



Réduire le risque Sismique et Tsunami

L'apport de la simulation numérique

*René Crusem, Hélène Hébert, Philippe Heinrich,
Françoise le Piver, Christian Mariotti, Marc Nicolas*

A LAMBESC. — Ce qui reste d'une maison et de son mobilier. — *Phot. Boissonner et Detaille.*

Risques naturels: Séismes et Tsunamis



Les **séismes majeurs** et les **grands tsunamis** sont - à l'échelle des sociétés humaines - les phénomènes naturels **les plus coûteux** en vies -> intérêt de la **prévision** (?) et de la **prévention** de ces risques

Séismes (tectoniques):

- Le plus meurtrier: **Tangshan 1976**, **243 000** morts (*peut-être beaucoup plus*)
- Le plus coûteux: **Kobe 1995**, plus de **100 milliards de \$**

Tsunamis:

- Le plus meurtrier: **Sumatra 2004**, **226 000** morts



Izmit



*A l'échelle géologique, les **méga-volcans** et les **impacts** extraterrestres sont à l'origine des plus grands bouleversements (géographiques, climatiques, espèces vivantes)*

Plan de la présentation



- **Généralités** sur:
 - Les **séismes**
 - Les **tsunamis**
 - L'**alea** et le **risque**
- La **simulation numérique** des **effets des séismes**
- La **simulation numérique** des **tsunamis** et leurs effets
- Conclusion: les **enjeux** / les **défis**

Conséquences de quelques grands séismes



Date	Magnitude	Pays	Localisation	Victimes et dégâts
18 octobre 1356	6 à 7	Suisse	Bâle	1 000 à 2 000 victimes ; de nombreux châteaux détruits, répercussions en France
26 janvier 1531	?	Portugal	Lisbonne	30 000 mort ; tsunami au Maghreb et jusqu'en Europe du Nord
28 décembre 1808	7,5	Italie	Messine	86 000 morts
13 janvier 1915	7	Italie	Avezzano	32 000 morts
6 décembre 1920	8,5	Chine	Gansu	180 000 morts
1 septembre 1923	8,2	Japon	Tokyo	100 000 morts, 50 000 disparus ; incendie généralisé
23 mai 1927	8,3	Chine	Nanchang	80 000 morts
26 décembre 1932	7,6	Chine	Gansu	80 000 morts
31 mai 1935	7,5	Inde	Quetta	60 000 morts
9 septembre 1954	6,7	Algérie	Orléansville	15 000 morts ; nombreuses maisons détruites
29 février 1960	5,9	Maroc	Agadir	10 000 morts
31 mai 1970	7,8	Pérou	Chimbote	67 000 morts ; glissement de terrain
27 juin 1976	7,6	Chine	Tangshan	290 000 morts, plus de 780 000 blessés ; grands dégâts économiques
21 mai 1980	7,3	Algérie	El Asnam	10 000 morts
7 décembre 1988	6,8	Arménie	Spitak	Plus de 50 000 morts
21 juin 1990	6,6	Iran	Bam	43 000 morts et 30 000 blessés
17 janvier 1995	6,9	Japon	Kobé	6 300 morts
17 août 1999	7,4	Turquie	Izmit	17 000 morts et plus de 34 000 blessés
23 juin 2001	8,4	Pérou	À proximité des côtes	75 morts (dont 26 par un tsunami)
2 décembre 2003	6,3	Iran	Bam	26 000 morts ; ville détruite à 80 %
24 février 2004	6,4	Maroc	Al Hoceima	500 morts, 300 blessés



26 décembre 2004	9,0	Sumatra	232 000 morts, Tsunami
08 octobre 2005	7,6	Pakistan	79 410 morts
12 mai 2008	7,9	Sichuan, Chine	87 149 morts

Conséquences de quelques grands tsunamis



Victimes	Année	Lieu			
230000	2004	N. SUMATRA	3620	1899	BANDA SEA, INDONESIA
40000	1782	S. CHINA SEA	3000	1692	JAMAICA
36500	1883	S. JAVA SEA	3000	1854	NANKAIDO, JAPAN
30000	1707	TOKAIDO-NANKAIDO, JAPAN	3000	1933	SANRIKU, JAPAN*
26360	1896	SANRIKU, JAPAN	2243	1674	BANDA SEA, INDONESIA
25674	1868	N. CHILE	2182	1998	PAPUA NEW GUINEA
15030	1792	SW. KYUSHU ISLAND, JAPAN	2144	1923	TOKAIDO, JAPAN
13486	1771	RYUKYU TRENCH	2000	1570	CHILE
8000	1976	MORO GULF, PHILIPPINES	1997	1946	NANKAIDO, JAPAN
5233	1703	TOKAIDO-KASHIMA, JAPAN	1700	1766	SANRIKU, JAPAN
5000	1605	NANKAIDO, JAPAN	600	2005	N. SUMATRA
5000	1611	SANRIKU, JAPAN	119	1964	ALASKA, USA
3800	1746	LIMA, PERU			

Et aussi:

21 juillet 365:

séisme et raz-de-marée dans toute la Méditerranée orientale
(destructions à **Alexandrie**)



~XV^{ème} siècle avant JC:

éruption du **Santorin**, tsunami de 60 mètres en Crète
(disparition de la civilisation Minoenne)



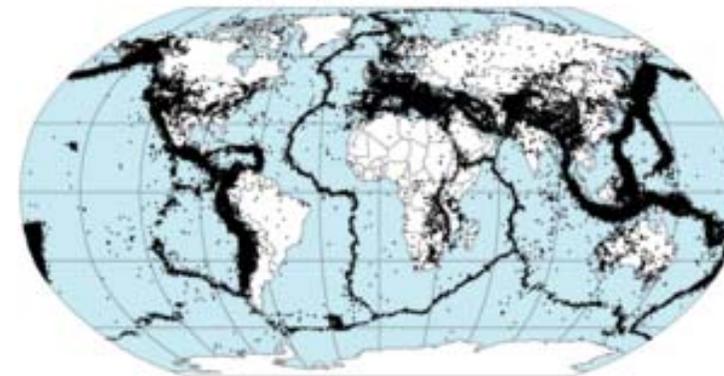
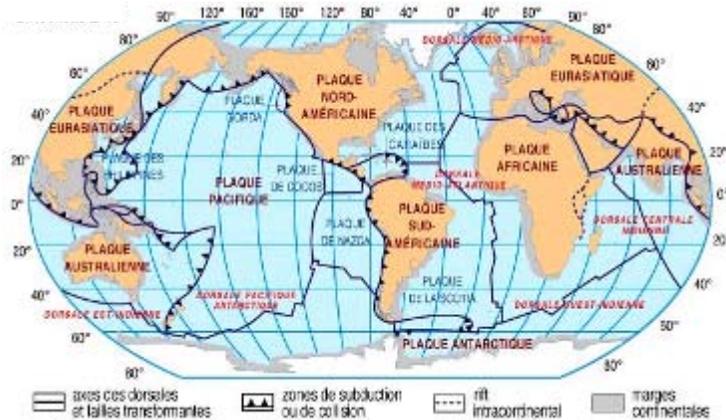


Les séismes « tectoniques »

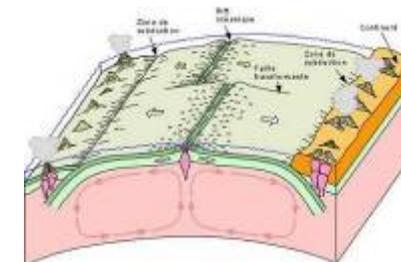
San Francisco, 1906



Où se produisent les séismes (1/2) ?

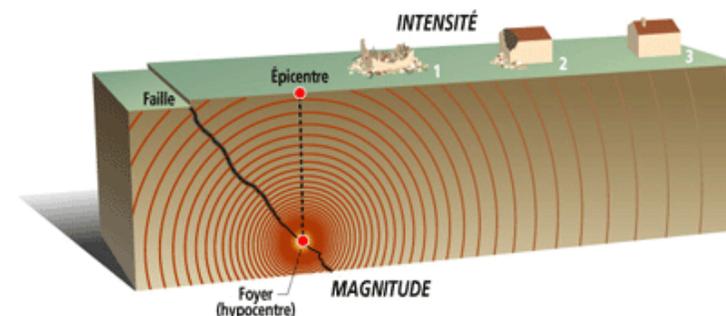


Les séismes majeurs se produisent à la rencontre des plaques tectoniques



La fréquence des séismes dans le monde

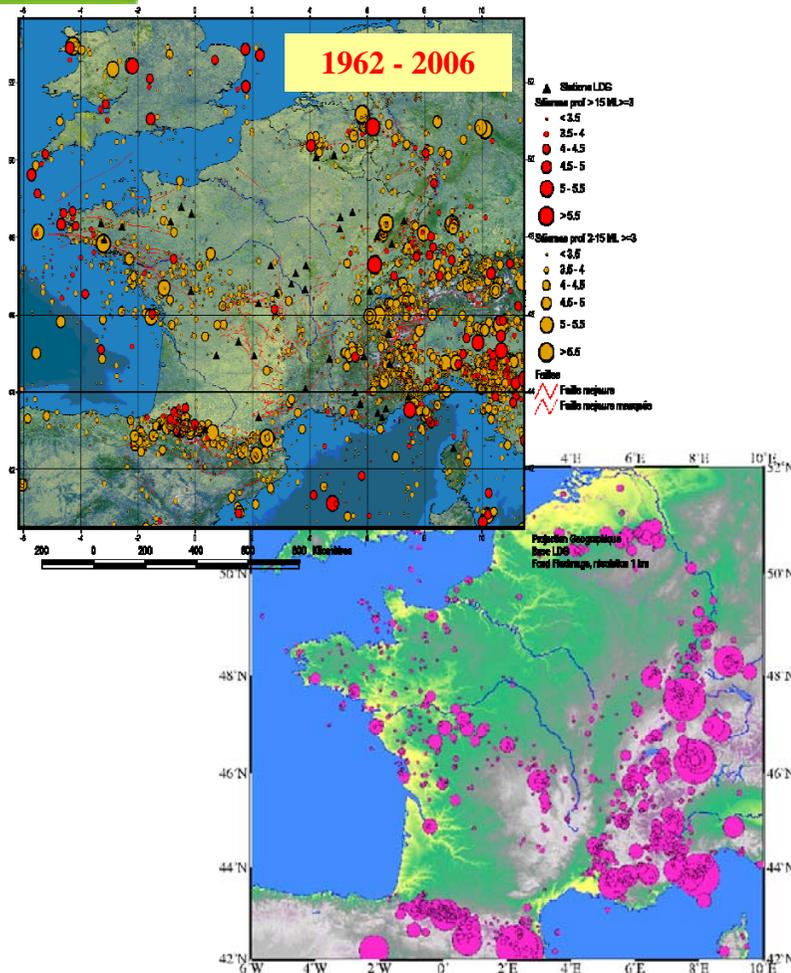
Magnitude Ms	Nombre moyen annuel au-dessus de la magnitude Ms
8	1 à 2
7	20
6	100
5	1 500
4	7 500
3	plus de 100 000



Où se produisent les séismes (2/2) ?



