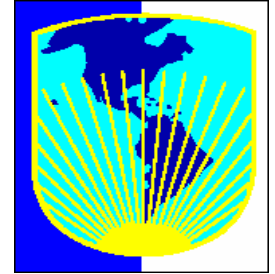




Programme d'appui à la mise en œuvre d'un plan national de gestion du risque et de prévention des désastres

Cours intensif - Port-au-Prince, Haiti, 7 octobre 2002



L'aléa sismique en Haïti

Cadre géographique et temporel

Eric Calais – Associate Professor of Geophysics
Purdue University - Department of Earth and Atmospheric Sciences
West Lafayette – IN 47907-1397 - USA

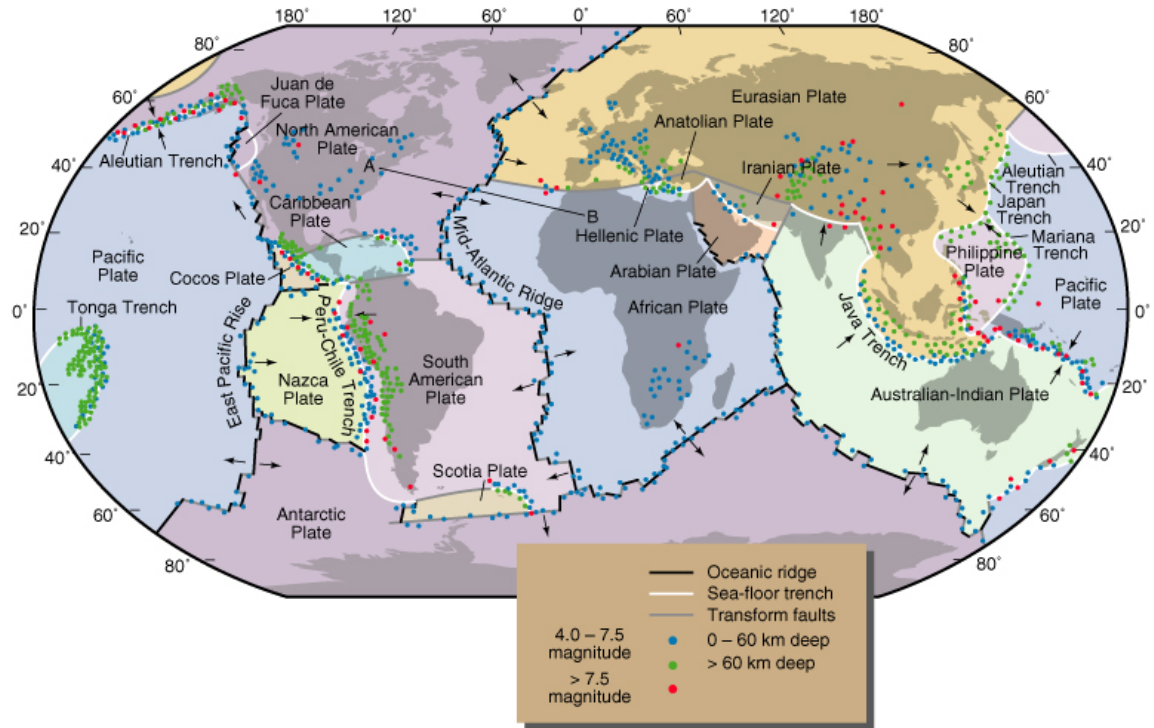
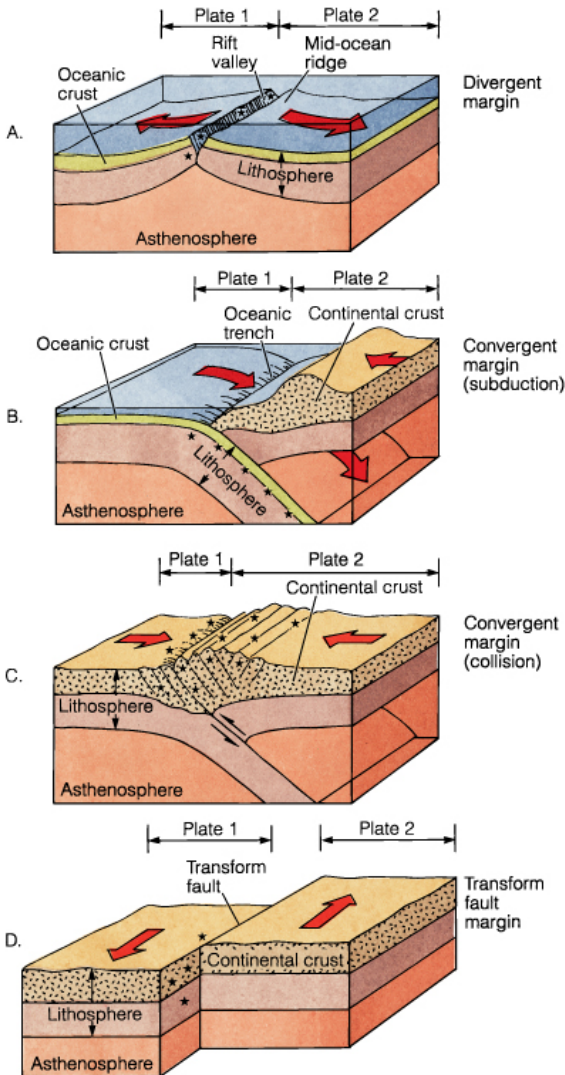
ecalais@purdue.edu

