Annexe 4

La prévention des tsunamis (évaluation de l'aléa, alerte, préparation)

François Schindelé
CEA

Tsunami signifie « onde de port », car le phénomène est observé essentiellement dans les ports, nous en avons d'ailleurs eu un exemple méconnu en 2003 en Méditerranée occidentale, où suite au séisme de Boumerdès, un tsunami de 10-30 cm a été précédé d'une chute du niveau de la mer de 50 cm à 1,5 m, dans 8 ports français, avec de forts courants.

Le premier niveau d'alerte concernera la partie maritime du bord de mer qui peut être impactée par des forts courants, des tourbillons et des mascarets dangereux pour les baigneurs, pêcheurs et infrastructures portuaires.

L'événement du Japon est très spécifique : 300 km de long, magnitude 9, déplacement maximal entre 25 et 30 m. Les variabilités des dimensions et des déplacements des séismes jouent sur celles des tsunamis qu'on essaye de prévoir.

Quand le tsunami se propage au large, le phénomène est linéaire, d'autant qu'on connaît maintenant la topographie des fonds dans à peu près tous les bassins.

Le problème est l'impact à la côte. La prévision dépend de la qualité des données bathymétriques dont on dispose, mais là, le phénomène devient non linéaire et l'amplification peut passer d'un rapport de 1 à 10 ou plus selon les endroits.

On ne parle souvent que de l'inondation, mais il faut faire attention au retrait (qui peut être un problème pour les centrales nucléaires, qui peuvent alors avoir à fonctionner sans eau, et dont la réserve doit permettre de tenir une vingtaine de minutes).

An Japon, le 11 mars, il y a eu un très léger retrait avant, perceptible sur quatre marégraphes. Quand la source est vraiment en dessous de la côte, il n'y a pas de retrait.

Le tsunami est généré non pas par les ondes sismiques mais par le déplacement/élévation/affaissement du fond de la mer. L'angle de plongement de la faille joue beaucoup. Les ondes se propagent ensuite de part et d'autre. Lorsqu'elles arrivent en bord de côte, elles ralentissent, avec réduction de longueur d'onde et amplification si la pente est faible. Si la pente est très forte, une partie des ondes va être réfléchie ; c'est le cas sur les atolls de Polynésie française, où le corail est une protection naturelle. Les Japonais font pousser du corail autour des îles du sud.

Trois paramètres du tsunami sont mesurés sur le terrain : le run-up, la hauteur et la profondeur d'inondation.

Le run-up est la hauteur maximale de déferlement, valeur souvent mélangée par les médias avec la hauteur de la vague en bord de côte ou à terre : l'événement de 1896 a fait 38 m de run-up et non pas 38 m de hauteur.

Le dernier paramètre est la profondeur de l'inondation, reliée à la topographie locale : pente faible, le tsunami rentre loin avec un run-up modéré ; pentes fortes, le tsunami ne rentre pas loin, mais avec un run-up qui est plus important.

Enfin, en fonction de la direction d'arrivée, le tsunami n'a pas les mêmes effets. La problématique d'estimation des dégâts est ici : à amplitude égale et selon la direction d'arrivée et la topographie des fonds, on peut avoir des différences d'un facteur 10.

Ceci peut maintenant être modélisé, mais ce n'était pas possible en 1970, au moment de la construction de la centrale, où la description mathématique et physique du déplacement du sol lors d'un séisme et la simulation du phénomène tsunami n'étaient pas connues.

Au Japon, la côte principalement impactée est située juste en face du maximum d'amplitude du déplacement, avec plus de 10 m , jusqu'à parfois 38 m. À Fukushima, la vague était de 10 mètres et le run-up de 14/15 m (supérieur à ce qui avait été prévu).

À Sumatra (Banda Aceh), le run-up a atteint par endroits un maximum de 50 m.

La distribution des événements (tsunamis de toute taille, y compris quelques centimètres) sur l'ensemble de la période historique donne 59 % dans le Pacifique et 25 % en Méditerranée, et pour le XX^{e} siècle, 77 % dans le Pacifique et 9 % en Méditerranée. Pour la période historique, il y a peut-être une sur-représentation de la Méditerranée, liée au fait que nous avons plus d'informations.

L'événement de Sumatra a fait autant de victime que la somme de tous les tsunamis historiquement connus.

La stratégie d'atténuation des effets comprend l'évaluation, la prévention/préparation et les systèmes d'alerte.

On a construit des bases de données nourries avec les éléments des tsunamis passés.

Les paramètres sismologiques importants sont non seulement la magnitude, mais également la longueur et la largeur de la faille ou sous-faille, l'azimut, la pente, la rigidité du milieu et le déplacement moyen pour la faille ou le déplacement bloc par bloc, l'homogénéité ou l'inhomogénéité du déplacement…

Pour mars 2011, si on avait considéré la taille normale d'un séisme de magnitude 9 sur 500 km de long, de façon moyenne, on aurait sous-estimé l'événement d'un facteur 2.

En Polynésie, le CEA a modélisé dans différentes baies quelle peut être l'inondation provoquée par un tsunami généré tout autour de l'Océan Pacifique. Les effets sont très différents en fonction de la taille de la baie, de sa direction vers le large et de l'angle d'arrivée.

Un programme de prévention existe à l'Unesco depuis une quinzaine d'années (préparation et sensibilisation des populations : le Chili a beaucoup travaillé sur la didactique et les ouvrages scolaires).

Les systèmes d'alerte : on détecte d'abord le séisme depuis un réseau sismologique, ensuite on détecte les variations du niveau de la mer au large à l'aide d'un réseau de mesure du niveau de la mer (marégraphes, tsunamimètres, données envoyées par bouées/satellite ou par câbles). La simulation numérique complétée des données des tsunamimètres permet maintenant de passer en prévision dans le Pacifique où il y a suffisamment de capteurs. Les télécommunications sont primordiales. L'Unesco a été mandaté pour coordonner les systèmes d'alerte aux tsunamis. Les centres d'alerte, dans le Pacifique, sont le Pacific Tsunami Warning Center à Hawaï (qui couvre aussi l'Océan Indien et la Caraïbe), l'Alaska, le Japon, la Polynésie française, et le Chili.

Sur la Méditerranée, la France met en place un centre d'alerte tsunami dans le cadre du système d'alerte coordonné par l'Unesco, et qui sera opérationnel en juillet 2012.