Mais des séismes « modérés », intra-plaque, peuvent se révéler dévastateurs sous une ville très peuplée, au bâti ancien



Tremblement de terre de Nice, 23



Lambesc, 11 juin 1909
46 morts

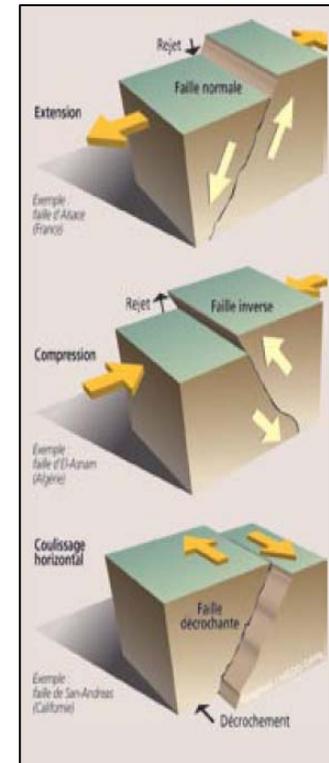
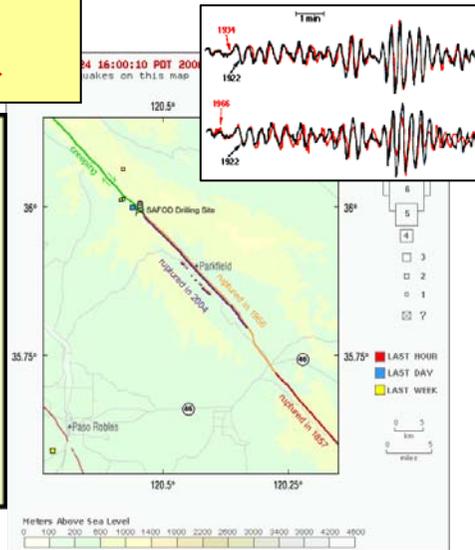
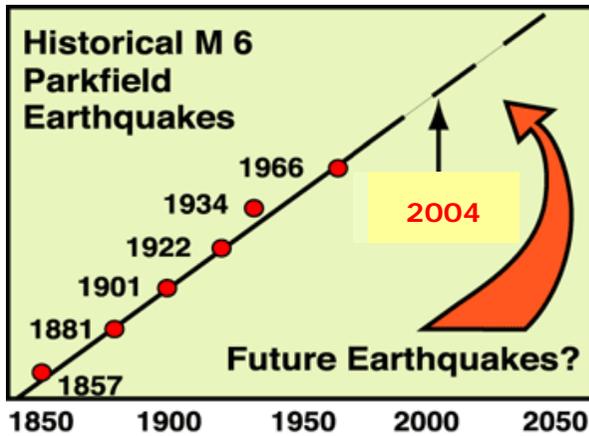


L'Aquila, Italie, avril 2009

Comment se produisent les séismes ?

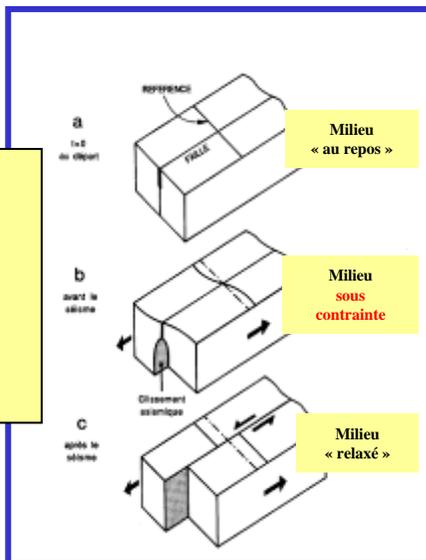


Observation de « cycles sismiques »



Modèle du « rebond »

chargement continu
 ↓
 rupture rapide

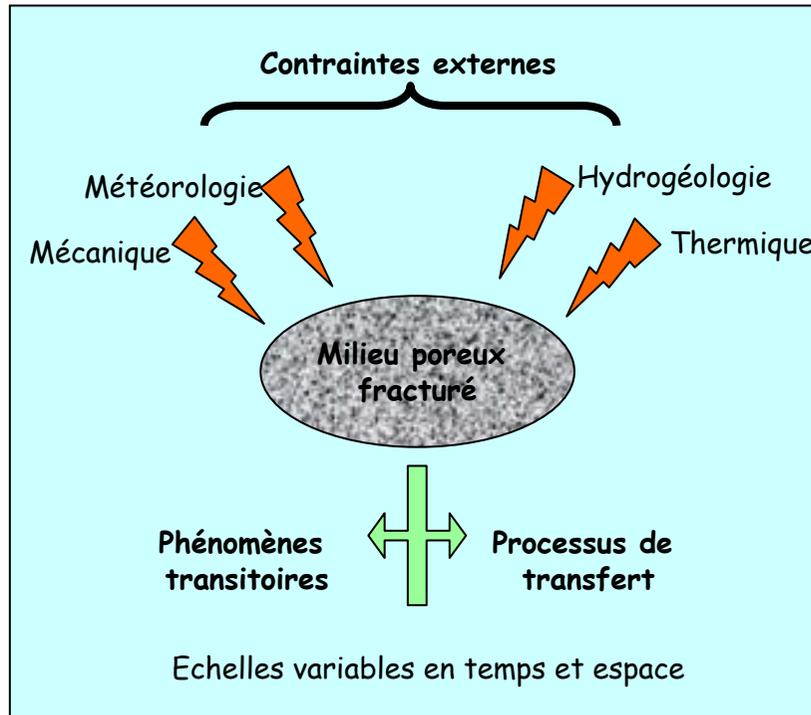


L'idée d'une **récurrence** des séismes est à la base des études d'aléa sismique actuelles

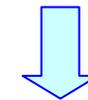
C'est l'**observation** qui permet de préciser les périodes de récurrence, et les magnitudes associées, **spécifiques à chaque « faille »**

Peut-on prévoir les séismes ?

Prévoir: fournir, avec un préavis suffisant, la localisation, l'heure et la magnitude d'un séisme à venir



En réalité, un séisme résulte d'un ensemble d'interactions extrêmement complexes et d'une histoire, dans un milieu dont on ne connaît pas l'état initial



Une version « forte » (prévision déterministe) est hors d'atteinte aujourd'hui

Version « faible »: Existe t'il des « signes précurseurs » observables ?

Existe t'il des phénomènes précurseurs ?



• La « méthode chinoise »

- Base sur l'information **de et par la population** :
 - Rapporter et centraliser la mise en évidence de phénomènes anormaux (**comportements des animaux, puits, rivières, déformation, éboulements...**)
- 1 succès :
 - province de Liaoning : 1974 magnitude 7.4
 - quelques milliers de victimes (population = 3 millions d'habitants)
- **1 échec** :
 - Tang-Shan : 1976 magnitude ~ 8,1
 - > 250 000 (**750 000 ?**) victimes

• Variation de vitesse des ondes sismiques

- Les vitesses de propagation des ondes sismiques **changent** (faiblement et localement) avant un séisme
 - Mise en œuvre opérationnelle difficile
 - Effet non systématique

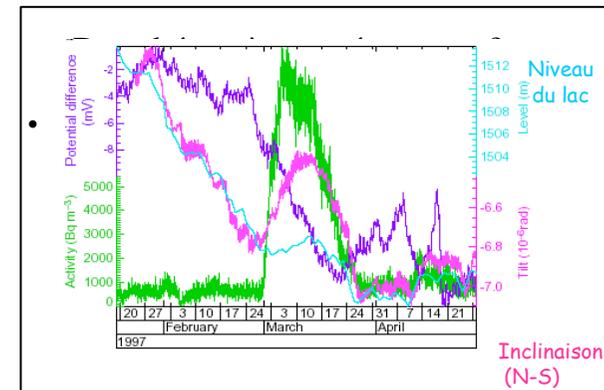
• Radon

- Des bouffées de radon sont détectées avant le séisme
 - Effet non systématique
 - Existence de nombreuses sources de signaux similaires

• La méthode VAN

- Les signaux électriques (SES) sont détectés avant le séisme
 - Mise en œuvre opérationnelle difficile
 - Effet non systématique
 - Existence d'autres sources de tels signaux

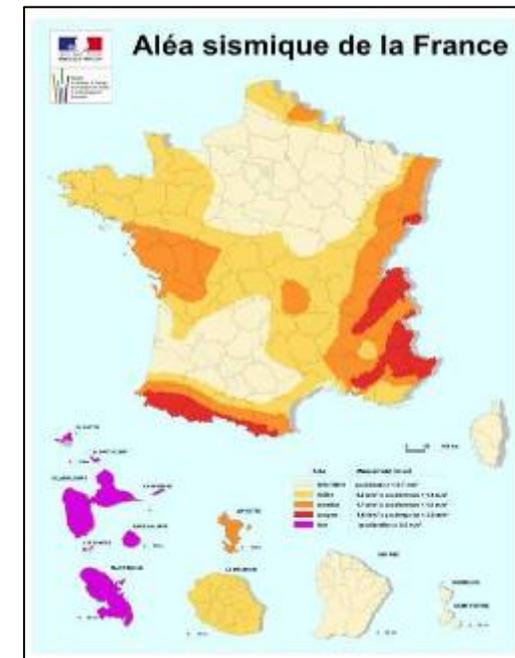
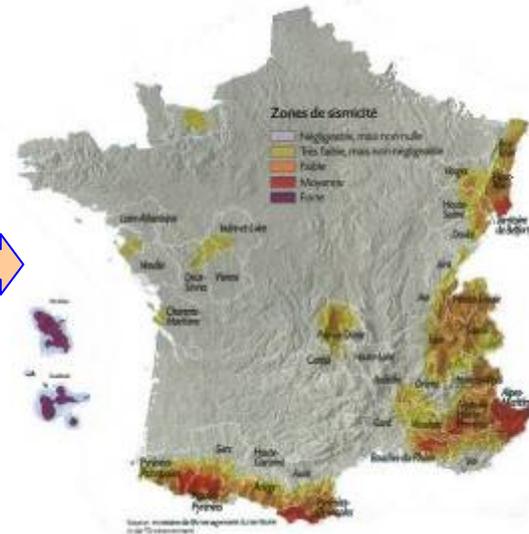
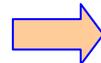
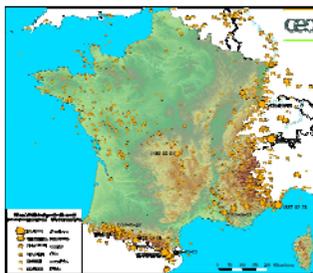
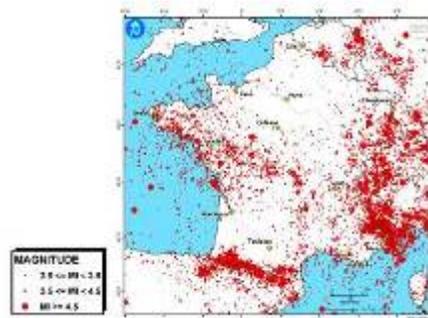
Rien de systématique et d'utilisable opérationnellement



Alors que peut-on faire ?



