

## 2.7 | Mouvements verticaux et cycle sismique. Généralités et un exemple au Vanuatu



Valérie BALLU

Université de La Rochelle  
UMR CNRS 7266 LIENSs

Bonjour!

Je vais effectivement faire un petit zoom sur la contribution des mouvements verticaux et le rôle, en particulier de la tectonique et des séismes sur ce niveau marin relatif.

### **Mouvements de la croûte terrestre et tectonique des plaques**

Guy vient de nous parler des mouvements verticaux de la croûte. On a vu que ça montait à certains endroits, ça descendait à d'autres (diapo 02). En fait, il y a une partie de ces mouvements qui peuvent être liés à la tectonique des plaques.

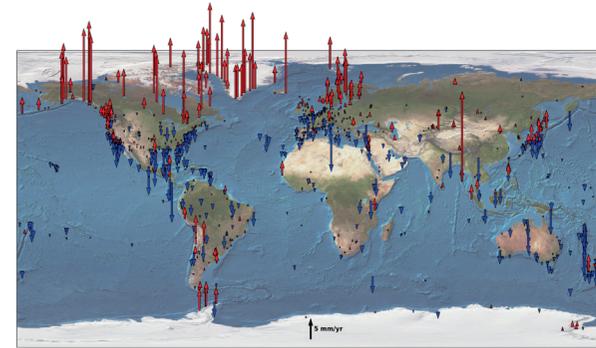
Donc là, je vous montre une carte des mouvements horizontaux mesurés également par GPS (diapo 03). Vous voyez qu'il y a des mouvements cohérents, à la surface du globe, qui ne sont pas forcément les mêmes et qu'on peut découper sous forme de plaques tectoniques. Je pense que vous avez tous entendu parler de la tectonique des plaques. Vous avez des couleurs différentes en fonction de l'appartenance à chacune des plaques et on voit qu'il y a des mouvements cohérents et des plaques qui se déplacent les unes par rapport aux autres de façon différente en fonction du type de frontière qu'elles ont entre ces plaques.

On a des endroits où les plaques s'ajoutent, s'écartent l'une de l'autre. Ça va être par exemple, lorsqu'il y a une dorsale que j'ai imagée en rouge, ici (diapo 04). Il y a des plaques qui coulissent les unes par rapport aux autres, ici, le long de failles de décrochement ou des failles transformantes et puis, d'autres zones qui vont nous intéresser plus particulièrement dans le cas des littoraux, qui sont les zones de subduction.

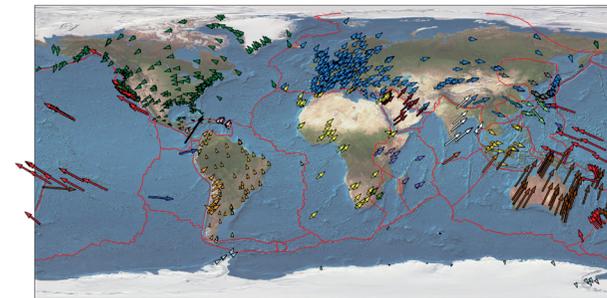
Ce sont des zones de convergence entre deux plaques où il y a une plaque qui plonge sous l'autre et ce sont des zones importantes pour les littoraux parce que, d'abord, vous voyez qu'il y en a beaucoup le long des littoraux du monde, ici, et ce sont des sources d'aléas, à la fois aléa sismique et tsunami et également aléa niveau marin.

C'est ce à quoi on va s'intéresser aujourd'hui et, en particulier, dans la zone des îles Torrès au Vanuatu, qui est ici située dans une zone de subduction, la zone des Nouvelles Hébrides.