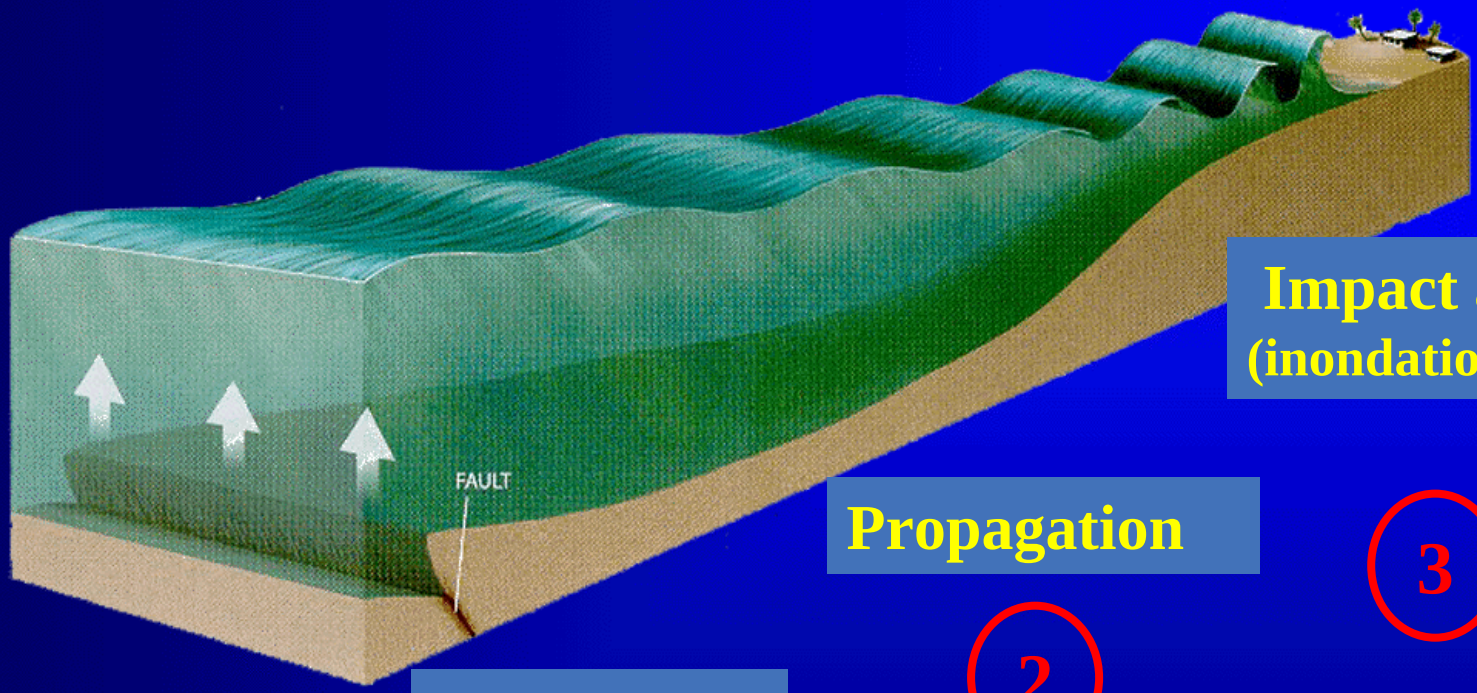
Sur le tsunami du 11 mars, l'un des marégraphes a récupéré une donnée de 9,30 m en bord de mer. Les données des bouées GPS (6 m mesurés au large d'Honshu) et des tsunamimètres sont primordiales (6 m mesurés également) pour installer un système d'alerte en champ proche (ici, on peut penser aux Antilles). Un tsunamimètre est un capteur de pression posé au fond, il transmet ses données par câble, il y en a 5 au Japon, 6 en Caraïbes, 5 dans l'Océan Indien, plus d'une trentaine dans le Pacifique.

La prévention des tsunamis

(évaluation de l'aléa, alerte, préparation)

François Schindelé, CEA/DASE
Expert International tsunami
Président du
Groupe Intergouvernemental de Coordination du Système d'Alerte aux Tsunamis en Atlantique nord-est et méditerranée
Unesco/COI/GIC/SATANEM

Les 3 étapes du phénomène tsunami



Generation

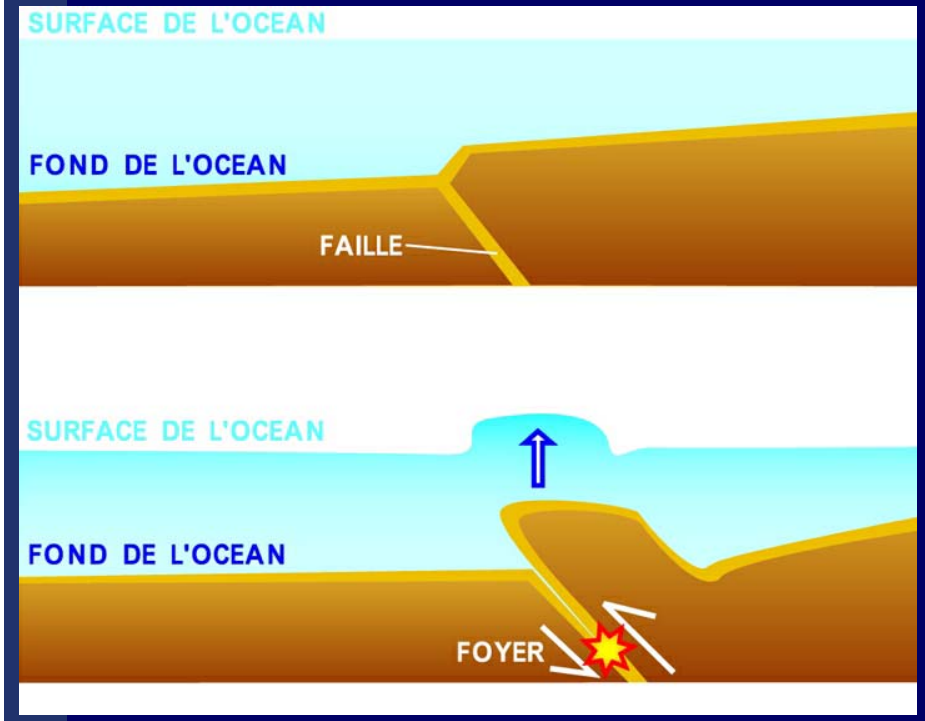
1

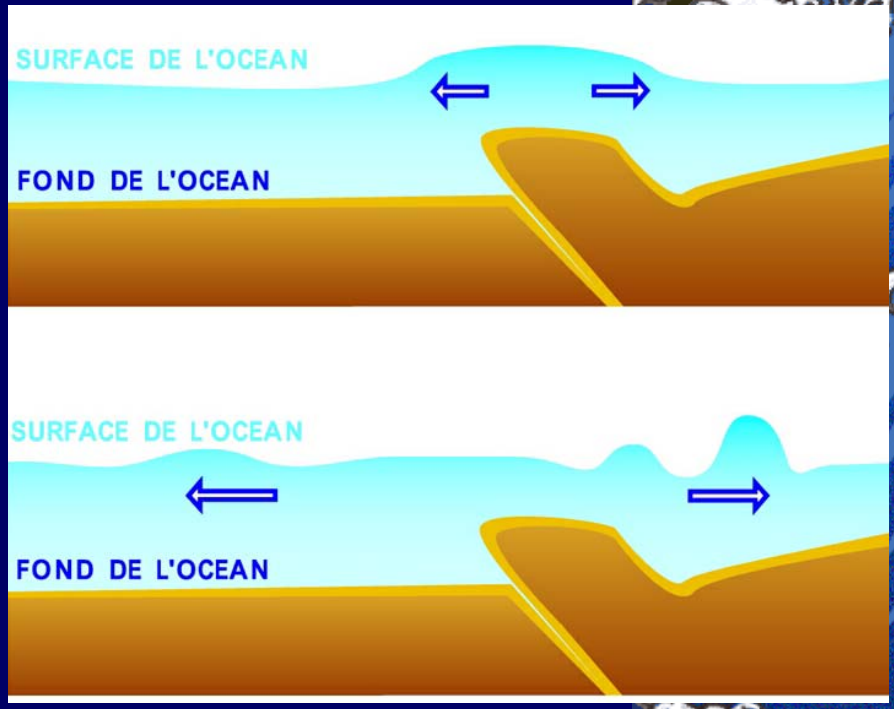
Propagation

2

Impact à la côte
(inondation, retrait)