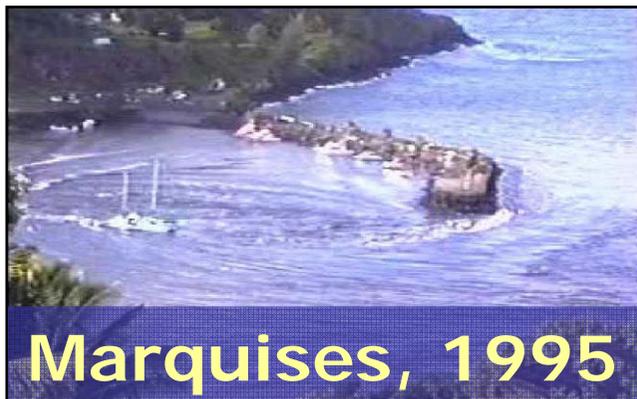
- Malgré l'observation occasionnelle de signes précurseurs (niveaux de lacs et de puits, émissions de radon, émissions électromagnétiques, ...) **on ne sait pas prévoir la localisation, la date, et la magnitude d'occurrence des séismes**
- A condition de disposer d'archives instrumentales ou historiques, on sait définir une **période de récurrence** d'un séisme de magnitude donnée, dans une région donnée, qui va servir à estimer un **aléa**



Révisions périodiques, suite à l'avancée des connaissances



Les Tsunamis



Comment se produisent les Tsunamis ? (1/2)

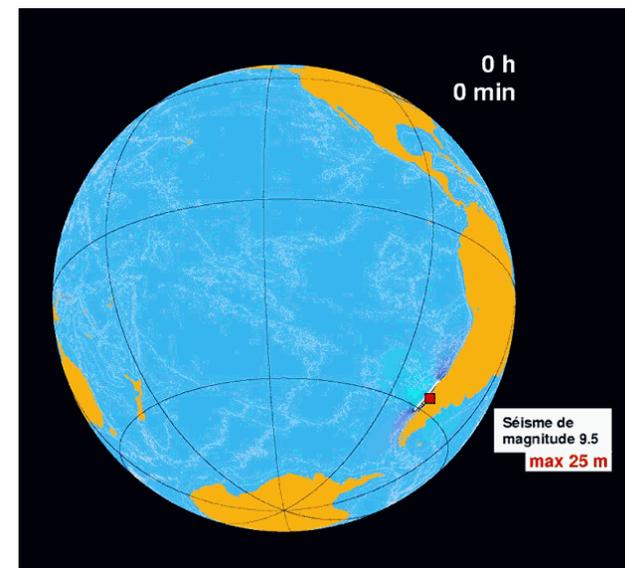
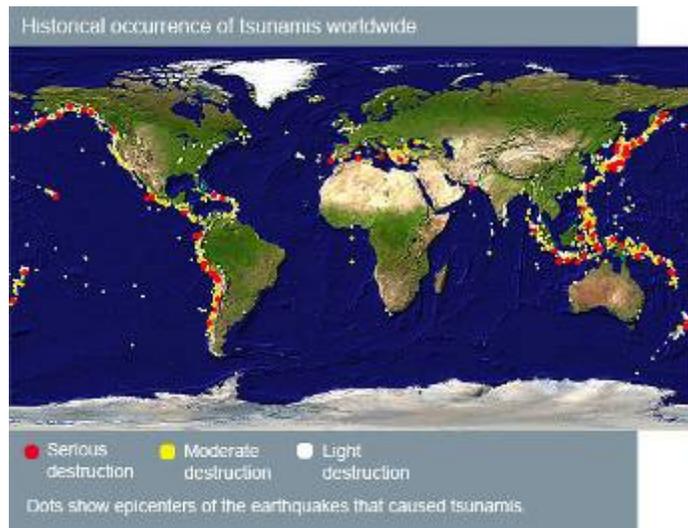
« *Tsunami: onde provoquée par mouvement rapide d'un grand volume d'eau* »



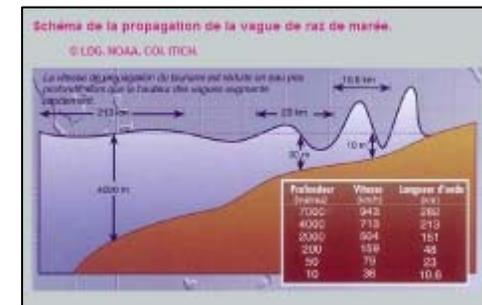
Les Tsunami sont causés, par ordre de fréquence décroissante, par:

- Les forts séismes sous l'eau, ou proches d'une côte
- Les éboulements sous marins (aéroport de Nice, ...)
- Les volcans (Krakatoa, Santorin, ...)
- Les impacts extraterrestres

Les plus grands séismes (Chili 1960, Sumatra 2004,...) génèrent des tsunamis **transocéaniques**



Comment se produisent les Tsunamis ? (2/2)



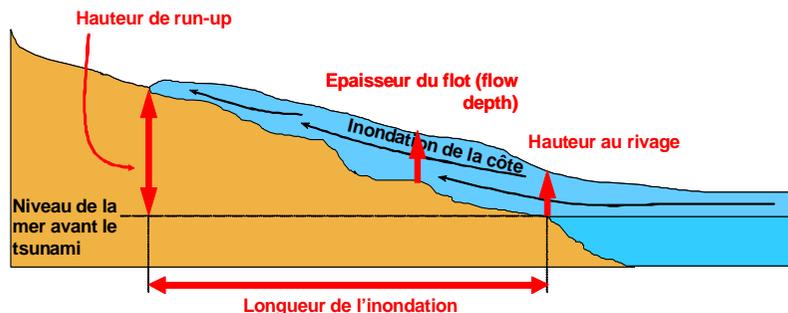
Vitesse de propagation $c = (gh)^{1/2}$

Vers le large (océan profond)

- atténuation et étalement des vagues : amplitudes 10-50 cm

Vers la côte

- **amplification** dès que h (profondeur d'eau) décroît significativement



Tsunami dû à un séisme

Dimension source ~ **100 à 800 km**

Périodes **15 à 40 minutes**

Amplitudes initiales : **quelques mètres**

Se propagent loin avec encore de l'énergie

→ dégâts possibles à distance

Tsunami dû à un éboulement

Dimension source ~ **5-30 km**

Périodes **5 à 20 minutes**

Amplitudes initiales : **> 10-20 m possible**

L'énergie se propage moins bien à distance

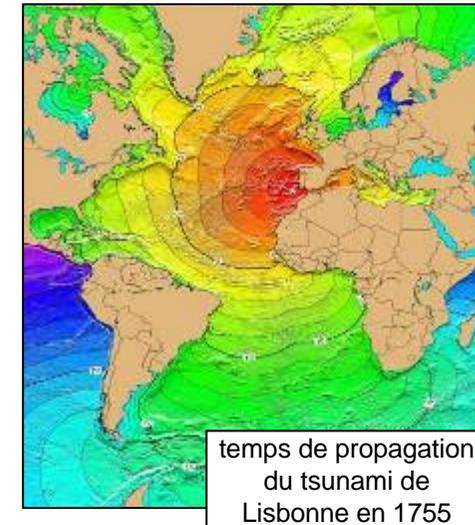
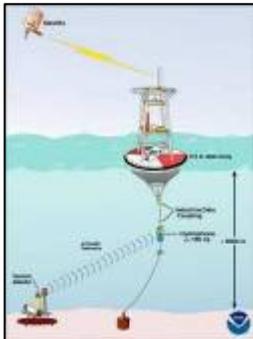
→ dégâts très importants mais localement

Une alerte aux Tsunamis est-elle possible?



Même si l'**occurrence** d'un tsunami n'est (donc) **pas prévisible**, une **alerte aux tsunamis** est possible *si les sources sont suffisamment éloignées des zones à alerter*, du fait de la **différence des vitesses des ondes** sismiques (6-10 km/s) et des ondes hydrauliques (< 0,2 km/s)

Distance	Exemple	Temps de « préavis »
100 km	Lisbonne (1755), Banda Aceh (2004)	< 10 min
500 km	Maroc -> Baléares	< 1 h
5000 km	Japon -> Polynésie	~ 8 h



temps de propagation du tsunami de Lisbonne en 1755

Un **système d'alerte** repose sur:

- une détection précoce du **séisme** (10-15 min)
- des mesures du **niveau de la mer** (> 10-15 min)
- l'intégration croissante de **modèles numériques** afin de prévoir les heures d'arrivée et hauteurs de submersion sur les côtes



Ces systèmes existent pour le Pacifique et l'Indonésie

Un système est en construction pour la **Méditerranée et l'Atlantique Nord-est**

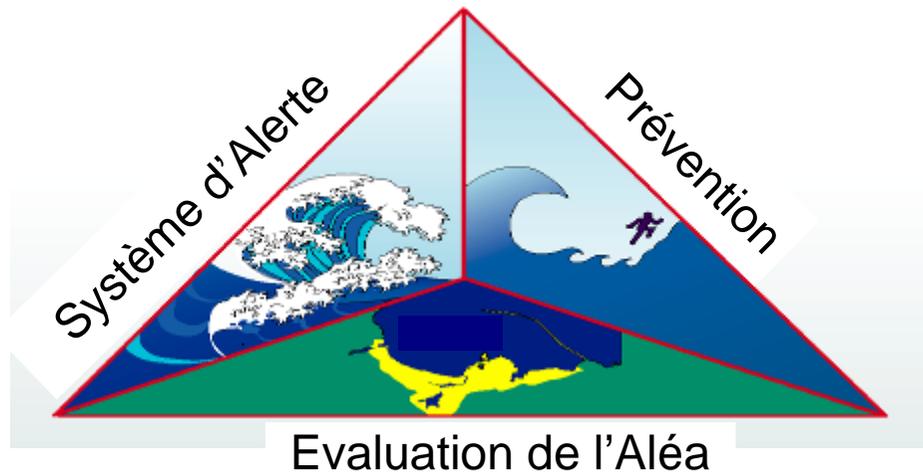


En résumé



- On **ne sait pas prévoir les séismes**, ni les **tsunamis**
- On a quelques idées sur les « **scénarios** » **possibles**, grâce aux enregistrements instrumentaux ou à l'étude historique
- En termes de prévention: la **simulation numérique** va aider à estimer les aléas puis les risques, sur la base de ces scénarios
- Dans le domaine des **Tsunamis**, une **alerte** est dans certains cas possible. La **simulation numérique** est une composante des systèmes d'alerte existants ou en construction.

Aléa et Risque

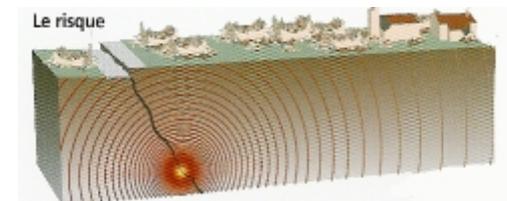
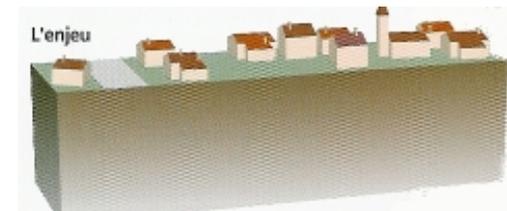
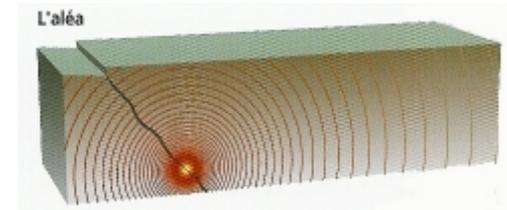


Aléa et risque



- L'**aléa** est la manifestation d'un phénomène naturel d'occurrence et d'intensité données
- L'**enjeu** est l'ensemble des **personnes** et des **biens** susceptibles d'être affectés par un phénomène naturel

les enjeux sont de plus en plus nombreux dans les sociétés modernes: concentrations urbaines, infrastructures critiques ou dangereuses, ...
- Le **risque** est la **conséquence** d'un aléa d'origine naturelle ou humaine dont les effets se traduisent en termes de **préjudices humains, matériels, économiques** ou **environnementaux** – immédiats ou différés