<http://www.eas.purdue.edu/~calais>

Objectifs

- Pourquoi des séismes en Haïti?
- Quelles sont les régions affectées?
- Quelle est le temps de retour des séismes en Haïti?
- Que sait-on, aujourd'hui, sur la mécanique des failles sismiques?
- Quelles sont les techniques modernes d'étude des séismes?
- Quelles informations fournir aux études de menace et de risque?

La tectonique des plaques

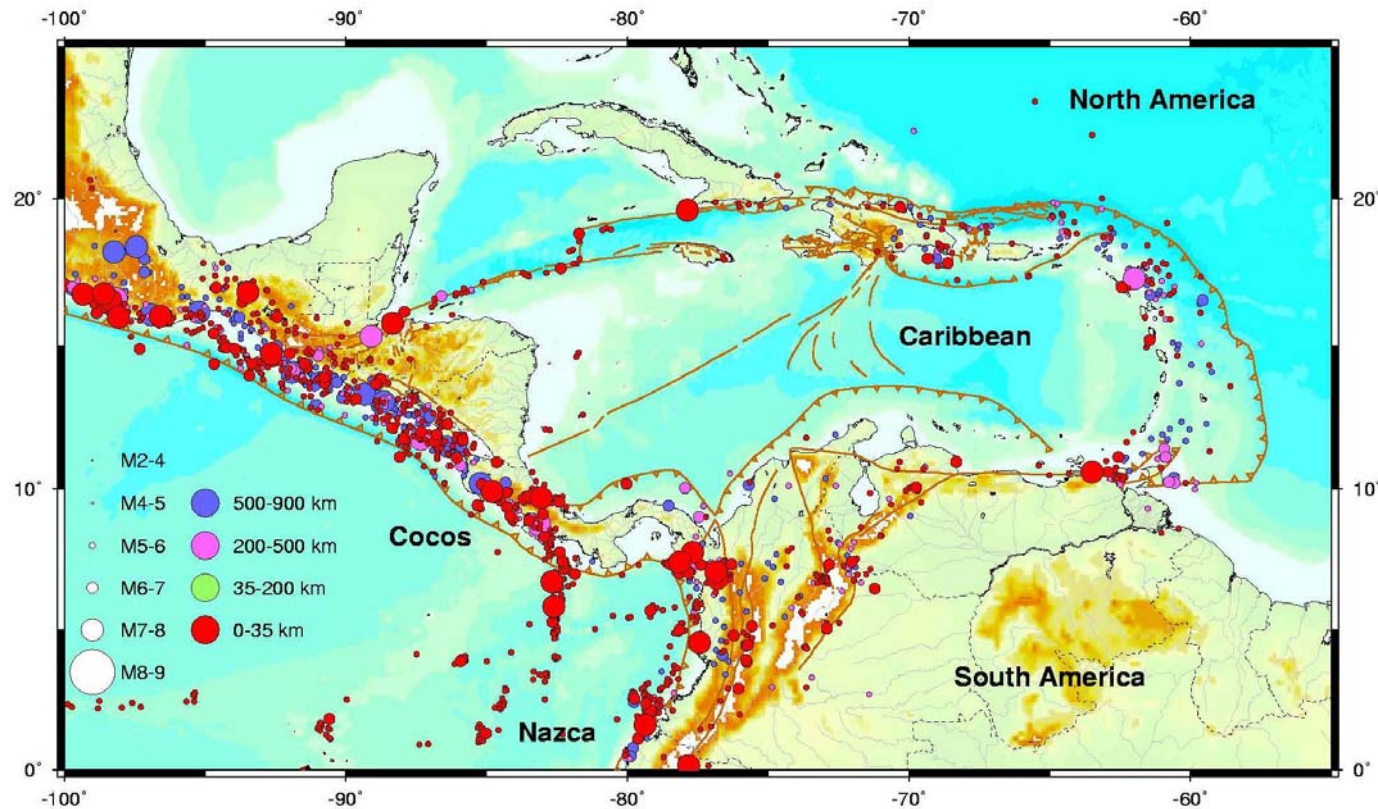


Copyright 1999 John Wiley and Sons, Inc. All rights reserved.