3


SURFACE DE L'OCEAN
FOND DE L'OCEAN
FAILLE
SURFACE DE L'OCEAN
FOND DE L'OCEAN
FOYER


SURFACE DE L'OCEAN
FOND DE L'OCEAN
SURFACE DE L'OCEAN
FOND DE L'OCEAN

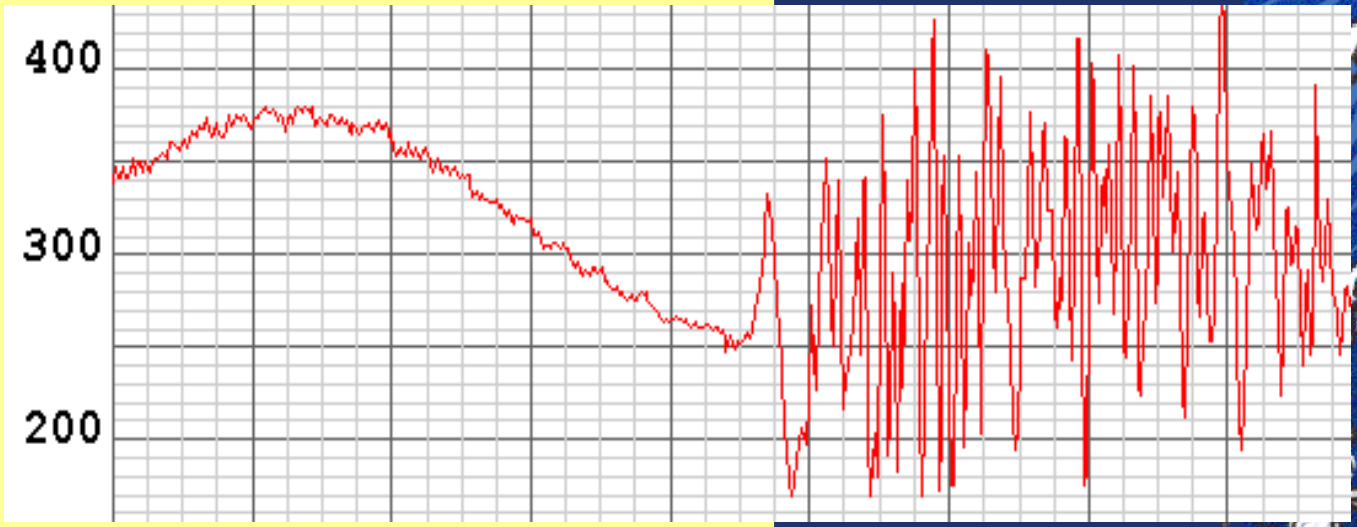
TSUNAMI du PEROU
23 JUN 2001
16.2S 73.4W Mw=8.4

- ***SERIE (4-5 larges) de VAGUES OCEANIQUES***

  de très grandes longueurs d'onde

- ***La plupart sont GENERES par des SEISMES***
- ***Amplitude : quelques cm à 30 m***
- ***Période : 5 à 60 minutes***
- ***Longueur d'onde : 100 m à 100 km***

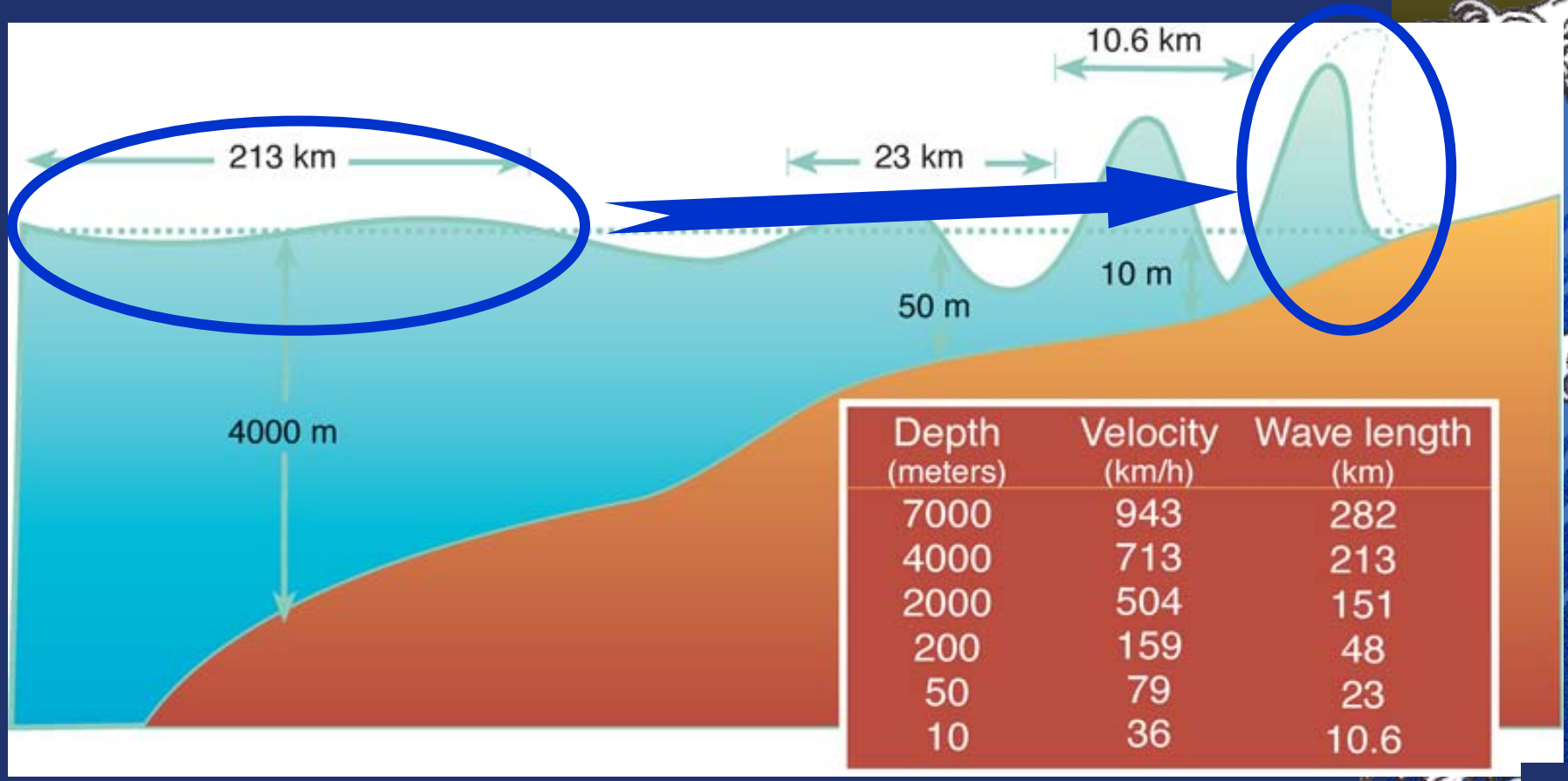
Arica, Chili



Amplification proche de la côte

- la vitesse des vagues ne varie qu'en fonction du fond de la mer
- cette vitesse décroit à l'approche de la côte
- la conservation de l'énergie entraîne une amplification des vagues