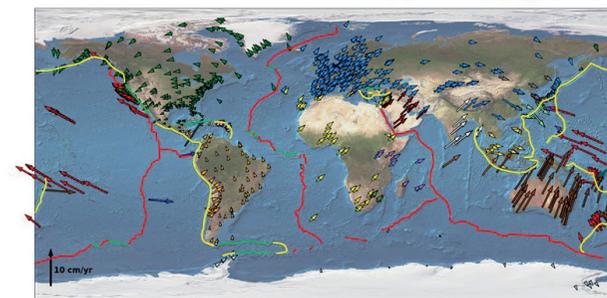
Diapo 02 >



Diapo 03 >



Diapo 04 >



îles Torrès,  
Zone de subduction des  
Nouvelles Hébrides

Diapo 02 à 04 > **Mouvements de la croûte terrestre et tectonique des plaques**

## Contexte géodynamique

C'est dans cette zone que la plaque indo-australienne plonge sous la plaque pacifique à une vitesse de l'ordre de la dizaine de centimètres par an et vous voyez, fig.02 à droite, je vous ai représenté une carte de sismicité à partir d'enregistrements globaux. Je ne vous demande pas de regarder précisément, mais ce qui est important de voir c'est ici, vous avez donc les îles de l'archipel du Vanuatu et vous voyez qu'il y a beaucoup de séismes, à des profondeurs différentes.

Ça, c'est la couleur qui vous donne la profondeur, et également de magnitude très variée. Il y a des petits points et puis il y a des points plus importants, et vous avez également parfois des séismes de grande magnitude.

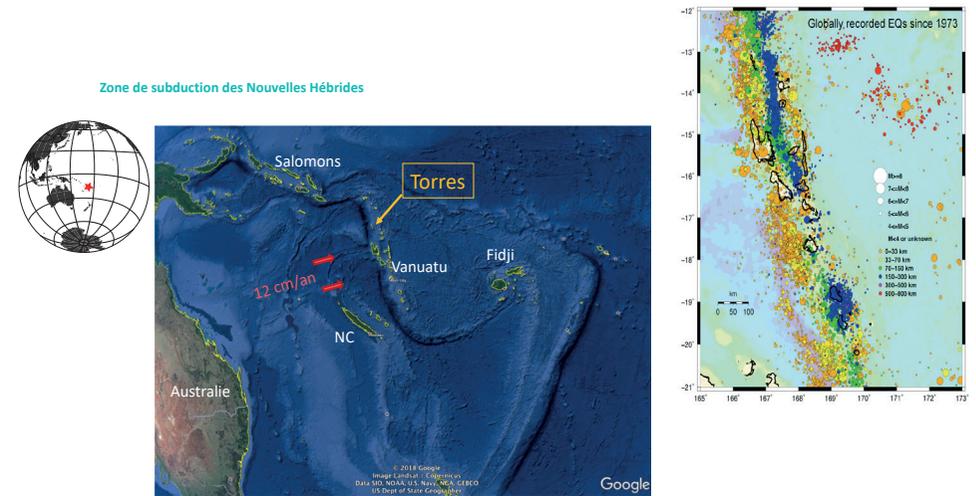
## Cycle sismique en zone de subduction

Ces séismes ont lieu principalement à l'interface entre les plaques, parce qu'il y a du frottement entre ces deux plaques. Donc le mouvement est continu à distance et quand on arrive au niveau de la frontière de plaques, il y a éventuellement un blocage, qui fait que la plaque qu'on appelle chevauchante, est entraînée vers le bas. Il y a une accumulation d'énergie élastique jusqu'à un séisme, qui rompt et où la plaque chevauchante remonte (*animation vidéo - diapo 06*).