La première étape, incontournable, est donc l'estimation de l'**aléa**



Banda Aceh



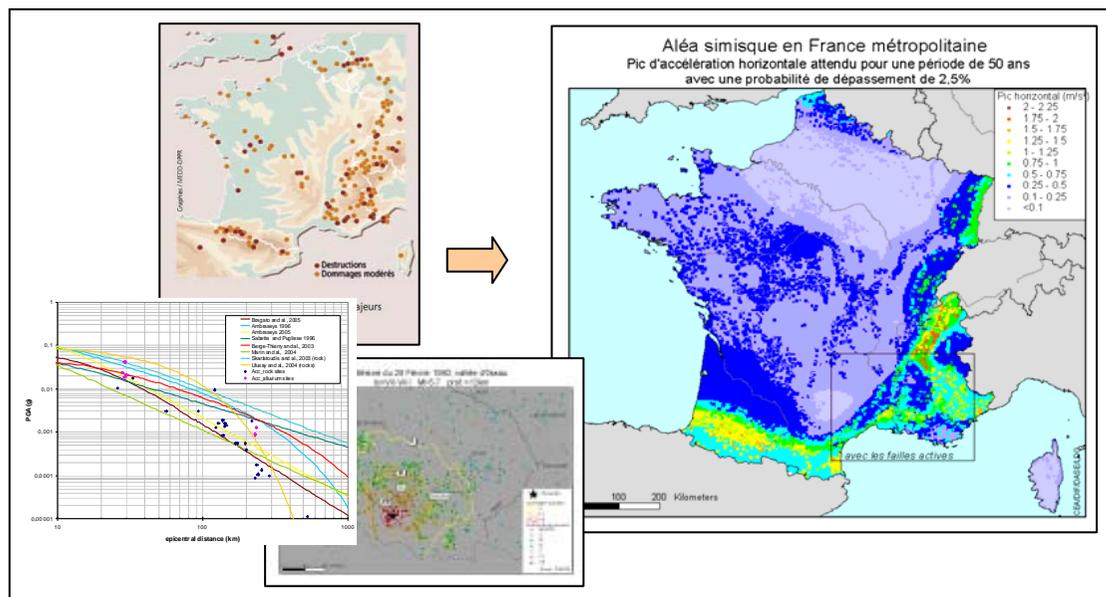
El Asnam

Source: <http://ww.ac-nice.fr/>

L'appréciation de l'aléa (sismique)



- Elle consiste à construire des **cartes d'aléa** à partir de
 - **lois de récurrence** des séismes, déduites des cartes de sismicité observée ou historiques récentes
-> **séisme de référence**
 - **lois d'atténuation** déduites des observations d'**intensités** (ou **simulées**)



- L'appréciation de l'aléa (sismique) présente des **difficultés**:
 - Même complétée par l'étude des traces anciennes des séismes passés (Sismicité historique, Paléosismicité), il subsiste des possibilités d'**incomplétude et de biais** dans les catalogues
 - Pour un séisme donné, les **effets** (mouvements de sol, ...) à une même distance peuvent être **extrêmement variables d'un endroit à l'autre**

La variabilité de l'aléa sismique (1/2)

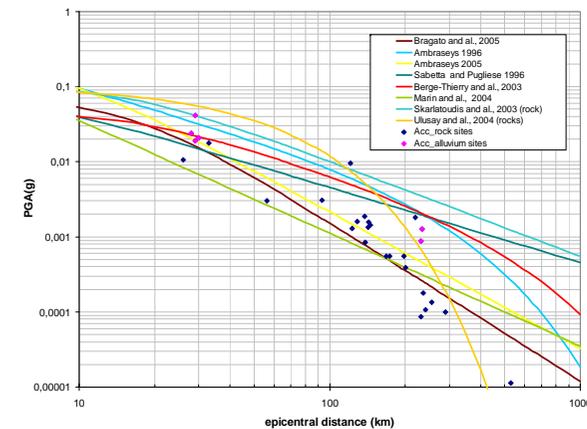
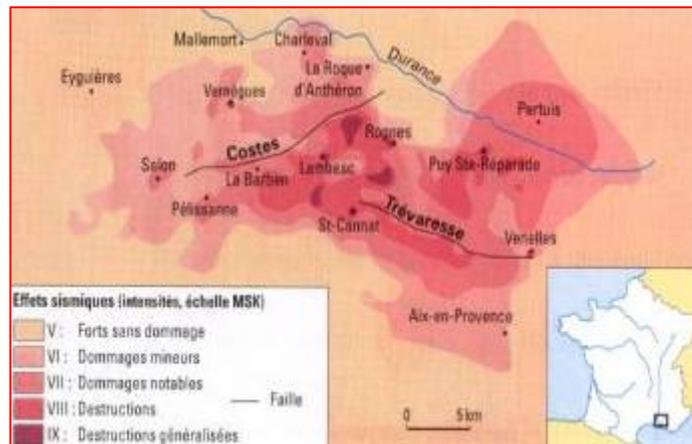
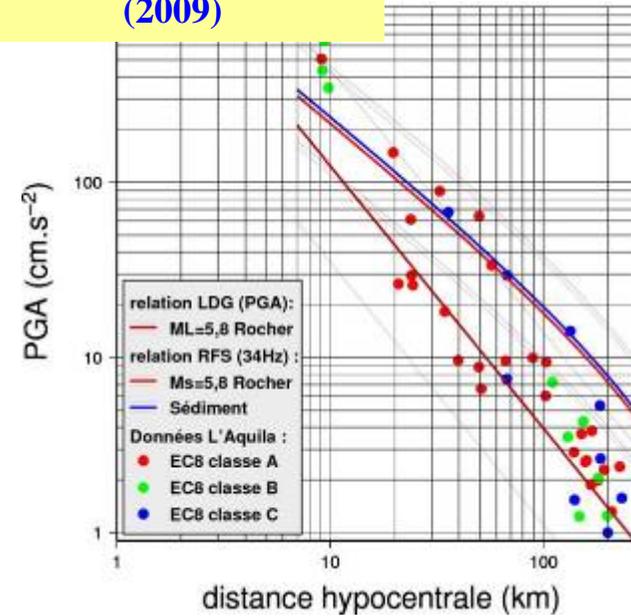


Séisme de Lambesc (1909)



Destructions sur un sommet

Séisme de l'Aquila (2009)

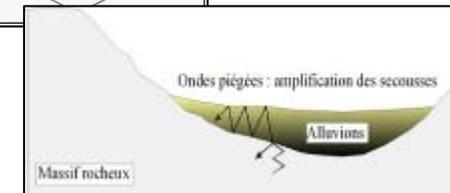
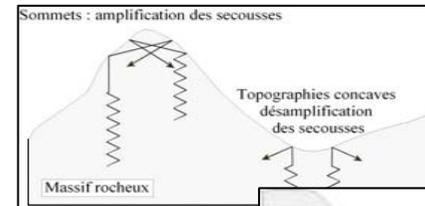
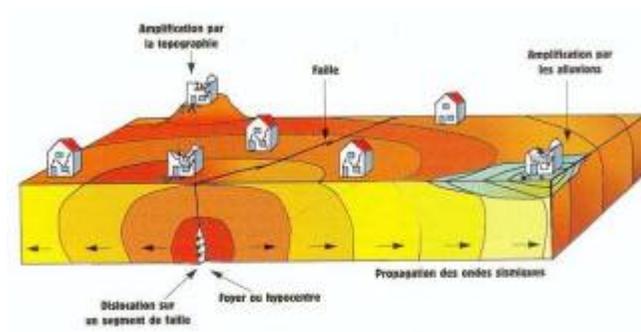


La variabilité de l'aléa sismique (2/2)

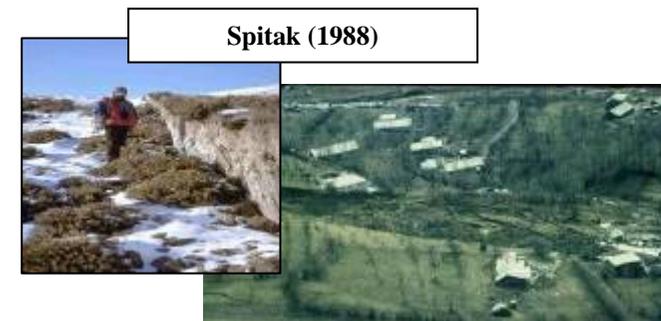
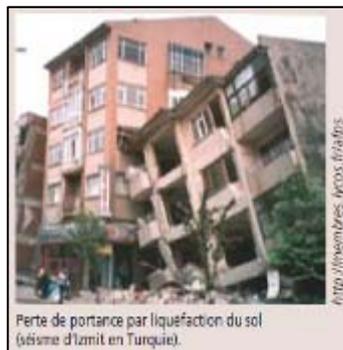


Les **raisons** en sont diverses:

- la **variabilité des milieux** géologiques de propagation
- des **effets géométriques 3D** dits effets de site: relief, bassin sédimentaire, ...



- Les **comportements non linéaires** des sols: liquéfaction, éboulements, glissements de terrain, ...

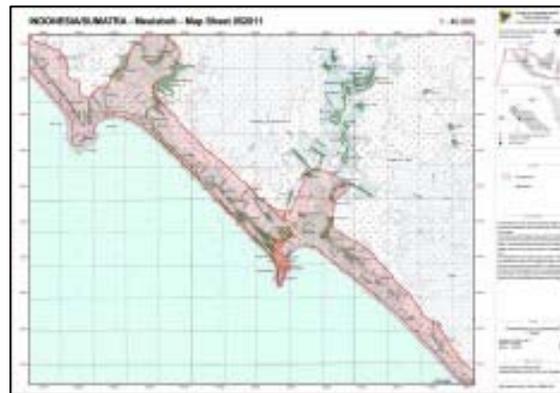


La variabilité de l'aléa tsunami



L'**effet d'un tsunami** (hauteur d'eau à proximité ou sur la terre) en un point donné d'une côte dépend :

- des **non linéarités** de la propagation des ondes hydrauliques: atténuation, déferlement, ...
- de la bathymétrie locale 3D, à l'origine de **focalisations** et de **résonances**
- de la **topographie**, la **rugosité** du sol, l'occupation du sol (infrastructures) - qui a des effets directs sur les hauteurs de submersion qui seront atteintes



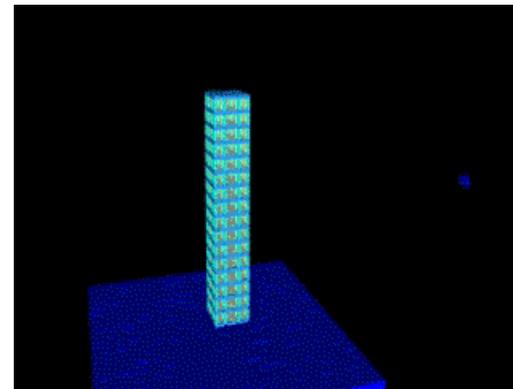
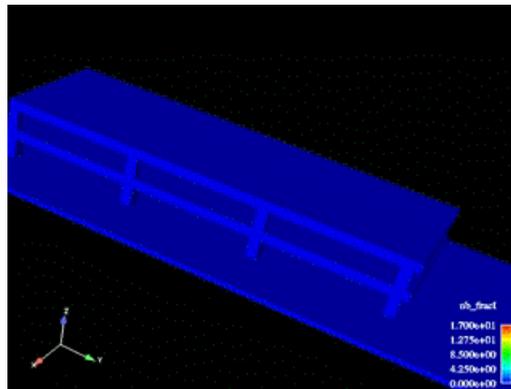
Quel apport potentiel de la simulation numérique ?