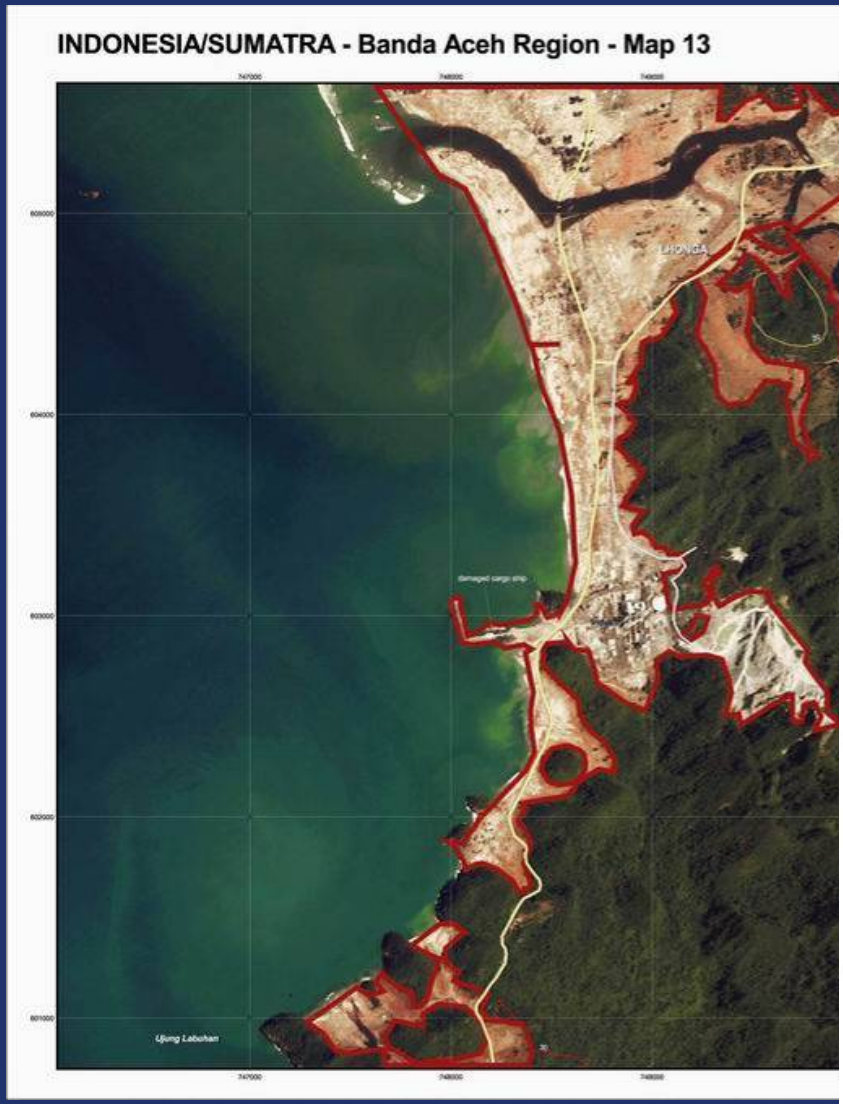
$$c = \sqrt{gh}$$

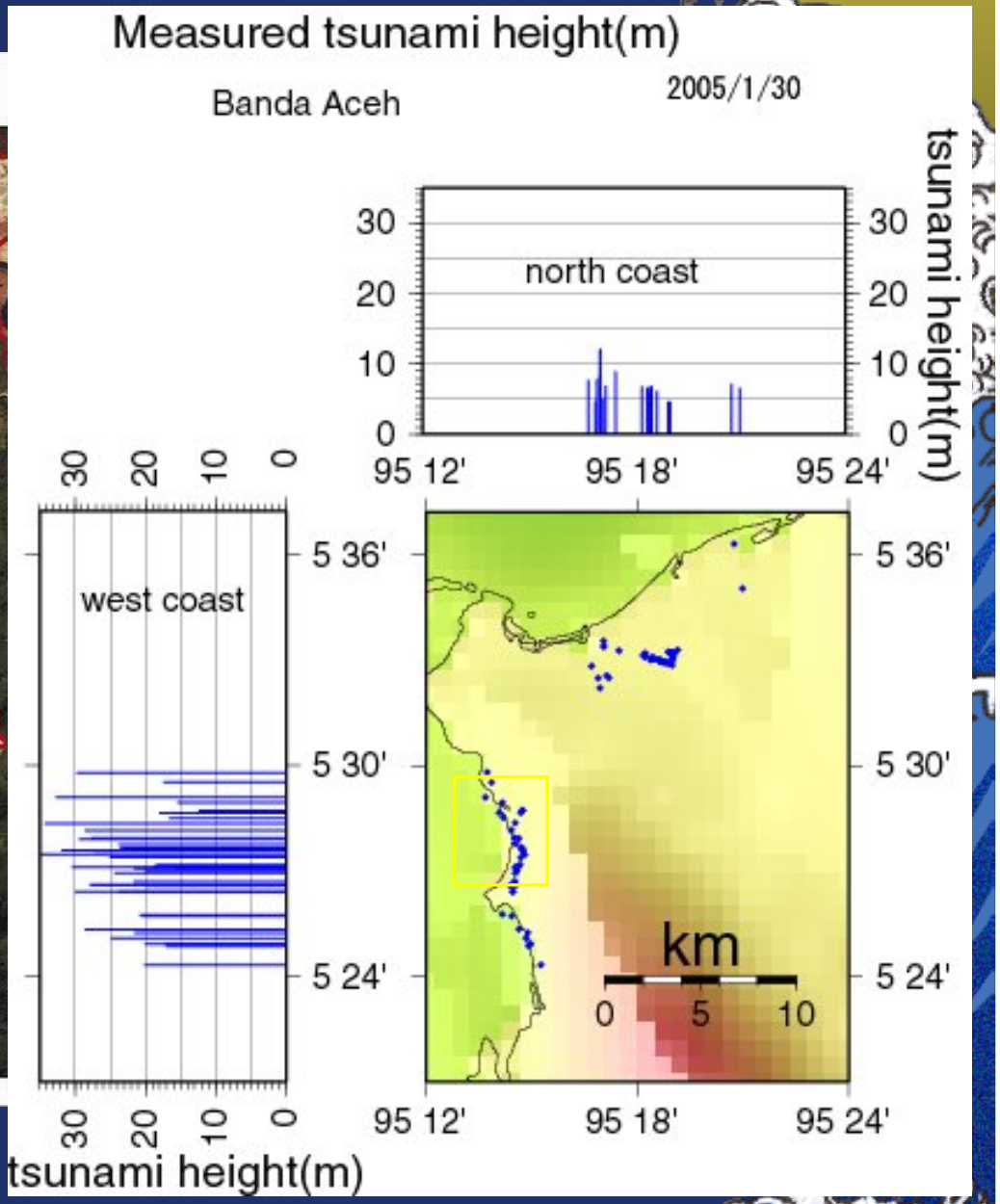


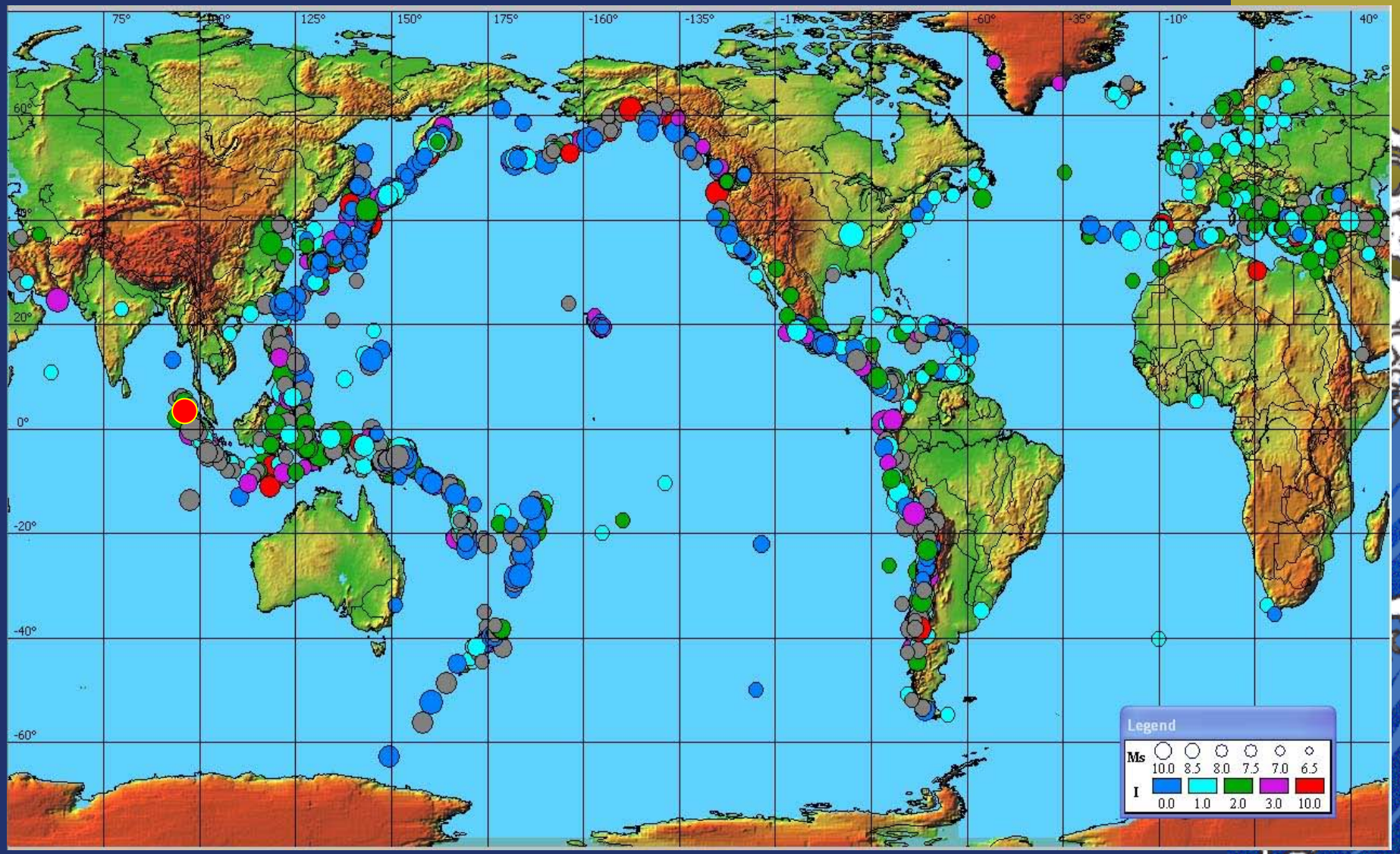
Depth (meters)	Velocity (km/h)	Wave length (km)
7000	943	282
4000	713	213
2000	504	151
200	159	48
50	79	23
10	36	10.6