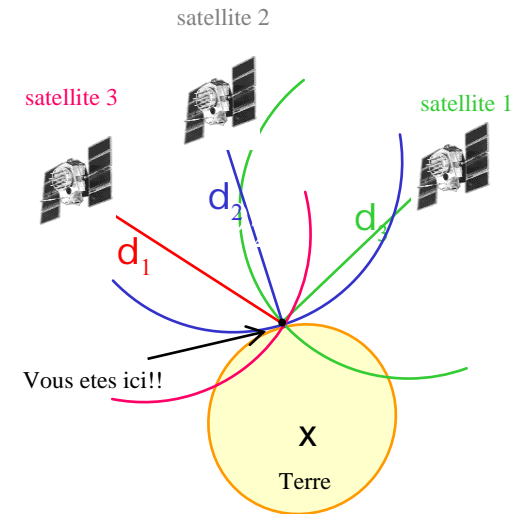
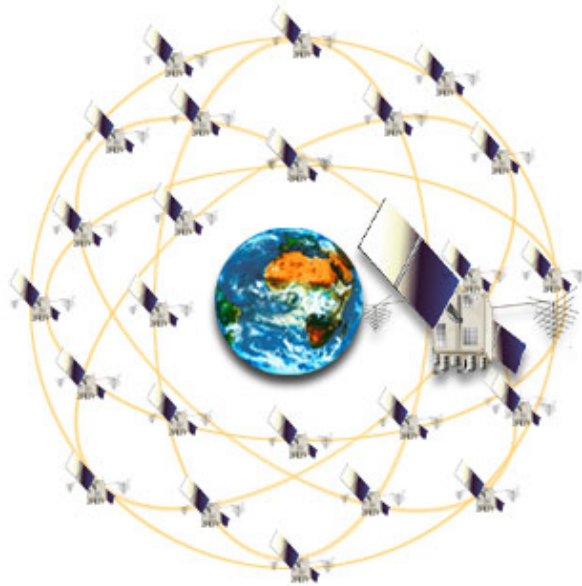
Copyright 1999 John Wiley and Sons, Inc. All rights reserved.

Un zoom sur les Caraïbes

- Une (petite) plaque entourée de 4 (grandes) plaques
- Des frontières décrochantes et convergentes, avec des transitions convergence-décrochement complexes
- Les séismes affectent des zones relativement larges
- Vitesses de déplacement de la plaque Caraïbe? ⇒ le GPS