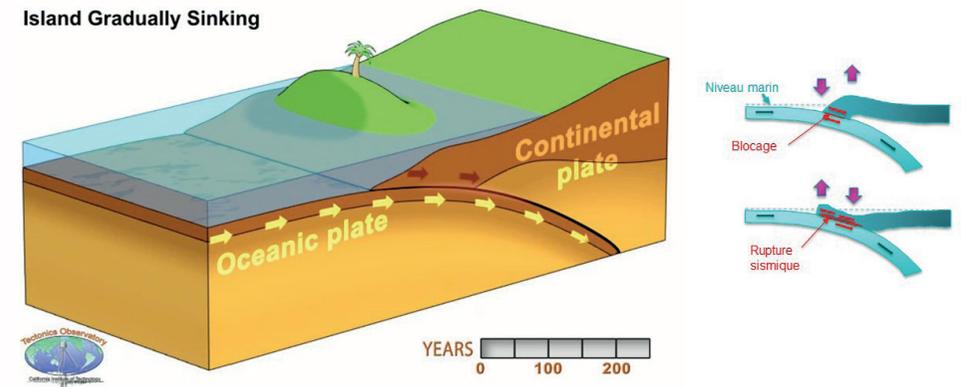
Regardez particulièrement le mouvement de cette île : vous voyez que l'île entre deux séismes descend, ce qu'on appelle la subsidence intersismique, et au moment du séisme cette île va remonter. Et vous avez des mouvements qui sont inverses, quand on s'éloigne un petit peu de la frontière de plaques et qu'on va plus dans les terres.

C'est ce que j'ai représenté par le petit schéma à droite. Vous voyez, entre des séismes, ça, c'est le schéma d'en haut, vous voyez qu'il y a un blocage, une accumulation de contraintes, avec des zones qui sont en subsidence ici, d'autres zones qui remontent plus en arrière des plaques.

Au moment du séisme, on a la rupture et le mouvement inverse, avec les zones qui étaient en subsidence entre les séismes, qui vont remonter et inversement, les zones qui étaient en uplift, c'est-à-dire en soulèvement entre deux séismes, qui s'effondrent.



Diapo 05 > Contexte géodynamique



Diapo 06 > Cycle sismique en zone de subduction

## Inondations côtières aux Torrès, Vanuatu

Si on regarde maintenant ce qui s'est passé au Vanuatu.

Quand on voit une plantation inondée (photo 1), une plantation complètement mourante, les pieds dans l'eau. Les images de cette plantation ont fait un petit peu le tour du monde, associées à celle du déménagement d'un village sous couvert d'adaptation au changement climatique, et ce qui a fait dire, lors d'une conférence des Nations unies en 2005, que ces habitants des îles du Vanuatu étaient probablement les premiers réfugiés climatiques.

Connaissant l'existence des mouvements du sol, il était naturel pour nous de se poser la question, quelle était la contribution du niveau marin dans ces inondations et des mouvements du sol, puisque les deux peuvent être ajoutés. (fig.03)



"possibly the world's first community to be formally moved out of harms way because of climate change" [2005 Climate Conference in Montreal, UNEP].



## Mouvements verticaux aux différentes échelles de temps

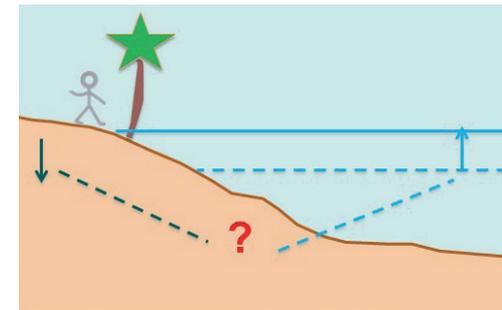
Si on regarde sur le long terme, ces îles montent. Ça vous est montré à la fois par la morphologie des îles, qui font plusieurs centaines de mètres d'altitude, mais également par la présence de plateaux coralliens.

Qui dit corail dit formation sous-marine, et en fait ces plateaux coralliens dont vous voyez la bordure sur la photo ci-contre sont éventuellement soulevés, et la datation des plateaux nous permet d'avoir une estimation de la vitesse de soulèvement qui a été estimée dans ce cas à l'ordre du millimètre par an. Ce sont les mouvements à long terme.