Run-up et Inondation

Impact du Tsunami sur les côtes de Sumatra



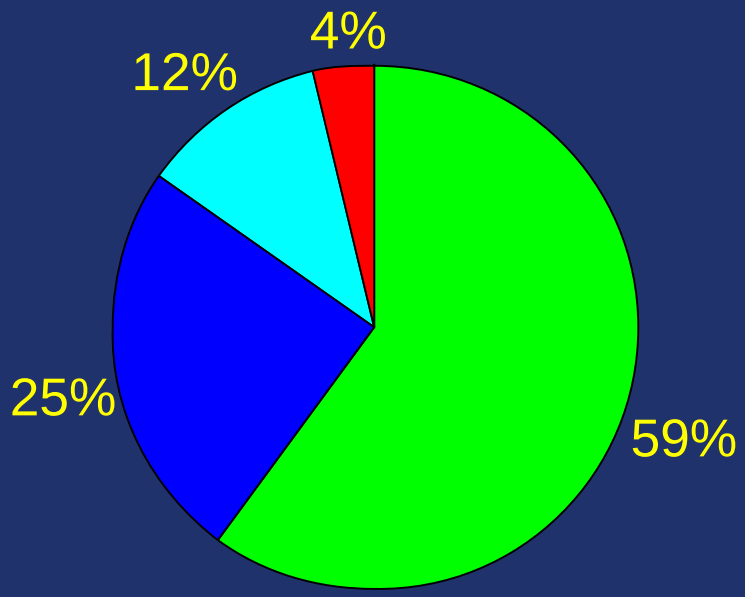




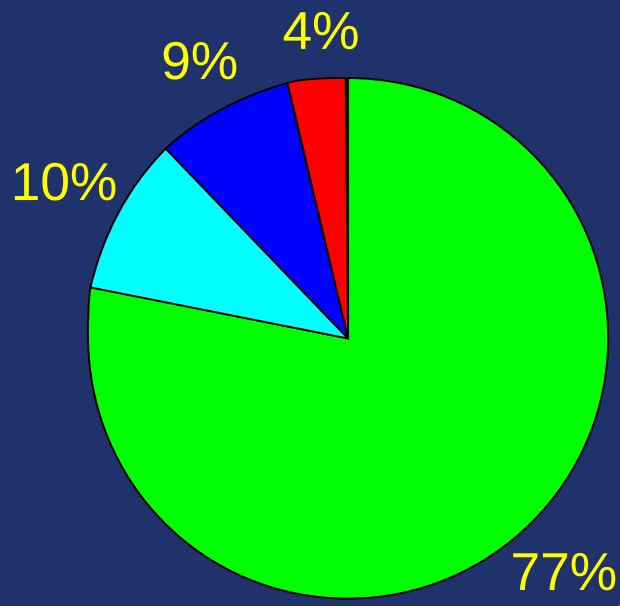
Sources des tsunamis dans le Monde (2180 événements de 1628AC à 2005)

Distribution des événements en fonction des principales régions

- Océan Pacifique
- Mer Méditerranée (incluant la mer noire)
- Océan Atlantique (incluant la mer Baltique)
- Océan Indien



Période historique complète



Pour le XXème siècle

Tsunamis du XXème siècle (1901-2000)

	Monde	Pacifique
Tous les tsunamis	911	704
(évts par année)	9.1	7.0
Tsunamis avec Hmax 1 м	252	213
(évts par année)	2.5	2.1
Tsunamis avec Hmax > 5 м	96	82
(évts par année)	1.0	0.8

Tsunamis dont la hauteur dépasse 5 м à une distance > 5000 км (tsunamis trans-océaniques :

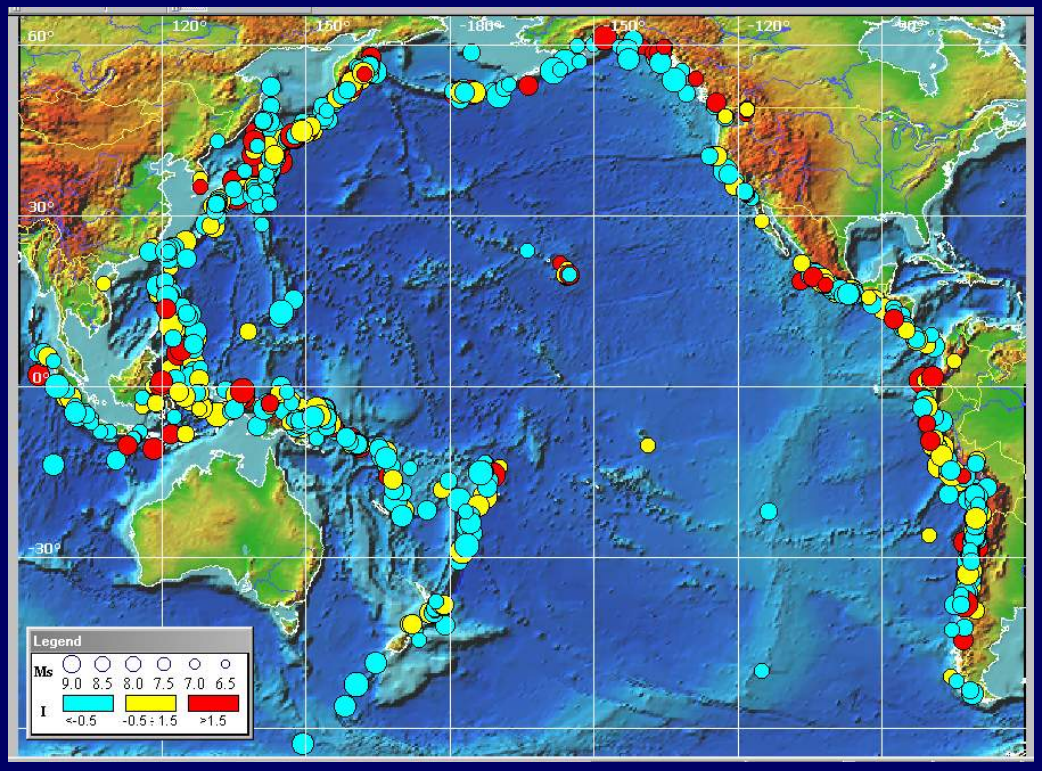
5 cas (tous dans le Pacifique)