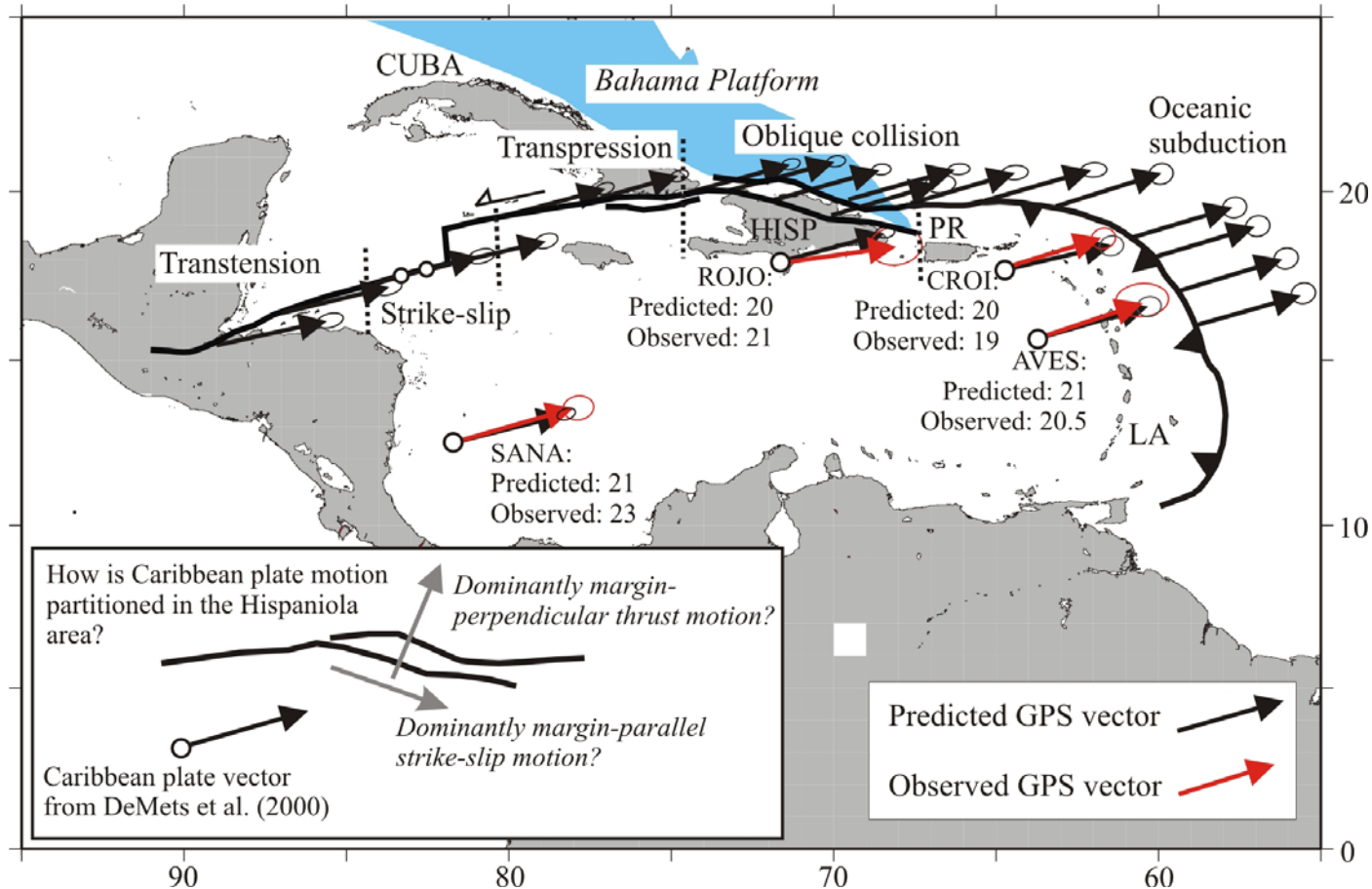
Le GPS



- Une constellation de 24 satellites qui émettent un signal radio
- Des antennes et récepteurs capables de décoder ces signaux et de les transcrire en des distances satellite-récepteur
- 3 satellites \Rightarrow une position (en fait 4 satellites car le temps est aussi une inconnue...)
- Précision:
 - Récepteur à \$100 et temps réel \Rightarrow 100 m
 - Récepteur à \$10 000 et post-traitement \Rightarrow 1 mm...