- Dans le domaine de l'**aléa**:
 - **Prévoir** (ou plutôt: *modéliser via un scénario*) **les sources** (lieux d'occurrence, intensités, ...), notamment lorsque les données instrumentales et historiques sont insuffisantes
 - **Comprendre et prévoir** la **variabilité des effets**, en l'absence de données expérimentales antérieures
- Dans le domaine du **risque**:
 - Dans le cas des tsunamis: contribuer à l'émission d'une **alerte**
 - **Comprendre et prévoir le comportement des structures** et infrastructures soumises à l'aléa, dans une optique de **prévention**



La simulation numérique des effets des séismes



Simulation numérique des effets des séismes



- Pour les zones dépourvues de mesures instrumentales, la **simulation numérique** est le *seul moyen* d'évaluer le risque pour un scénario donné
- Une particularité: la **grande variation des échelles** couvertes
 - **Dimensions:**
 - **Faille:** quelques km à plusieurs centaines de km – avec des hétérogénéités du milieu géologique à l'échelle de la dizaine de mètres
 - **Structures, bâtiments:** < quelques mètres
 - **Propagation des ondes:** quelques km à plusieurs centaines de km, avec des hétérogénéités géologiques à l'échelle de quelques dizaines de mètres
 - **Temps:** quelques fractions de secondes (périodicité des fortes accélérations) à quelques centaines de secondes (durée de la rupture d'une faille)

Les limitations de mémoire et de temps calcul obligent encore aujourd'hui à utiliser des méthodes numériques **spécifiques** aux différentes gammes d'échelles et de comportements physiques

Ce qu'il faut simuler / Les méthodes numériques

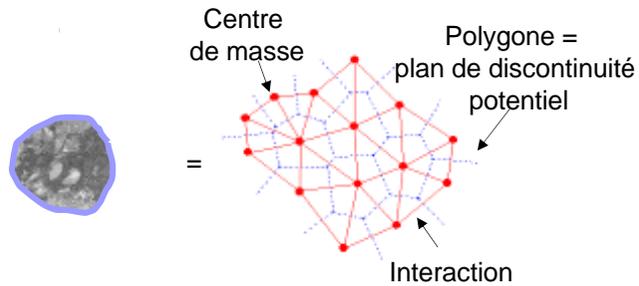


- **Génération** des ondes par un séisme / comportement de la faille:
objet de recherche universitaire, généralement non traitée complètement, ou via un modèle cinématique approché
- **Propagation 2D ou 3D** des ondes sismiques: effets 3D; interaction avec les reliefs, les vallées; atténuations; ...
Méthodes numériques *linéaires* ou *non linéaires*, *continues* ou *discrètes*:
méthodes asymptotiques; différences ou éléments finis; méthodes spectrales (IPGP, LGIT); éléments discrets (CEA, Université de Grenoble); Galerkin discontinus (INRIA, ENPC); ...
- **Effets rhéologiques locaux** non linéaires (liquéfaction, ...) et **interactions avec les structures** et les bâtiments:
éléments finis (ECP); éléments discrets, ...
- **Effets « discontinus »** sur le **milieu naturel** (éboulements, ruptures en surface):
généralement non traités; potentiel des éléments discrets ?
- Les **conséquences** sur les **structures, les infrastructures, ...**
codes de calcul « ingénieurs »

Un code « Eléments discrets » : Mka3D (1/2)

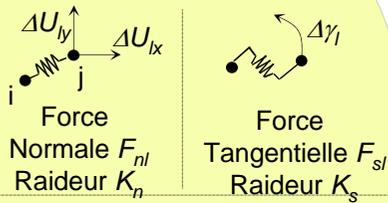


Principe général



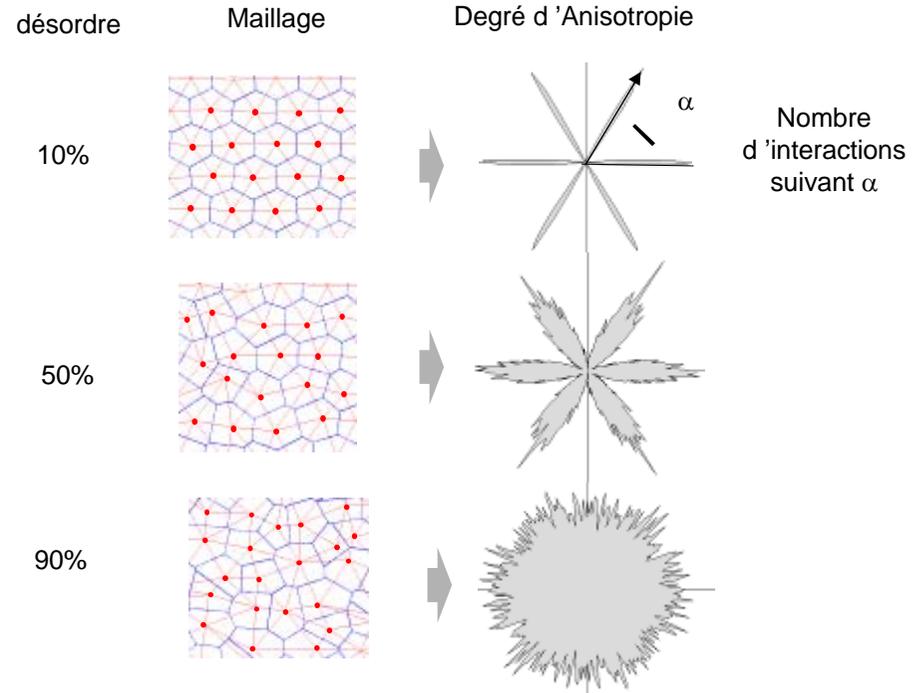
Milieu initial élastique modélisé par une loi de type cohésif.

Interaction attracto-répulsives



Sur chaque nœud $\vec{F}^{(t)} = m \vec{\gamma}^{(t)}$
Discrétisée en temps

Isotropie de la discrétisation spatiale



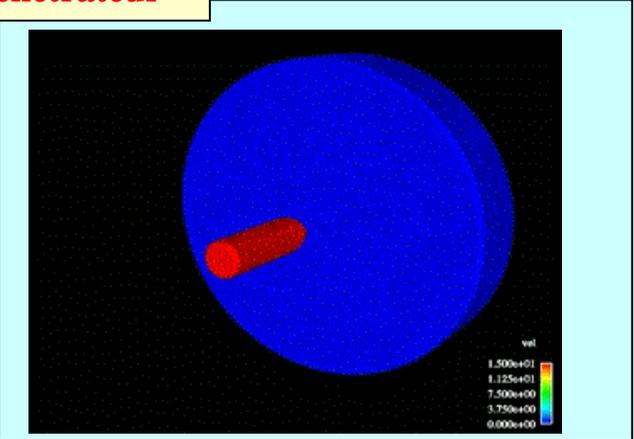
Description *géométrique locale* du milieu

Introduction « aisée » de modèles de *plasticité*, de *compaction*, d'*endommagement*

Un code « Eléments discrets » : Mka3D (2/2)



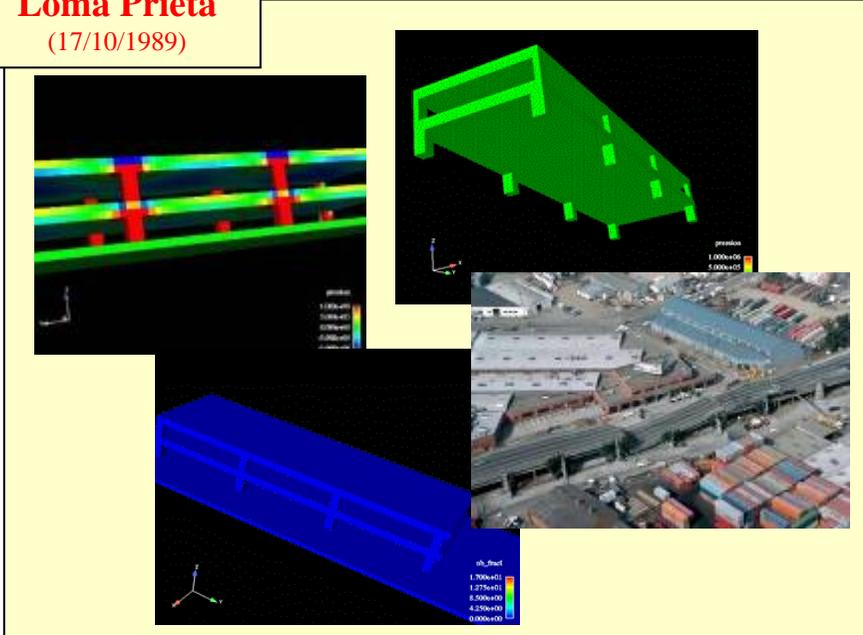
Pénétrateur



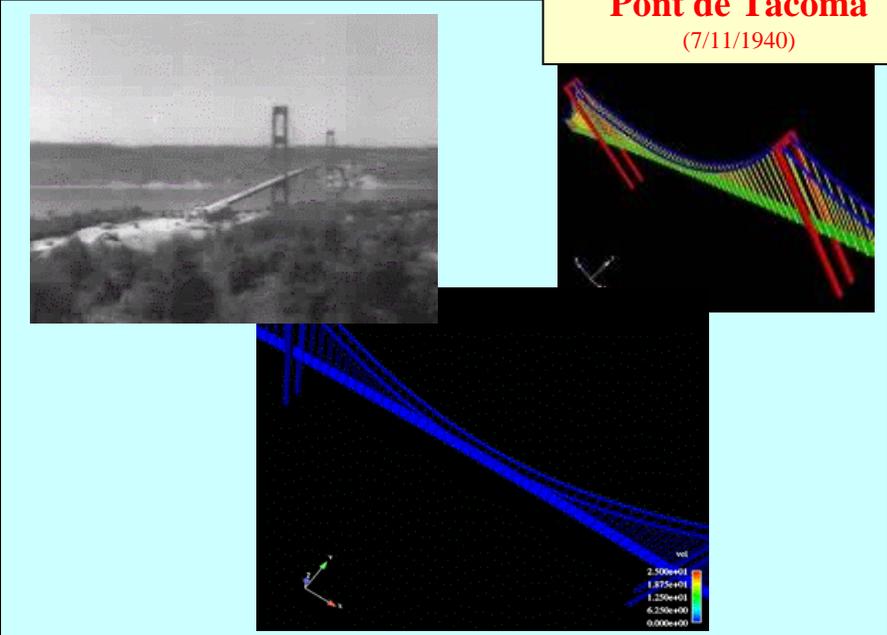
Pont du Gard



Loma Prieta
(17/10/1989)