1946 Aléoutiennes
1952 Kamchatka
1957 Aléoutiennes
1960 Chili
1964 Alaska

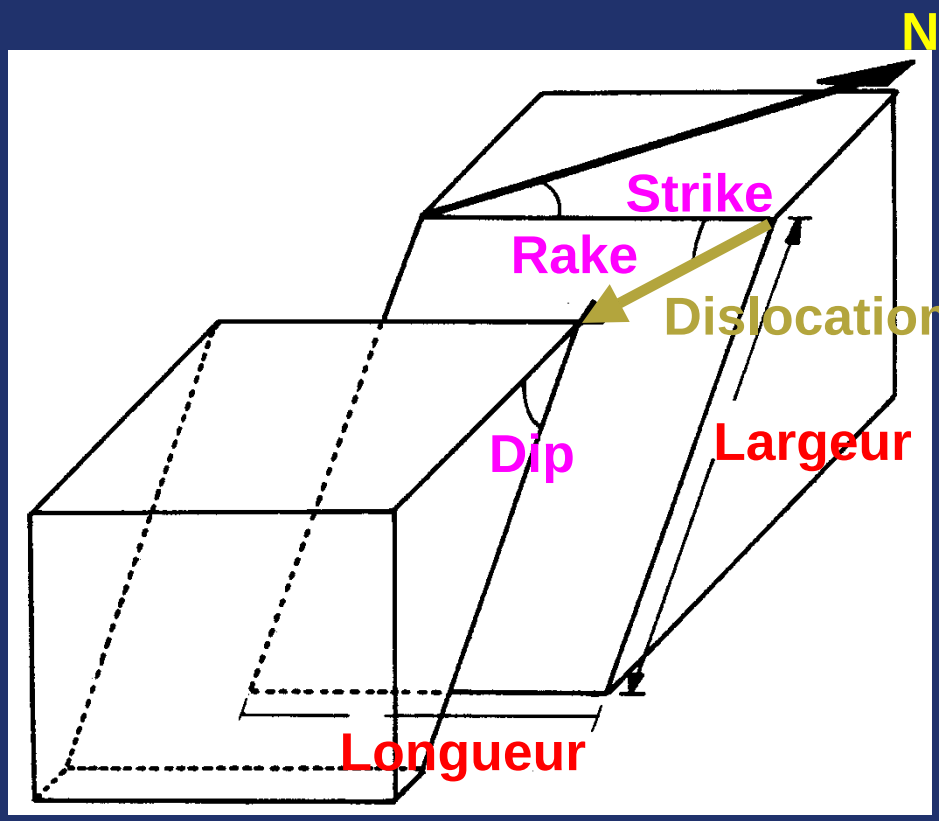
Stratégie d'Atténuation des effets
Evaluation, Prévention, Alerte

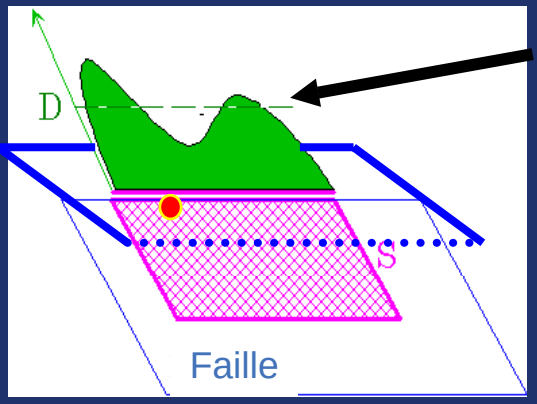
Stratégie de Réduction du danger
EVALUATION

COMPOSANTE	TECHNOLOGIE	PRODUITS
1. EVALUATION	• *Etudes Historiques* • *Prospection post* • *Simulations Num.*	• *Base de données* • *Cartes d'Inondation* *Cartes d'évacuation*



Mécanisme au foyer





D : glissement moyen

S : SURFACE de la Rupture

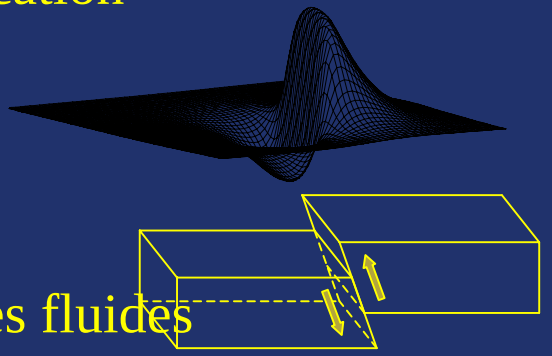
μ : Rigidité

Moment Sismique

$Mo = \mu S D \quad (N.m)$

Modélisation (source = séisme)

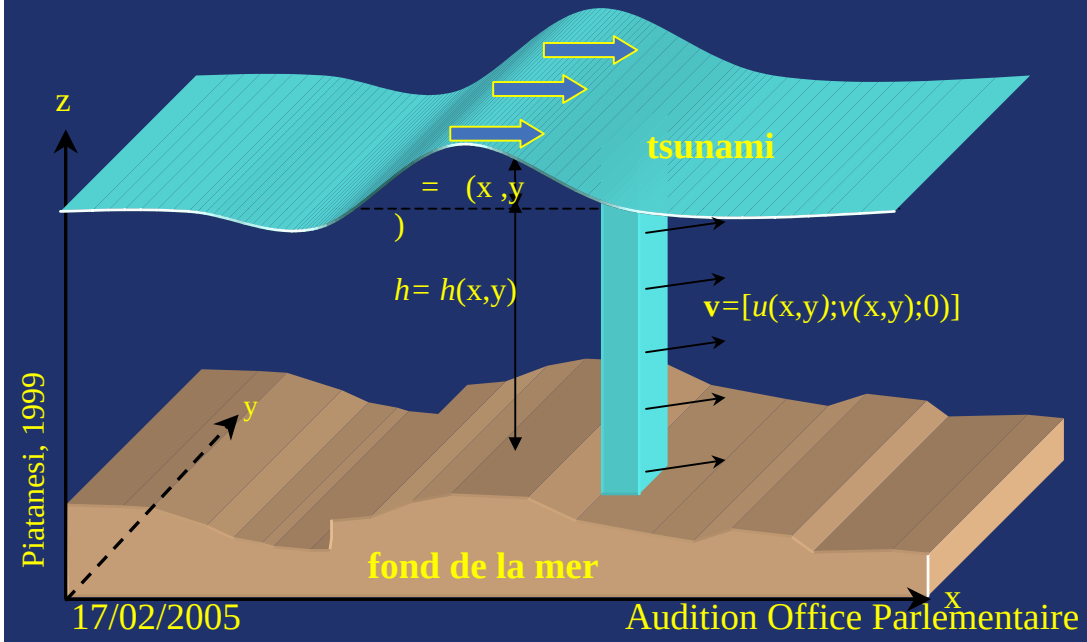
- Modéliser l'initiation par un séisme : dislocation élastique
  - déformation transmise *intégralement* et *instantanément* à la surface de l'eau
- Résoudre les équations de la mécanique des fluides
  - approximation ondes longues ***l*** >> *h* →



$$c = \sqrt{gh}$$

$M_0 = \quad ULW$

M_0 moment sismique
U déplacement
rigidité
L (W) longueur de la faille (largeur)



$$\frac{\partial(\eta+h)}{\partial t} + \nabla.[\mathbf{v}(\eta+h)] = 0$$

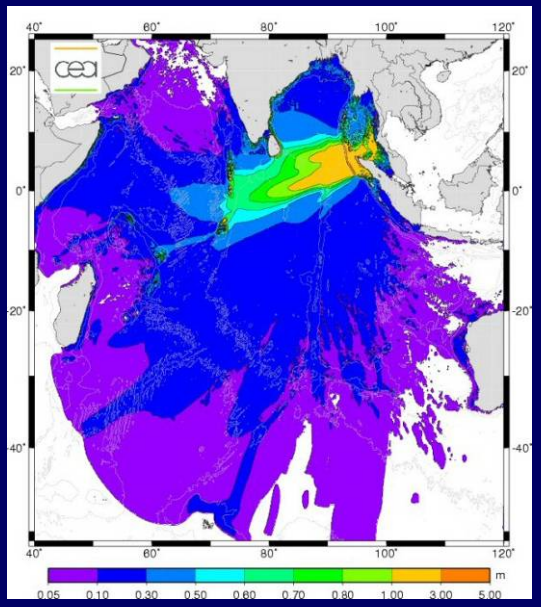
$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v}.\nabla)\mathbf{v} = -\mathbf{g}.\nabla\eta + \Sigma\mathbf{f}$$