La plaque Caraïbe

- Résultats GPS \Rightarrow on connaît la vitesse relative des plaques = 2 cm/an, légèrement oblique
- Ce déplacement induit des déformations dans une large zone à la frontière des deux plaques \Rightarrow zoom sur NE Caraïbe

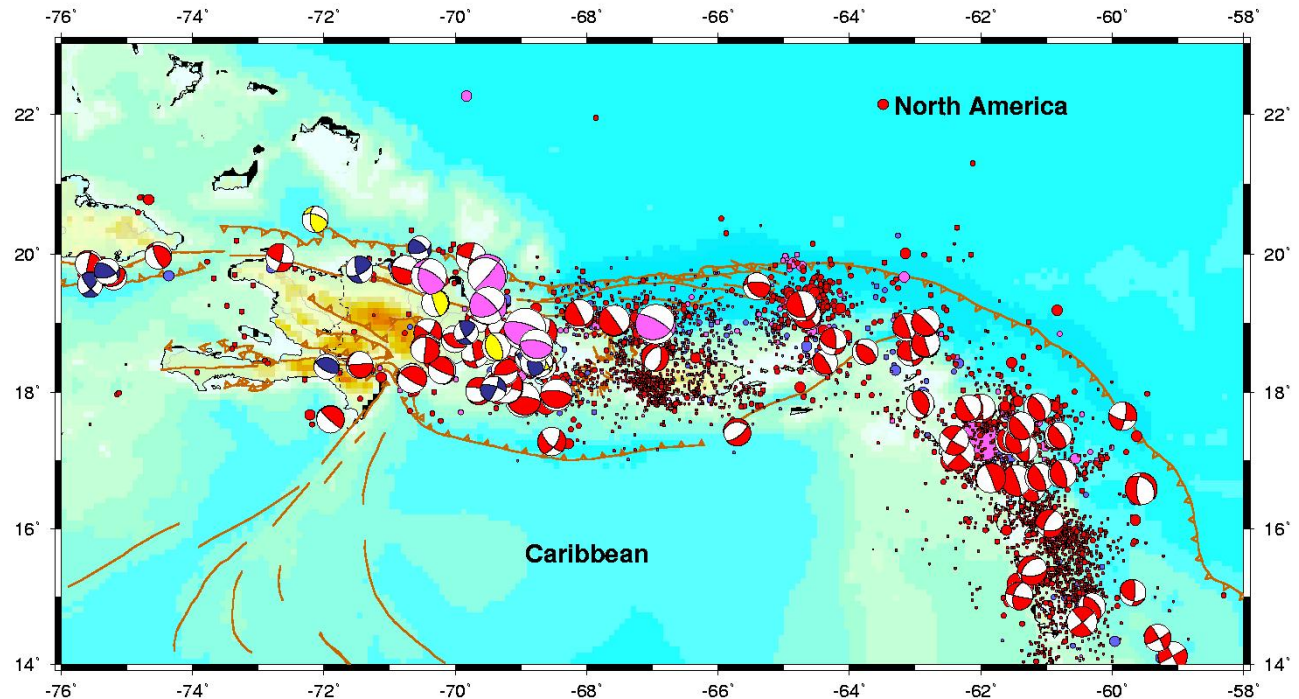


Un zoom sur le NE Caraïbe

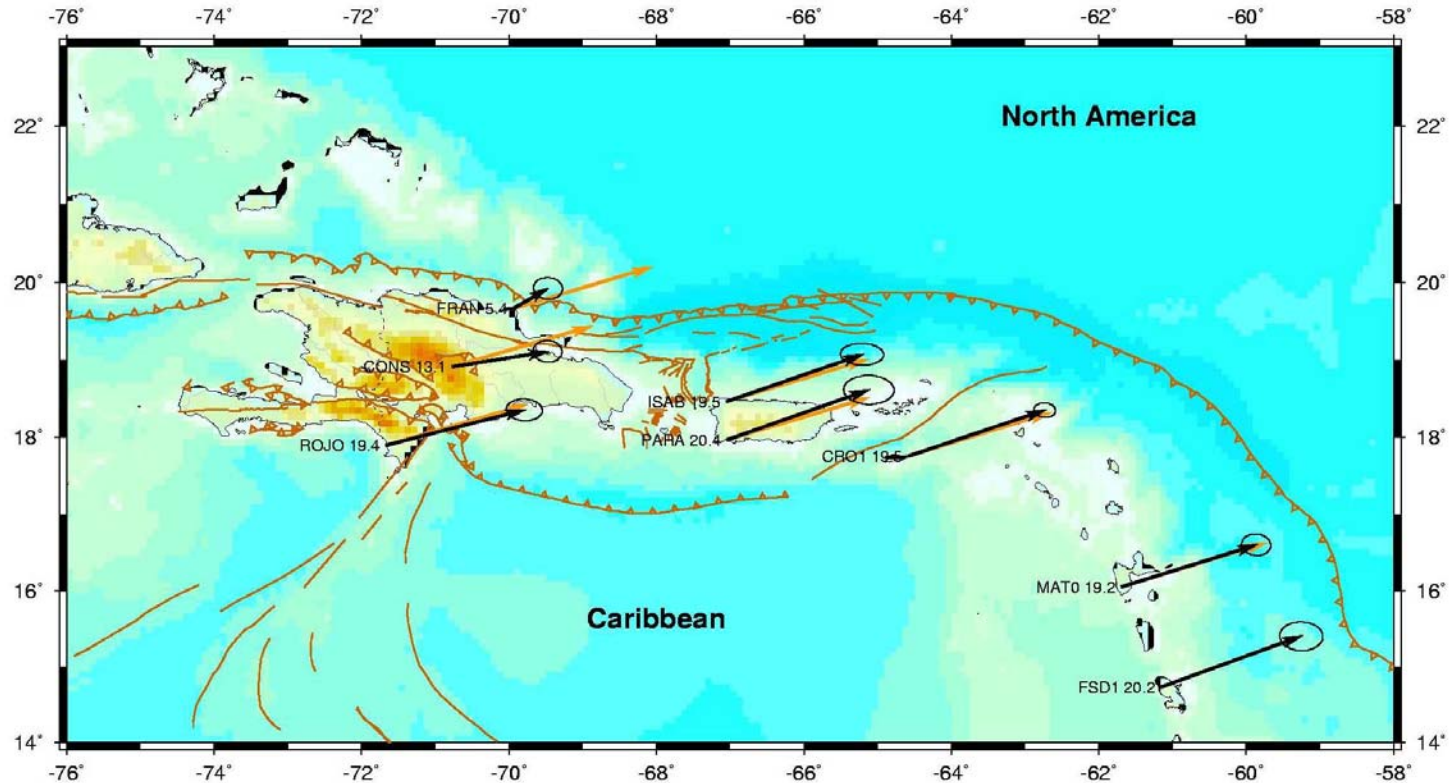
Topography, seismicity (PDE) and earthquake focal mechanisms ($M > 5$)

CMT (red), Molnar and Sykes 1969 (yellow), Perrot et al. 1998 (green)
Calais et al. 1992 (blue), Dolan and Wald 1998 (purple)

- Petites Antilles: forte sismicité, compression, séismes profonds
- Porto Rico + est RD: séismes profonds, parfois superficiels, combinaison avec décrochement
- RD + Haïti: décrochement, séismes superficiels seulement



