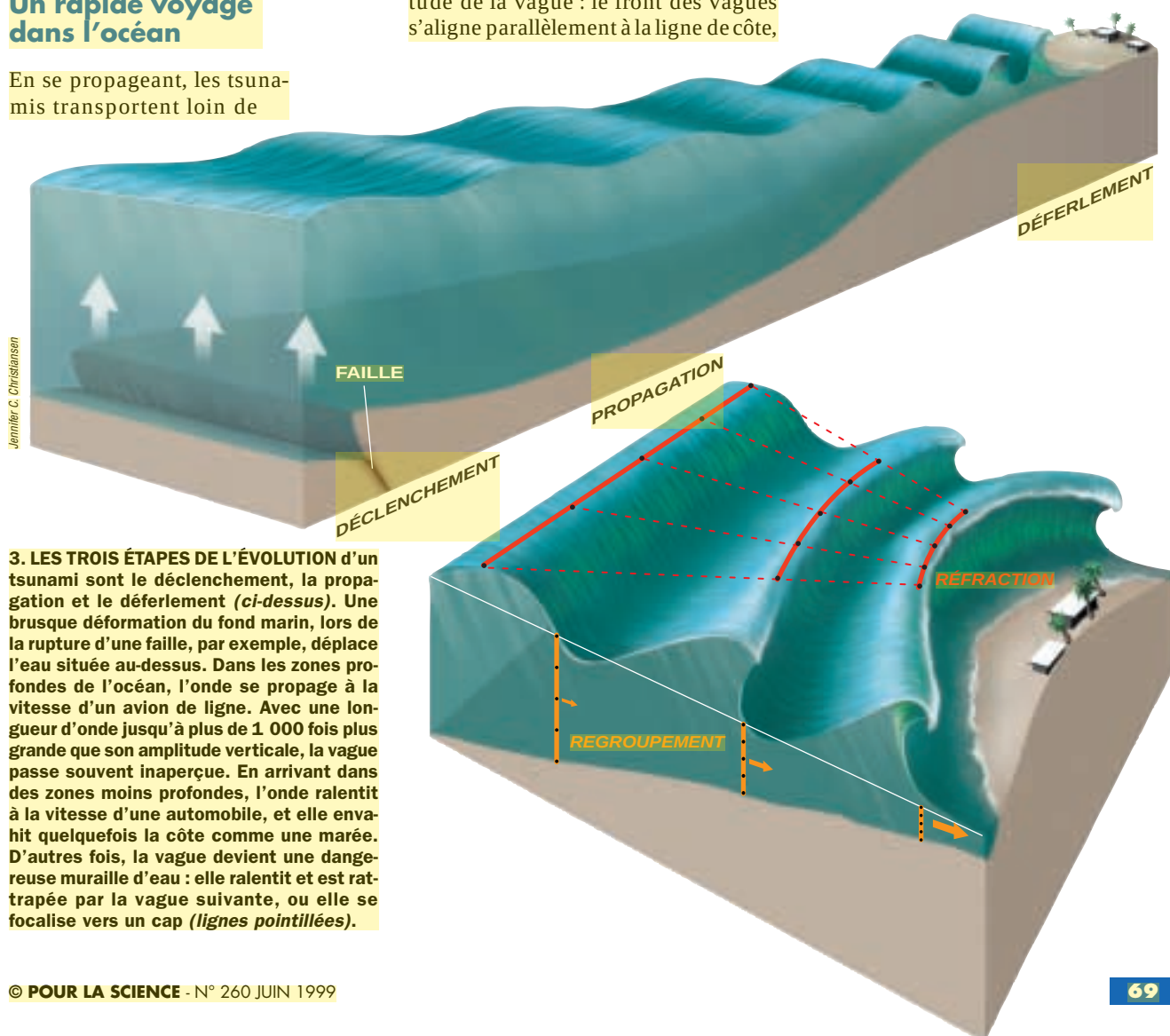
Un rapide voyage dans l'océan

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.