Mais qu'est-ce qui se passe à court terme ? Pourquoi est-ce que les gens ont les pieds dans l'eau ?

Ça, c'est la géodésie, en particulier les mesures GPS, qui peuvent nous répondre.

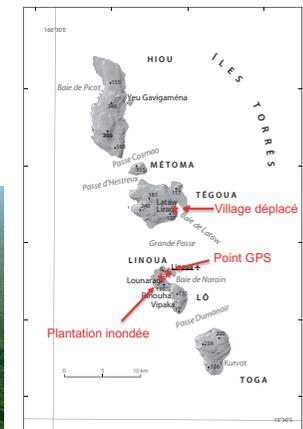
Vous voyez sur cette carte qu'il y a un point GPS qui a été installé à proximité de la plantation inondée. Le village déplacé, lui est sur une autre île, mais tout ça ce n'est pas très loin.



Diapo 08 > Inondations côtières aux Torrès, Vanuatu

- A long terme : les îles Torres montent
- Datation plateaux coralliens surélevés
  - Tendence 1 mm/an (Taylor et al., 1985)
- A court terme ?
- géodésie

Plateaux coralliens soulevés



Diapo 09 > Mouvements verticaux aux différentes échelles du temps

## Inondations côtières

**Diapo 10** | Nous avons eu l'occasion de refaire une mesure en 2009 sur ce point GPS, qui avait été installé dans les années 2000 par des collègues de l'IRD. Ce qui nous a permis de mettre en évidence qu'il y avait ce qu'on appelle une subsidence intersismique entre deux séismes importants, une subsidence de l'ordre du centimètre par an.

Donc là on parle de centimètre par an, on est déjà dans des ordres de grandeur qui sont intéressants par rapport au niveau marin.

**Diapo 11** | En 2009, peu de temps après notre mesure, il se trouve qu'il y a eu une série de très gros séismes, qui sont représentés ici par les points et qui sont des séismes de magnitude supérieure à 7, 7.4 - 7.7 - et 7.8. Nous sommes donc allés remesurer ce point GPS, pour s'apercevoir que l'île était remontée d'une vingtaine de centimètres.

Ce cas nous montre qu'on a, à la fois des mouvements qui peuvent être lents, assez imperceptibles pour l'humain, lents de l'ordre du centimètre par an, et ensuite de la dizaine de centimètres soudainement lors d'un séisme.

**Diapo 12** | Maintenant si on regarde ce qui a pu se passer du côté compartiment marin - comment varie le niveau marin dans cet endroit - on voit sur cette carte (fig.02) des variations de niveau marin altimétrique (mesures satellitaires qui sont donc indépendantes du sol) et que les îles Torrès sont situées dans une zone, où le niveau marin monte particulièrement vite. On est pas loin du centimètre par an dans cette zone, sur la période d'observation.

On voit aussi, fig.01, par la courbe bleue foncé, qu'il y a des variations saisonnières ou inter-annuelles, qui sont d'amplitudes importantes, que subissent également les habitants.

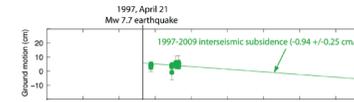
Maintenant, si on combine à la fois les variations du niveau marin qui viennent du côté mer, et les mouvements lents du sol, vous voyez c'est la courbe en bleu clair ici, on a une variation lente qui est de l'ordre de deux centimètres par an cette fois-ci.

**Diapo 13** | Et maintenant, si on combine à la fois ces mouvements lents, mais également les sauts cosismiques, donc l'influence des séismes, on voit que les habitants ont subi des variations du niveau marin de l'ordre du mètre sur la période considérée.

Et vous voyez ici qu'il y avait eu un séisme en 97 qui a fait descendre l'île de 50 centimètres à un mètre, et puis un autre séisme qui l'a fait remonter ici d'une vingtaine de centimètres.