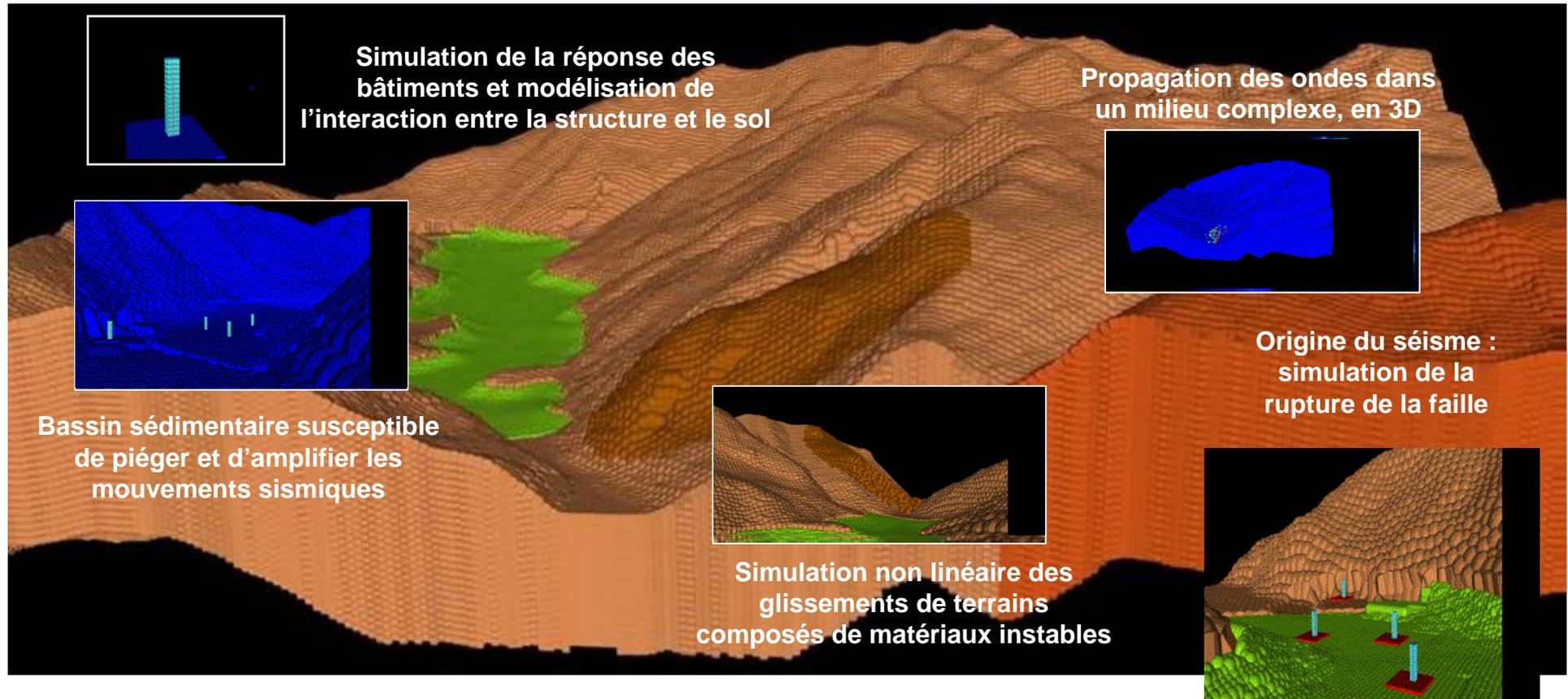


Pont de Tacoma
(7/11/1940)



Mka3D: Exemple « De la faille à la Structure »

(Grand Challenge 2007 sur TERA)



Effets d'un séisme de magnitude 5,5 sur une zone de 11x11 km² sur 2 km d'épaisseur (10 Hz)

Un calcul typique: plusieurs millions d'éléments (10 points/longueur d'onde)
500 processeurs pendant 40 heures
(et 16 processeurs pendant 500 heures pour réaliser le film 3D)

Résumé: simulation numérique des effets des séismes



- La **simulation numérique est incontournable** pour améliorer la **prévention** des effets des séismes, caractériser les **effets attendus**, cartographier les zones à risque, ...
- Dans le domaine de la simulation numérique, les **progrès à réaliser** portent notamment sur:
 - Une meilleure prise en compte des effets topographiques et des milieux, via des **grilles plus fines**
 - Une meilleure prise en compte des **comportements « fortement » non linéaires** des sols (éboulements, ruptures, liquéfaction, ...)
 - La prise en compte des **interactions** avec les infrastructures, à « toutes » échelles

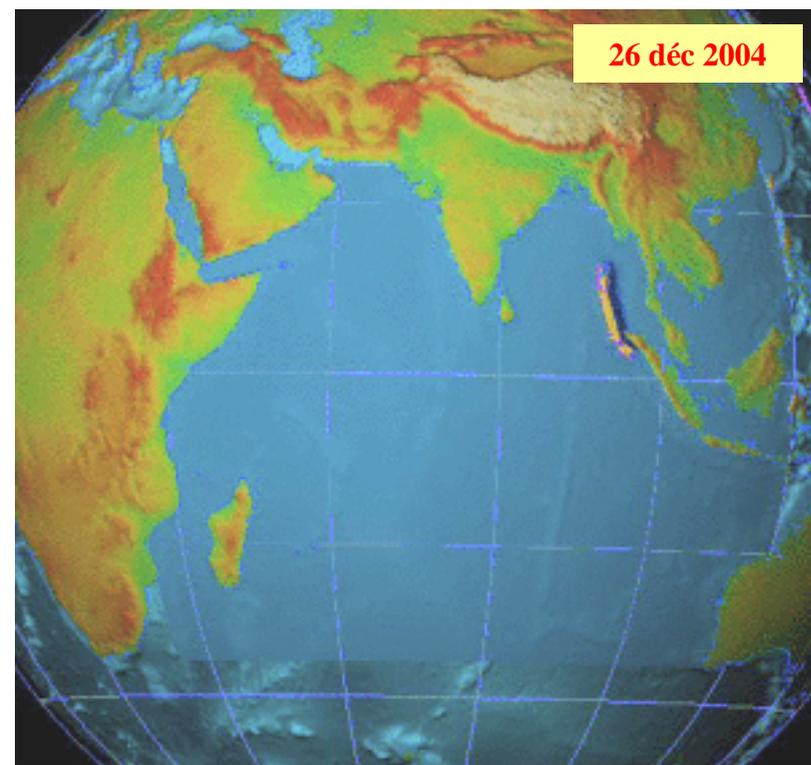
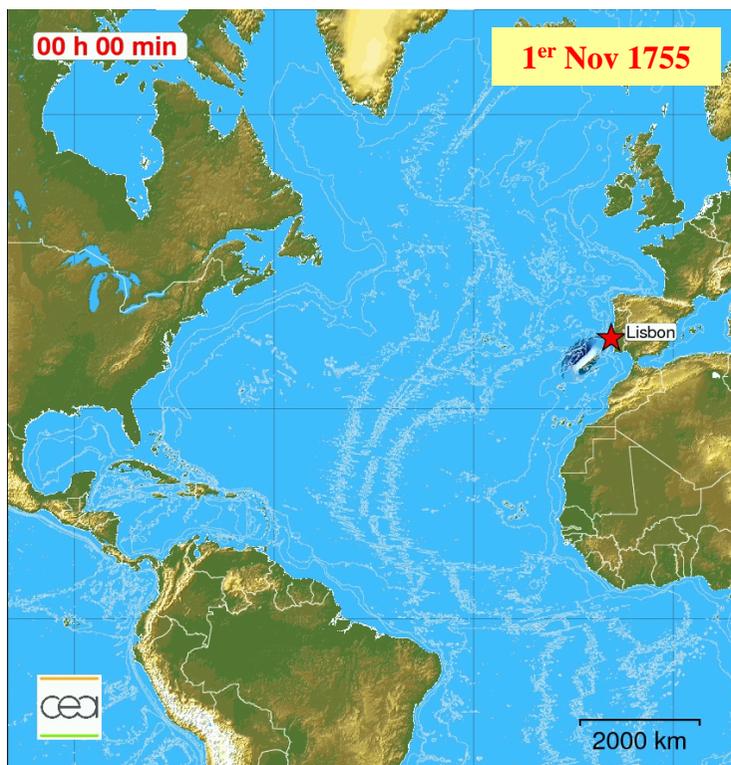
Cela passe notamment par le **couplage de codes** utilisant des méthodes différentes, adaptées à chaque domaine

éléments finis (ou **éléments spectraux**) dans le domaine sismique; code eulérien pour la dynamique rapide; code d'**éléments discrets** pour les effets locaux et les discontinuités; ...

=> Vers un code unique *multi-méthodes multi-physique*
« de la faille à la structure » ?



La simulation numérique des Tsunamis et de leurs effets



Simulation numérique des tsunamis



Le **besoin de simulation numérique** répond à deux types d'objectifs:

- L'estimation des effets pour un événement hypothétique, afin de déterminer **l'exposition d'une côte** donnée pour **un scénario donné**
 - Pour étudier les processus des tsunamis
 - Pour compléter les **bases de données** historiques
 - Pour estimer les **effets des tsunamis** en détail, à la côte
- La prévision des **temps d'arrivée** et des **hauteurs de submersions** pour un événement réel, dans un objectif d'**alerte** aux populations

Dans le premier cas, la fiabilité et la précision de la prévision sont déterminantes

Dans le second cas, la rapidité de calcul est déterminante; un palliatif possible est l'interpolation à partir de bases de données pré calculées, supposées représentatives

Ce qu'il faut simuler



- La **génération** du tsunami, par un séisme ou un éboulement
aspects cinématiques et géométriques (directivité, ...)
- La **propagation des « vagues »** et l'**inondation** dans les cas « simples »
effets 3D, atténuation, ...
- Le **déferlement sur les côtes** : *friction, turbulence, ...*
généralement non traité; objet de recherches universitaires
- L'**inondation** dans les cas « complexes », la prise en compte du bâti, l'**interaction** avec les infrastructures (bâtiments, ...)
généralement non traitée; objet de recherches universitaires
- Les **conséquences** sur les **structures, les infrastructures, ...**
codes de calcul « ingénieurs »

Les méthodes numériques (1/2)



- Dans le domaine des **phénomènes « continus »**
 - Une **approche « exacte »**: équations de **Navier-Stockes 3D**
 - Des **méthodes approchées**: *linéaires* ou *non linéaires* ; *dispersives* ou *non dispersives*
 - approximation « **ondes longues** » (**linéaires**) ($\lambda > h$) lorsque la source est un séisme
 - approximation « **ondes courtes** » (non linéaire, avec dispersion fréquentielle) dans le cas des (éboulements gravitaires): **équations de Boussinesq**

⇒ *Résolution le plus souvent par **Différences finies** – éventuellement **Eléments Finis**, **Volumes finis**, ...*

⇒ *Des équipes principalement étrangères: **NOAA** (PMEL Seattle), **Université de Bologne**, **Université de Tokyo**, ... et de très nombreuses équipes nouvelles depuis 2004: **CEA**, **BRGM**, ...*
- Pour les phénomènes **discontinus**

Une approche par les Méthodes particulières ?
- Quelques « **raffinements** » des méthodes approchées (continues) actuelles, communes aux différentes équipes qui y travaillent:
 - Une tendance aux méthodes **multigrilles**