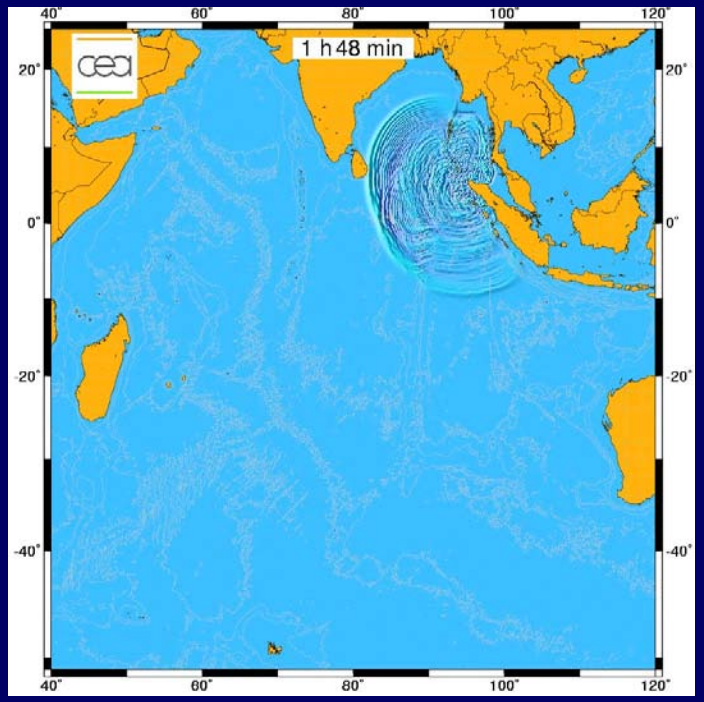
g gravité
v vitesse horizontale
h surface de l'eau

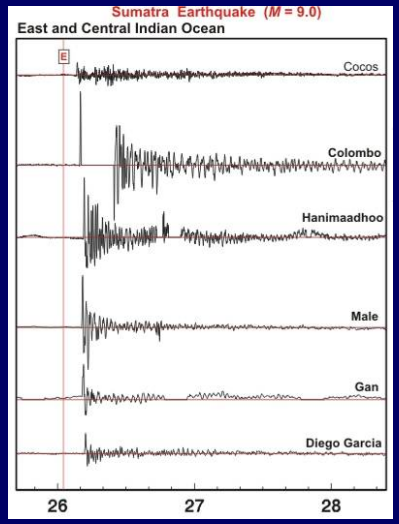
TECHNOLOGIE

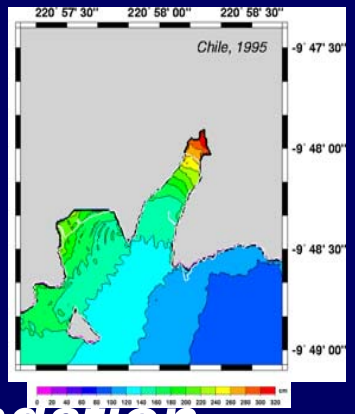
- ***Simulations Numérique***

Propagation





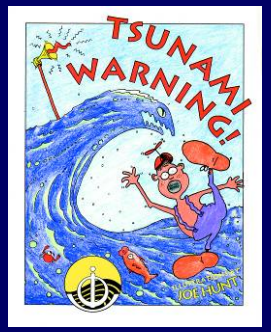


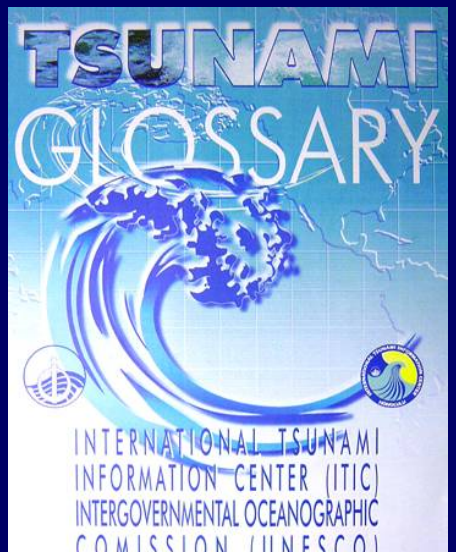


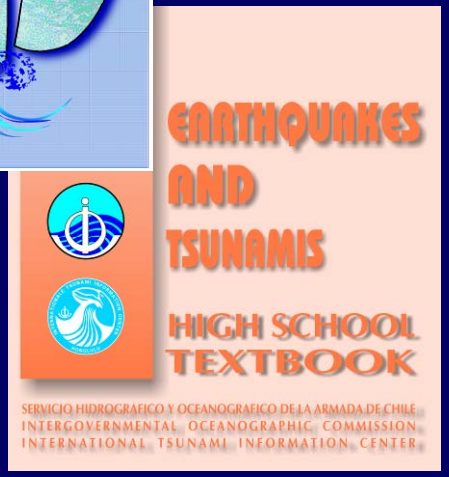
Inondation

Stratégie d'atténuation des effets
PREVENTION

COMPOSANTE	TECHNOLOGIE	PRODUITS
2. PREVENTION	• *Education* • *Communication*	• *Brochures, Livres* • *Conférences* • *Messages (TV, Radio, WWW ...)* • *Plan de Secours* • *Signalisation*

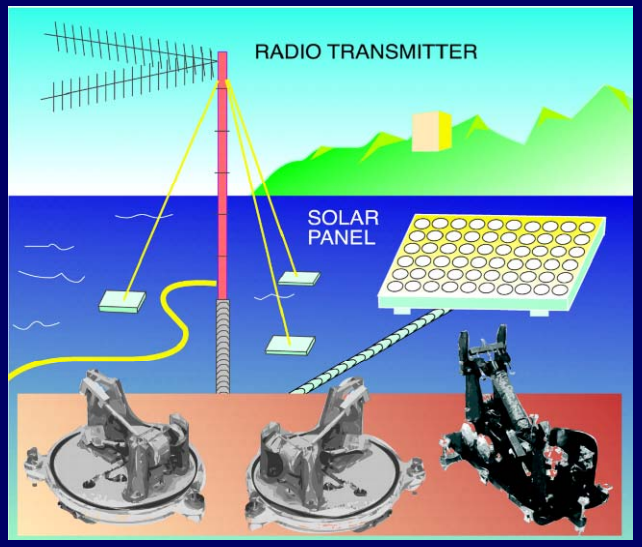


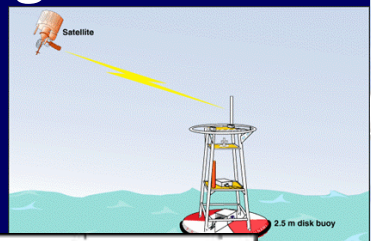


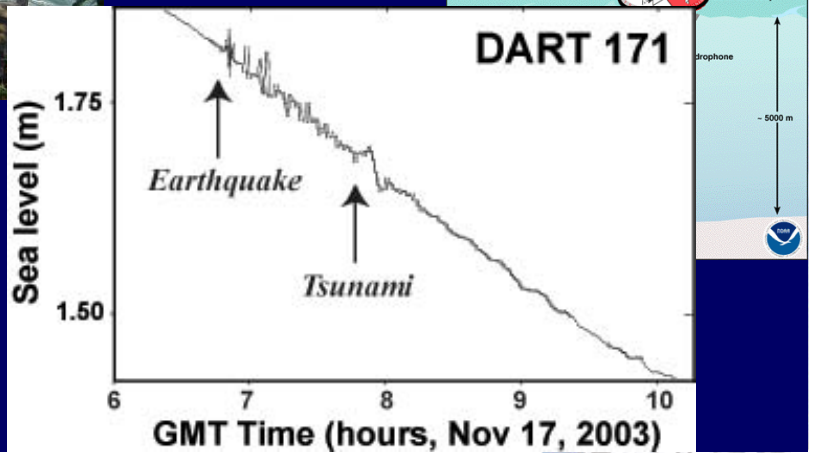


Stratégie d'atténuation des effets
ALERTE

COMPOSANTE	TECHNOLOGIE	PRODUITS
3. SYSTEME D'ALERTE	• *Sismologie* • *Niveau de la mer* • *Simul. Numérique* • *Télécomm*	• *Détection Rapide* • *Données Temps-Réel* • *Prévision* • *Dissémination de messages*