Mesure du mouvement vertical par GPS

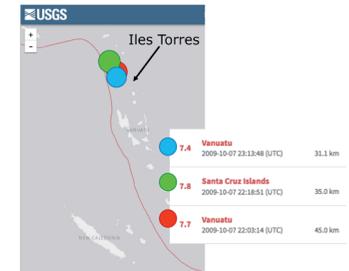
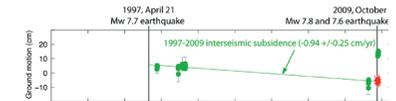
- Subsidence intersismique : ~1 cm/an



**Diapo 10**

Mesure du mouvement vertical par GPS

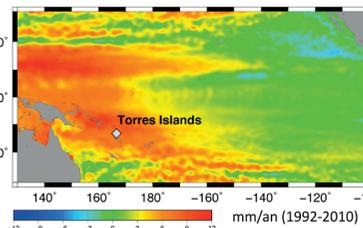
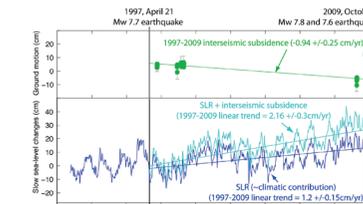
- Subsidence intersismique : ~1 cm/an
- Mouvement co-sismique 2009:
  - Soulèvement de 20 cm



**Diapo 11**

Variations du niveau marin « absolu »

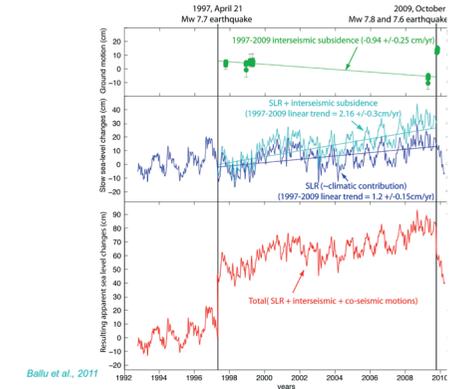
- Montée ~1 cm/an



**Diapo 12**

Variations du niveau marin relatif

- Intersismique ~2 cm/an
- Total : de l'ordre du mètre



**Diapo 13**

**Diapo 10 à 13 > Inondations côtières**

## Cycle sismique en zone de subduction - exemple d'un cycle simple

Dans une zone sismique, dans une zone de subduction comme je vous ai montré sur le premier modèle, les plaques ont un mouvement continu. Il n'y a pas juste un séisme puisqu'en fait le moteur ne s'arrête pas, la plaque continue à avancer, et donc on observe classiquement une succession de mouvements intersismiques.

Dans le cas des îles Torrès, on a principalement une subsidence intersismique, puis un mouvement cosismique qui peut faire remonter l'île, à nouveau une subsidence intersismique, un mouvement cosismique qu'il fait remonter, etc., puisqu'ici pour les Torrès, on est dans cette zone qui subside en intersismique.

## Cycle sismique en zone de subduction - le cycle peut être complexe...

Ce n'est pas toujours aussi simple, puisqu'on a vu également dans cet exemple-là, que le premier séisme de 97 avait fait descendre l'île, alors qu'on est dans une zone où c'était en subsidence intersismique, donc on s'attendait à ce qu'elle monte.

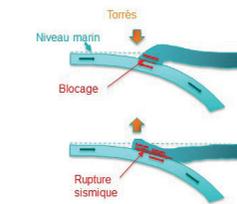
En fait, c'est parce que ce sont des zones de fortes tensions dans la croûte, ces frontières de plaques. Et donc vous pouvez avoir des failles qui sont à proximité de la faille principale, qui elles aussi sont activées. Et une fois de temps en temps, on peut avoir un mouvement inverse, et c'est ce qui s'est passé pour les îles Torrès.

C'est pour ça que je vous ai précisé ici que ce n'était pas forcément la même faille, qui avait bougé en 97 et en 2009.