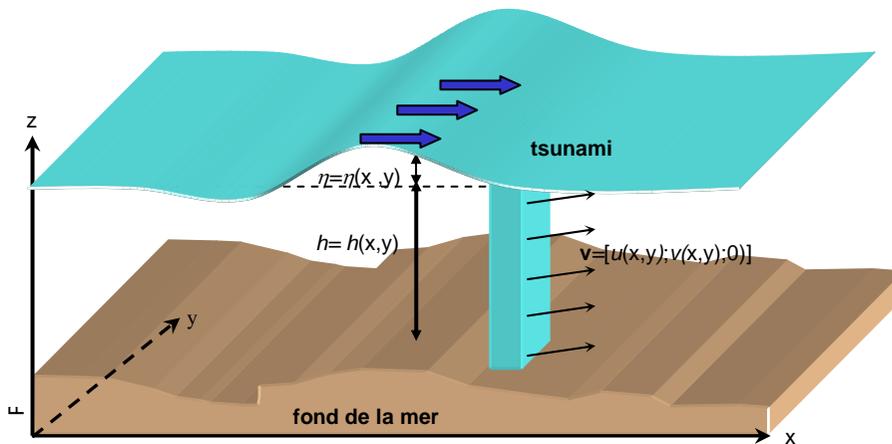
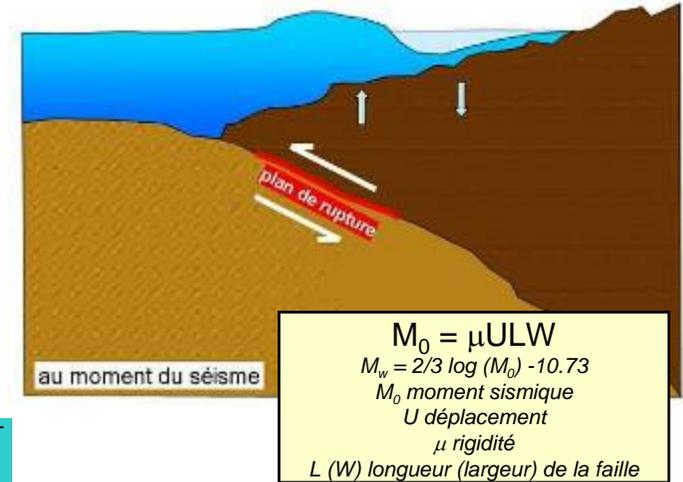
Afin de s'adapter à la bathymétrie fine à proximité des côtes et dans les ports, et reproduire les amplifications locales observées
 - Des tentatives pour inclure un terme de **dissipation artificielle**

Afin de modéliser la dissipation physique réelle sur le fond et lors du déferlement, et reproduire les hauteurs de run-up observées en cas de vastes inondations

Les méthodes (2/2) : ondes longues linéaires



- Les méthodes développées permettent de modéliser :
 - L'**initiation** du tsunami : la rupture sismique (ou autres mécanismes pour les sources gravitaires)
 - la **propagation** des ondes et les **inondations**
- Résolution par **différences finies** des équations de la mécanique des fluides
 - **non dispersive** $\omega^2 = gk \tanh(kh) \longrightarrow c \sim \sqrt{gh}$
 - approximation **ondes longues, non linéaires**



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

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

g gravité
v vitesse horizontale
\eta surface de l'eau

Une simulation typique (propagation transocéanique), c'est actuellement:
 quelques millions de mailles
quelques heures de calcul (en version *monoprocesseur*)

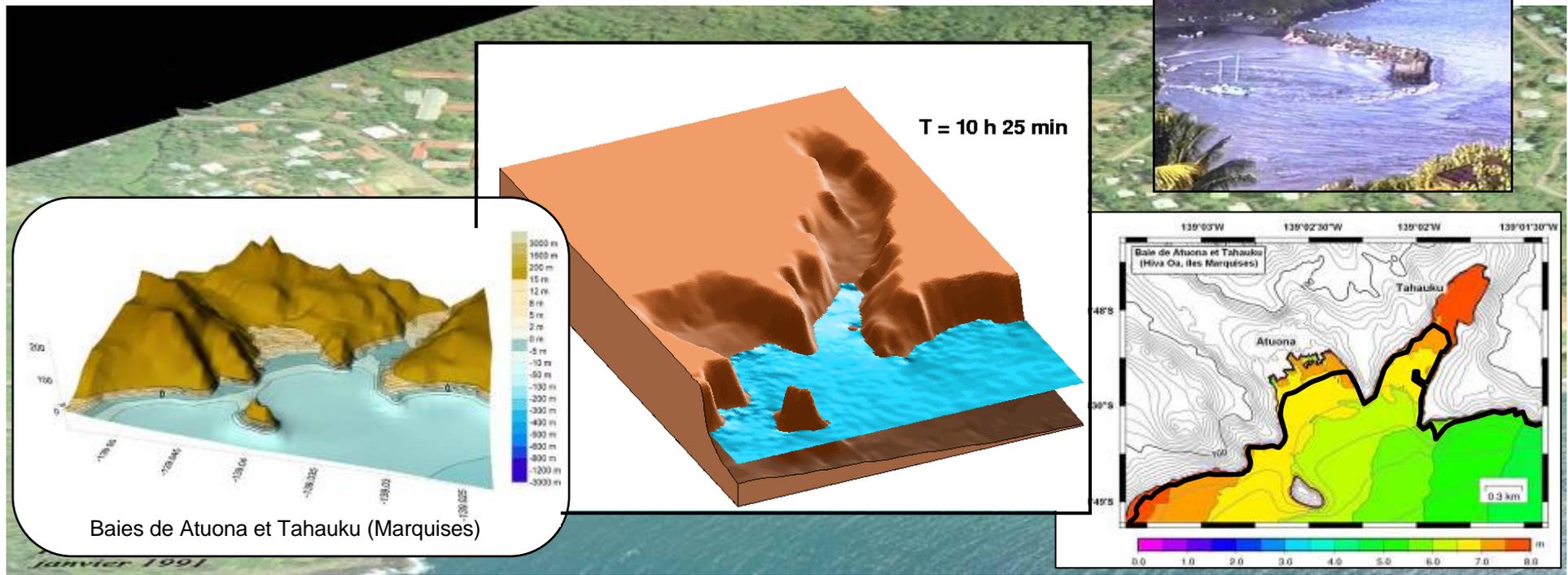
Exemple 1: Baie de Hiva Oa



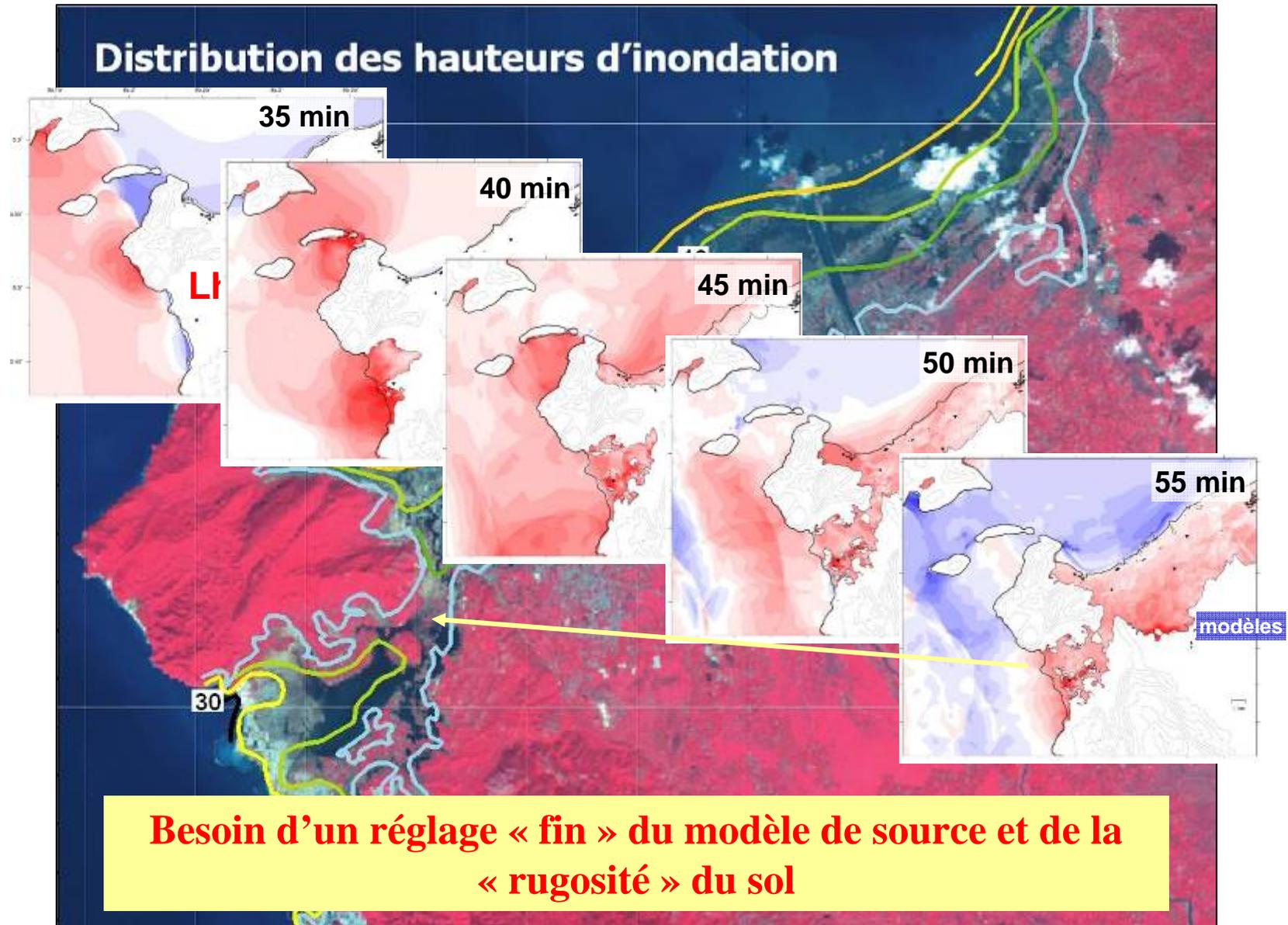
- Plusieurs fois inondée au XXe siècle (1946, 1960)
- Résolution par différences finies
 - couplage entre grilles bathymétriques de résolution croissante
 - nécessité de synthétiser des données bathymétriques et topographiques détaillées



Besoin de grilles fines: jusqu'à des pas de ~ 10-20 m dans les ports



Exemple 2: Banda Aceh



Exemple 3: Guadeloupe



Hauteurs maximales d'eau calculées dans la grille focalisée sur la région de la Guadeloupe
pour 3 sources sismiques différentes dans l'arc de subduction des Antilles