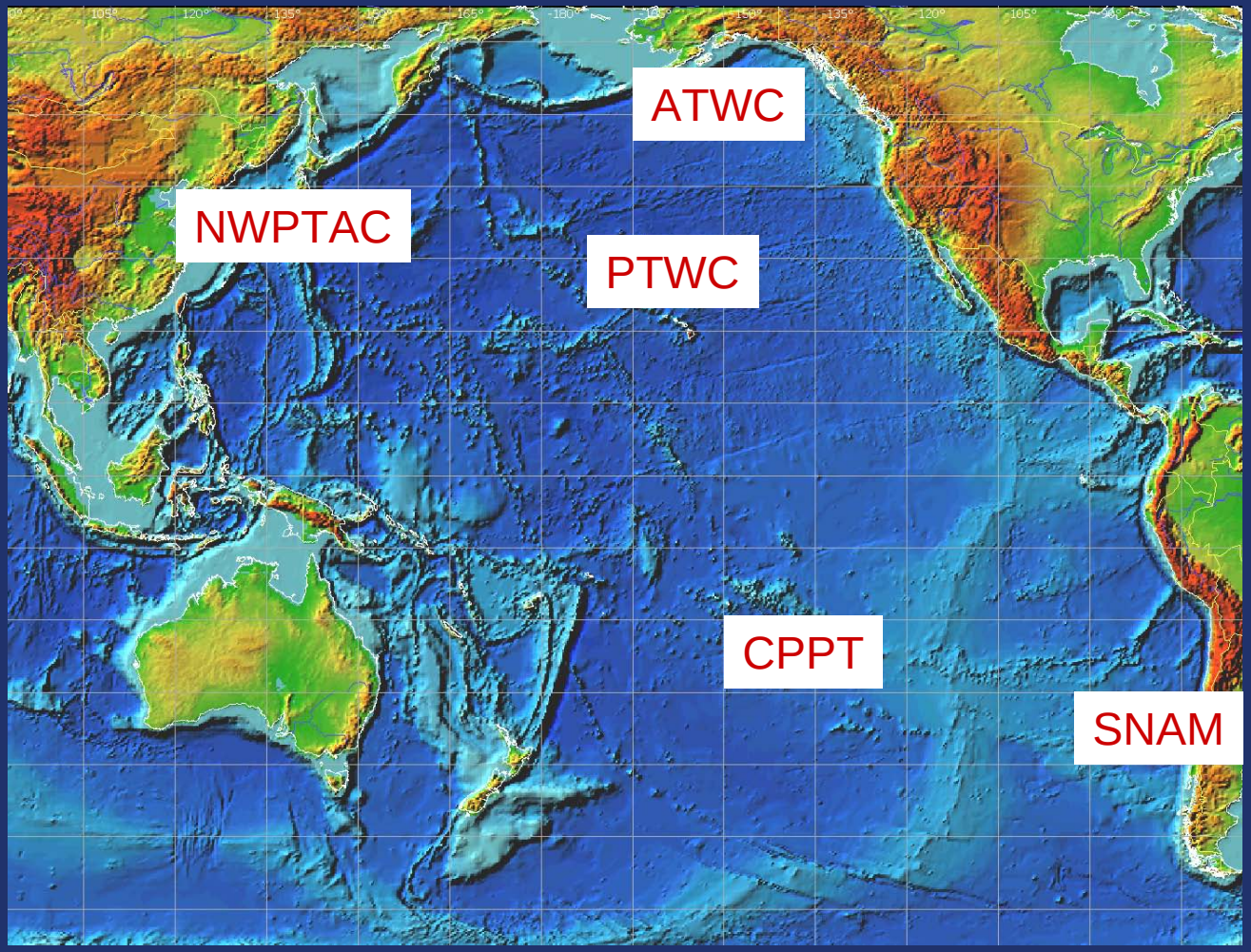
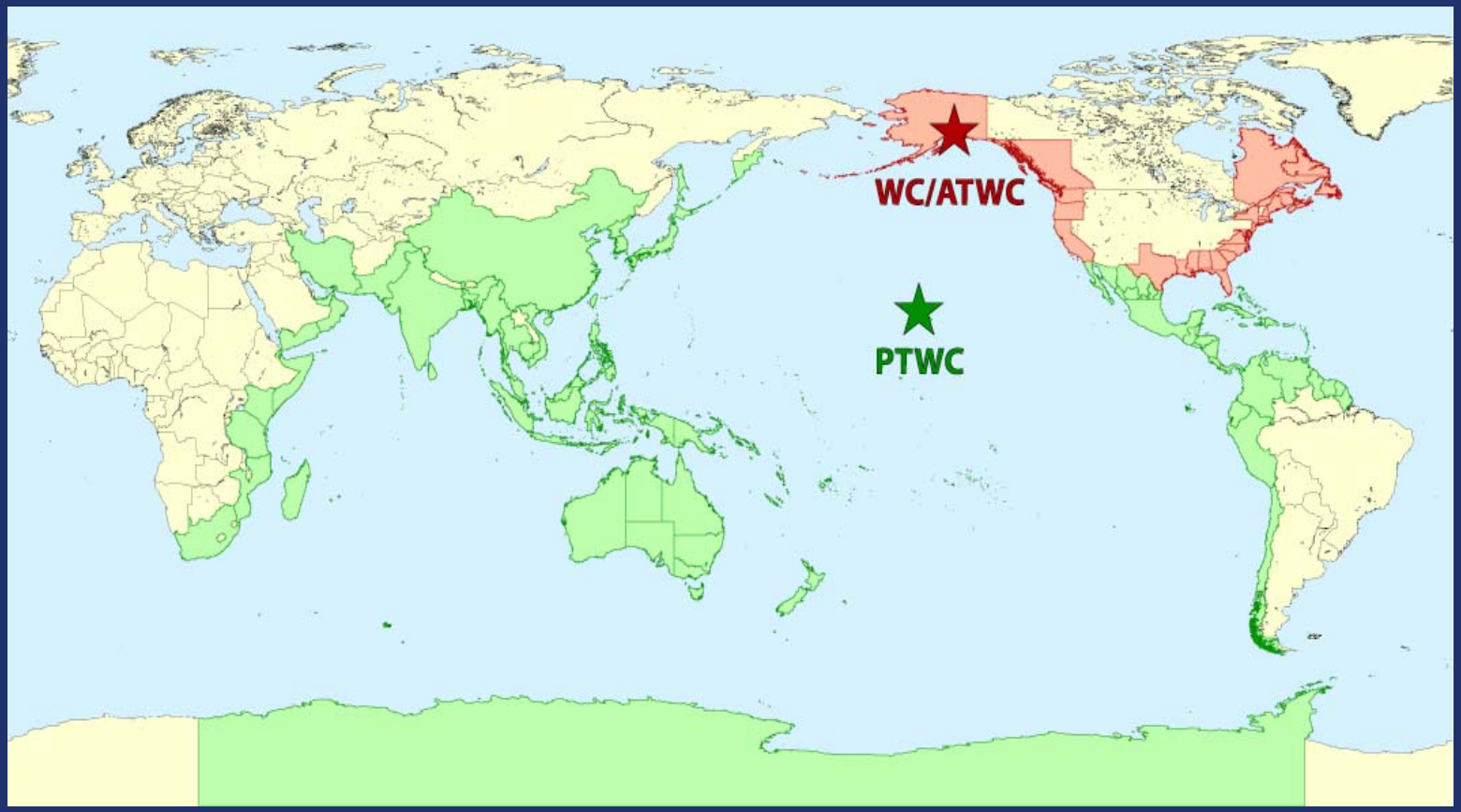






Rat Island, 17 Nov 2003

CENTRES d'ALERTE
Du SATP



Alerte PTWC – WC-ATWC