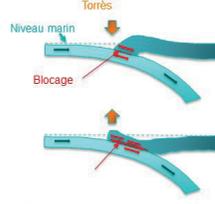
## Cycle sismique en zone de subduction

Il existe également des zones, si on se met un petit peu plus en arrière de la frontière de plaques, où on va être en soulèvement intersismique et subsidence cosismique.

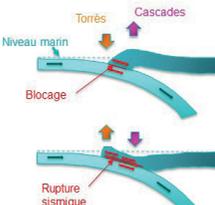
Cette fois-ci, le séisme risque de faire descendre la zone littorale.



- Déformation du sol non linéaire



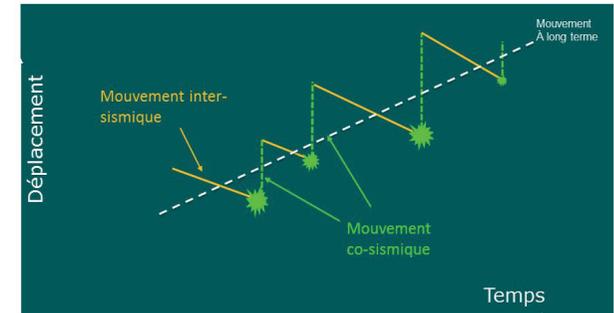
- Déformation du sol non linéaire
- D'autres failles peuvent rompre...



- Déformation du sol non linéaire
- D'autres failles peuvent rompre...
- Mouvement variable en fonction de la position par rapport à la faille

## Cycle sismique en zone de subduction

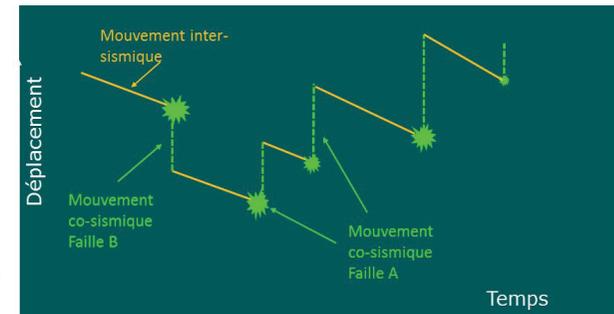
Exemple de cycle simple...



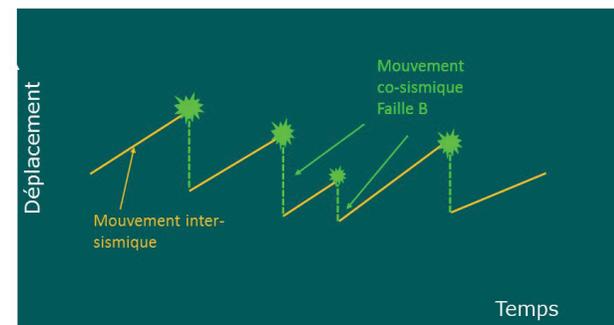
## Cycle sismique en zone de subduction

Le cycle peut être complexe...

Son étude requiert des données à différentes échelles de temps, continues si possible...



## Cycle sismique en zone de subduction



## Autre exemple : la subduction des Cascades

C'est ce qui se passe aux Cascades, en Amérique du Nord, la plaque Juan de Fuca qui plonge, qui subducte sous l'Amérique du Nord et qui est en fait plutôt un effet de soulèvement intersismique et subsidence co-sismique, et subsidence lors des séismes. Cela a été montré sur des séismes anciens. Il n'y a pas eu de gros séismes récents dans cette zone où la ville de Seattle n'est pas loin. Par contre, on sait qu'en 1700, il y a eu un séisme absolument majeur et il y a eu d'autres séismes 500 ou 800 ans au préalable.