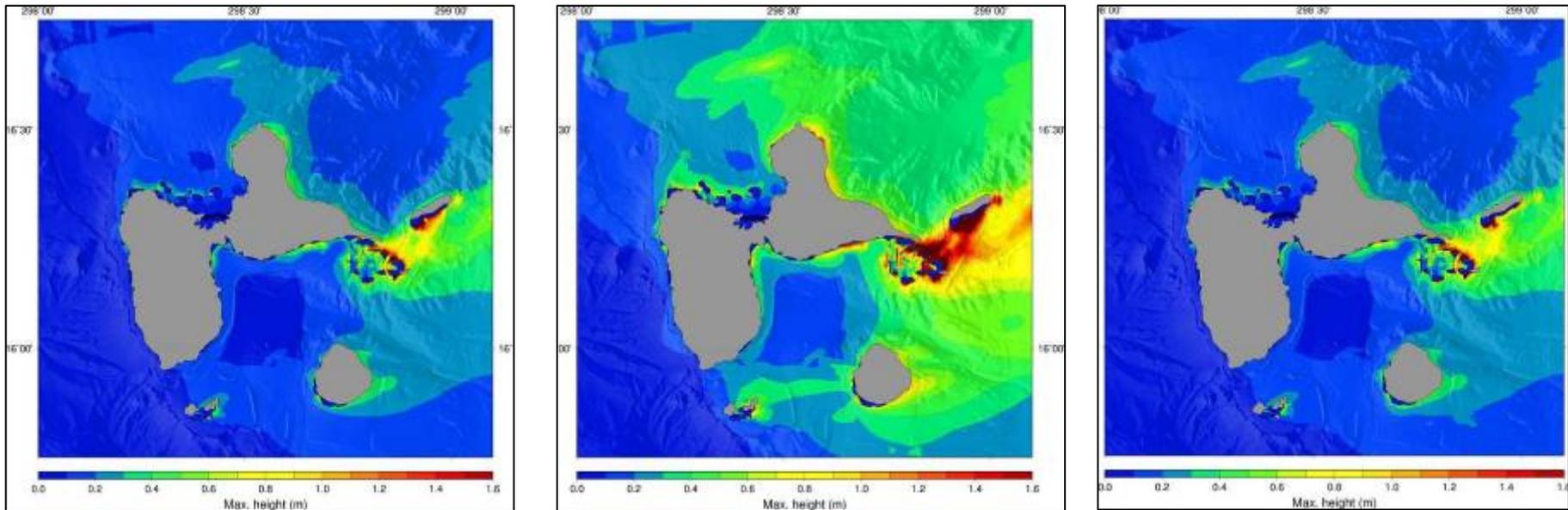


Illustration des « effets de site » 3D

Exemple 4: Palma de Majorque



Synthèse (cumul) fondée sur 24 scénarios de la marge algérienne

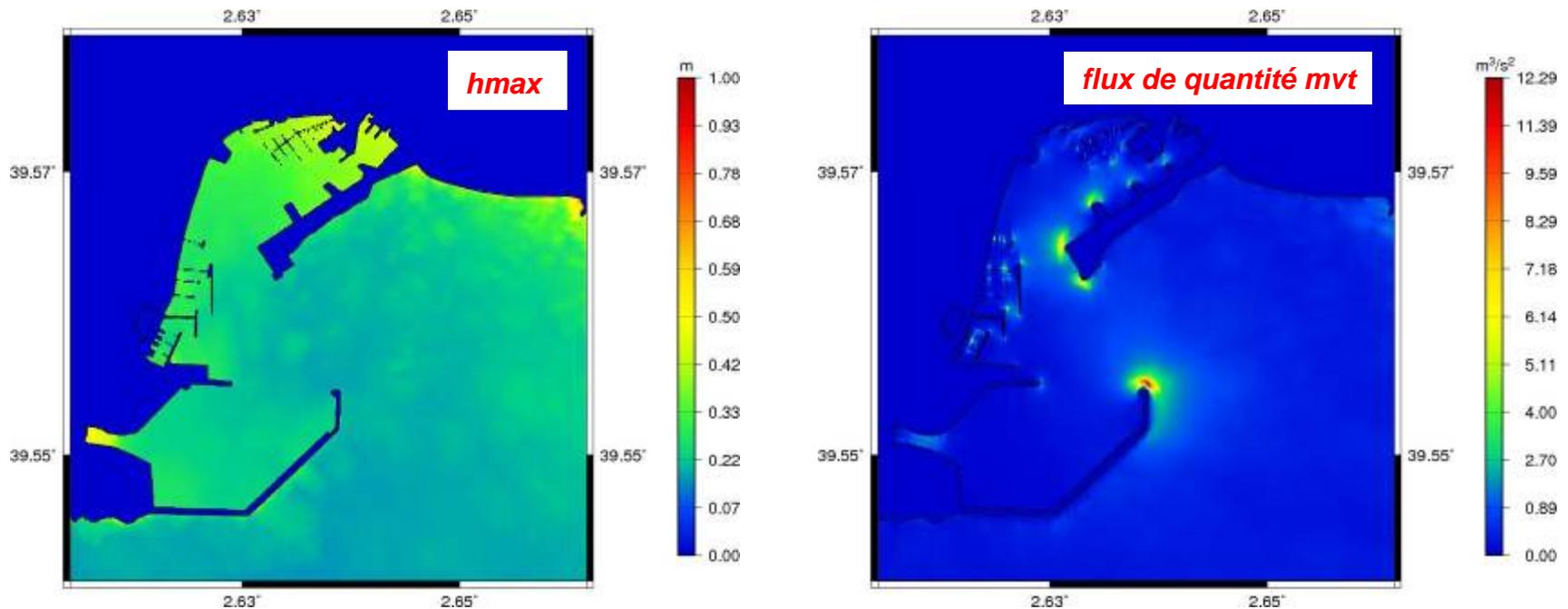


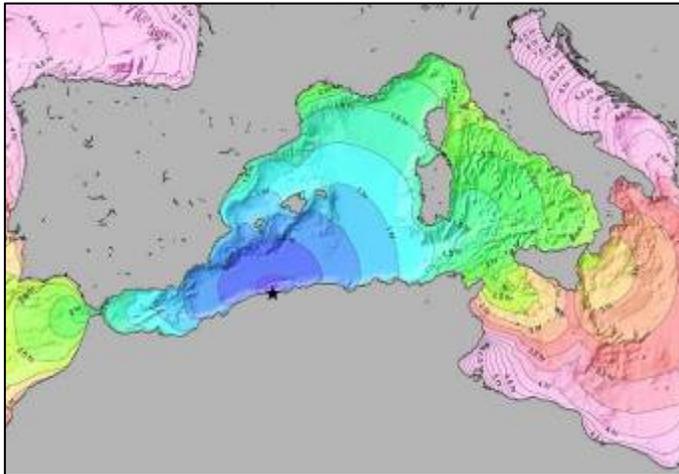
Illustration des amplifications très locales

Exemple 5: Prévisions en situation d'alerte

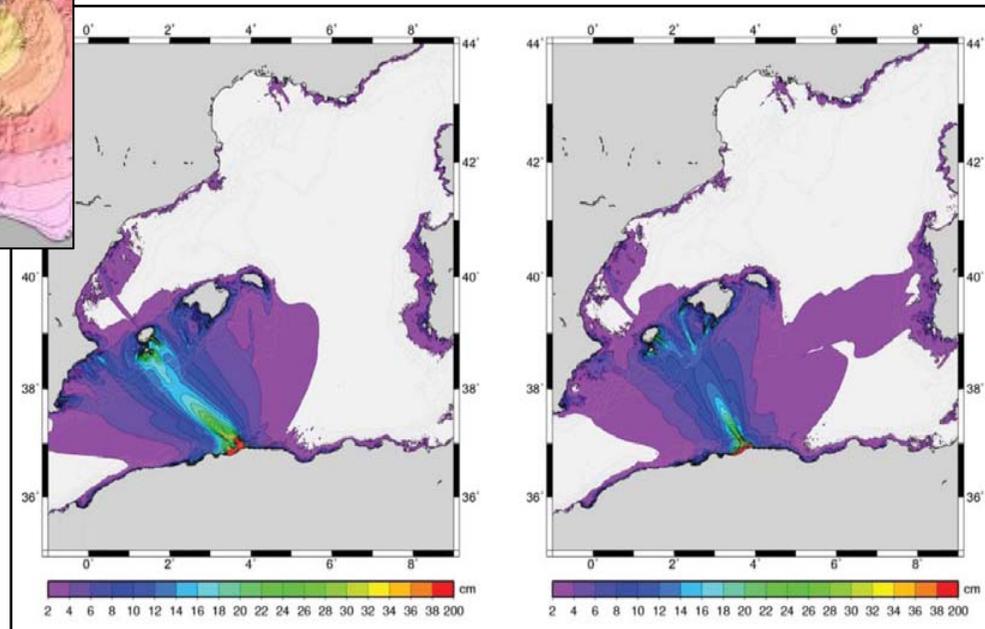


Calcul, dans les **15-20 min** suivant le séisme
(*avant l'arrivée effective des vagues*) :

1. des **temps d'arrivée**



2. des **amplitudes maximales probables** du tsunami



Résumé: simulation numérique des Tsunamis



- La **simulation numérique est incontournable** pour améliorer la prévention des tsunamis, caractériser les effets attendus, **cartographier** les zones inondables, participer aux systèmes d'**alerte**
Il faut pour cela:
 - disposer de données côtières haute résolution*
 - maîtriser les scénarios de séismes*
- Dans le domaine de la simulation numérique, les progrès à réaliser portent notamment sur:
 - Une meilleure prise en compte des effets topographiques et bathymétriques 3D via des **grilles plus fines**
 - Une meilleure prise en compte de l'**atténuation** et de la **friction**
 - La prise en compte du **déferlement**
 - La prise en compte des interactions avec les infrastructures et le **bâti**
- Pour la **fonction « alerte »**: il faudrait pouvoir mener toute une **série de calculs** en **« temps réel »** (*temps total de calcul < 10 mn*)



Conclusion

Les enjeux / les défis

Enjeux de la simulation numérique



- **Enjeu 1 (S/T): améliorer la qualité et la précision des simulations numériques**
 - « Mailles » de taille plus petite, en 3D M : x 1000 ; T : x 10000
 - Lois de comportement plus complexes (non linéaires) M & T : x [2-10]
- **Enjeu 2 (T) : vers une capacité de simulation « temps réel » de la propagation d'un tsunami à l'échelle d'un bassin maritime** T : x [10 – 100]
- **Enjeu 3 (S) : vers un code unique « de la faille à la structure » couplant plusieurs méthodes et incluant les effets induits (glissements de terrain, ...) et l'interaction avec le bâti**
 - Domaines en espace et en temps plus grands M & T : x [100-1000]
- **Enjeu 4 (T): vers un code unique « de la source à l'inondation » couplant plusieurs méthodes et incluant le déferlement et l'interaction avec le bâti et les infrastructures**
 - Domaines en espace et en temps plus grands M & T : x [10-100]
- **Enjeu 5 (S + T): tenir compte des incertitudes / de la connaissance incomplète des milieux géologiques, de la bathymétrie, de la topographie...**
 - Pour un scénario donné: études paramétriques / plans d'expérience T : x [100 – 1000] ?

S: séisme T: Tsunami

M: augmentation requise de la taille « mémoire » (*par rapport à la pratique aujourd'hui*)

T: gain à faire sur la durée d'un calcul (*par rapport à la pratique aujourd'hui*)

Conclusion Générale



- Un **gain d'un facteur 100 à 1000** des capacités de calcul disponibles permettra, à une échéance de ~ 5 ans (?), l'émergence de codes de calcul 3D modélisant **l'essentiel des phénomènes** « **de la faille à la structure / l'inondation** », à une **échelle encore intermédiaire**
 - ⇒ Meilleure prise en compte - dans des conditions contrôlées - de la variabilité des mouvements sismiques (effets de site, liquéfaction, éboulements, ...) et des effets des tsunamis (rugosité, ...)
- Un **gain supplémentaire de l'ordre de 1000 à 10000** sera nécessaire pour prendre en compte ces phénomènes à une **échelle encore plus fine** et avec une **physique plus riche** (ruptures, déferlement, interactions avec le bâti, ...)
- Pour des raisons pratiques et économiques, le milieu « terre » ne sera jamais parfaitement connu à une échelle équivalente au pas discrétisation utilisé par ces codes

Un **nouveau gain d'un facteur ~ 100 à 1000** des capacités de calcul permettrait de prendre en compte les « **incertitudes** » **du modèle**, et donc – pour une source donnée – d'aboutir à une estimation réellement « probabiliste » des aléas et des risques

La simulation complète « ab nihilo » de l'aléa et du risque associé – y compris une modélisation déterministe du cycle et de la source sismique – reste aujourd'hui un « rêve »...

*si l'on veut bien admettre que ce qui précède
(possibilité de multiplier les puissances de calcul actuelles par un facteur **~10⁹**)
n'en est pas un ...*