Vous voyez que ce qui se passe, c'est qu'en fait au moment d'un séisme, il y a une forêt littorale (1). Au moment d'un séisme le sol descend, la forêt a les pieds dans l'eau (2). Il y a éventuellement un tsunami qui est associé (3), et dans les sédiments (4) - je pense qu'Éric pourrait vous en parler plus précisément - mais on peut avoir des traces dans les sédiments avec par exemple du sable grossier, qui est un témoignage d'une vague de tsunami, et ensuite la forêt meurt évidemment (5) et un sol peut se reconstituer avec vasières, etc., au cours du temps.

Vous avez une photo que je trouve assez impressionnante, de cette forêt fossile avec des arbres qui ont plus de 2000 ans. On appelle ça les forêts fantômes.

Et si vous étudiez au cours du temps, vous pouvez voir sur une zone littorale (photo 3), qu'on a plusieurs étages de végétation qui sont morts, avec les racines encore en place. L'étude de ces sols anciens nous renseigne sur l'histoire sismique qui a pu avoir lieu dans ces zones.

Ainsi, on voit que ces mouvements verticaux à la côte, ça n'est pas seulement une fois, mais que ça peut avoir lieu plusieurs fois. Et en termes d'aménagement du territoire, c'est absolument crucial.

## Mouvements verticaux de la croûte et cycle sismique

Je vous ai remis une photo de la zone des Torrès, où on voit que le village a déménagé entre cette zone extrêmement littorale et un tout petit peu plus en arrière.

Une question qu'il est légitime de se poser : est-ce que ce déménagement - ici c'est un village, mais on parle d'autres zones de repli stratégique... - est-ce que le nouvel emplacement est vraiment adapté en fonction des variations du niveau marin futur ?

L'objectif de ma présentation, c'était de vous montrer qu'on ne peut pas non plus faire complètement l'impasse sur les mouvements verticaux en termes d'aménagement du littoral.

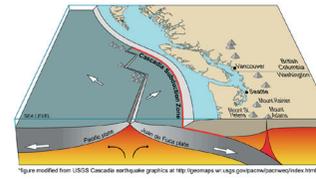
Parce qu'ils peuvent parfois être lents, avec des mouvements intersismiques - enfin la partie tectonique des mouvements verticaux - mais également parfois catastrophiques, comme nous l'ont montré des séismes récents.

C'est donc un paramètre à prendre en compte aussi.

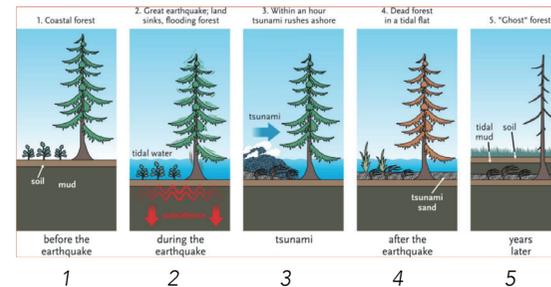
## Cycle sismique en zone de subduction

Autre exemple : la subduction des Cascades

- Subsidence co-sismique



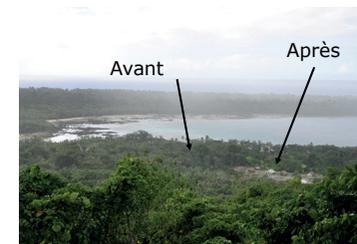
Forêts fantômes Etude des événements passés



From Bob Butler, Univ. of Portland

Diapo 17 > Autre exemple : la subduction des Cascades

## Mouvements verticaux de la croûte et cycle sismique



La compréhension des différents facteurs contribuant aux variations de niveau marin relatif est cruciale pour l'évaluation des aléas (niveau marin, tsunami) aux différentes échelles de temps.

L'étude des mouvements passés renseigne sur la dynamique des processus et est nécessaire pour les projections futures et pour un aménagement du territoire adapté.

Il faut regarder les modèles de climat futur... mais il ne faut pas négliger la contribution de la Terre solide.

Diapo 18 > Mouvements verticaux de la croûte et cycle sismique