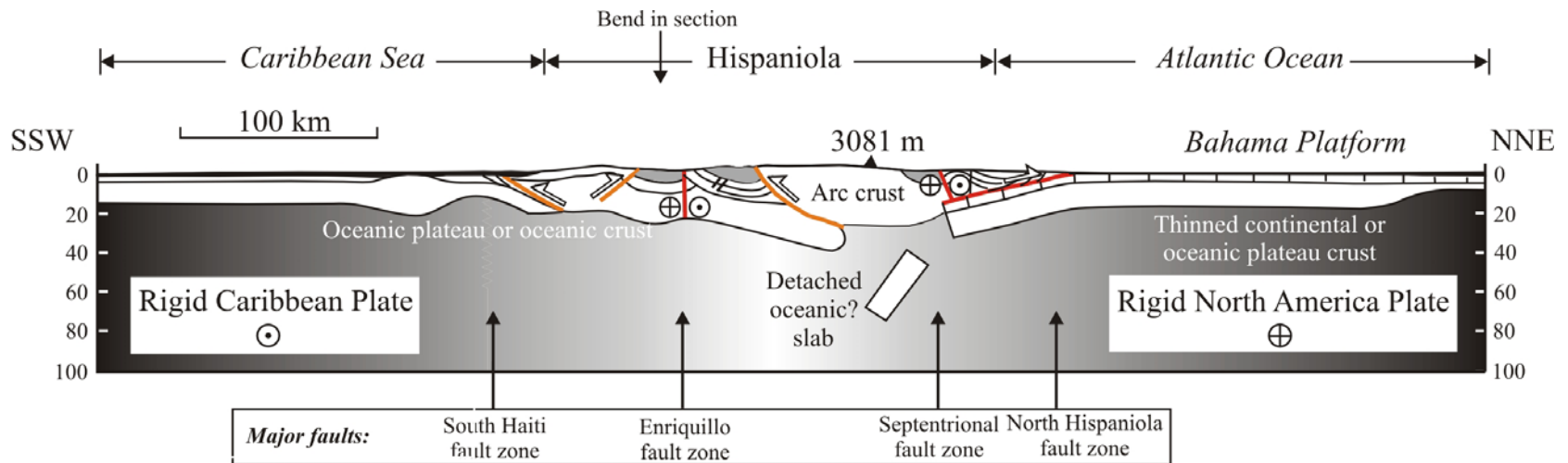
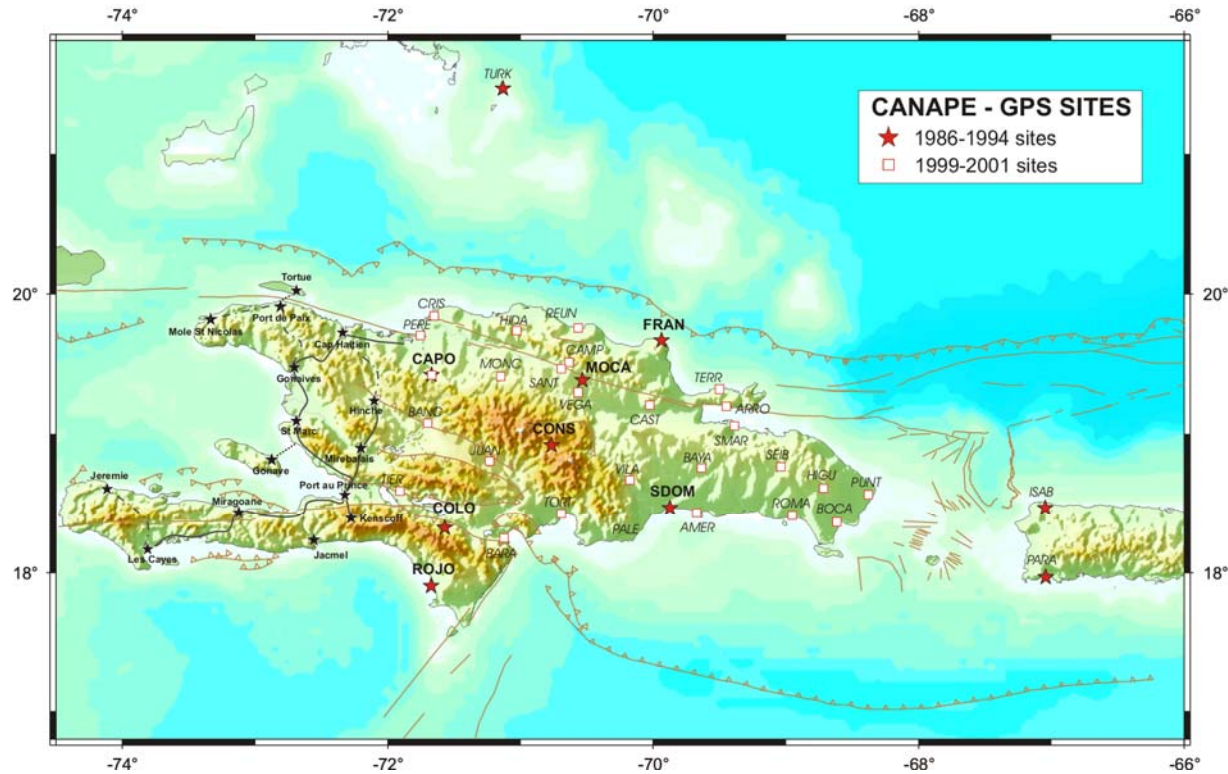
Un zoom sur le NE Caraïbe



- Les vitesses GPS montrent de la déformation au travers d'Hispaniola, différent de Porto Rico ou des Petites Antilles
- Comment et ou s'accommode cette déformation?

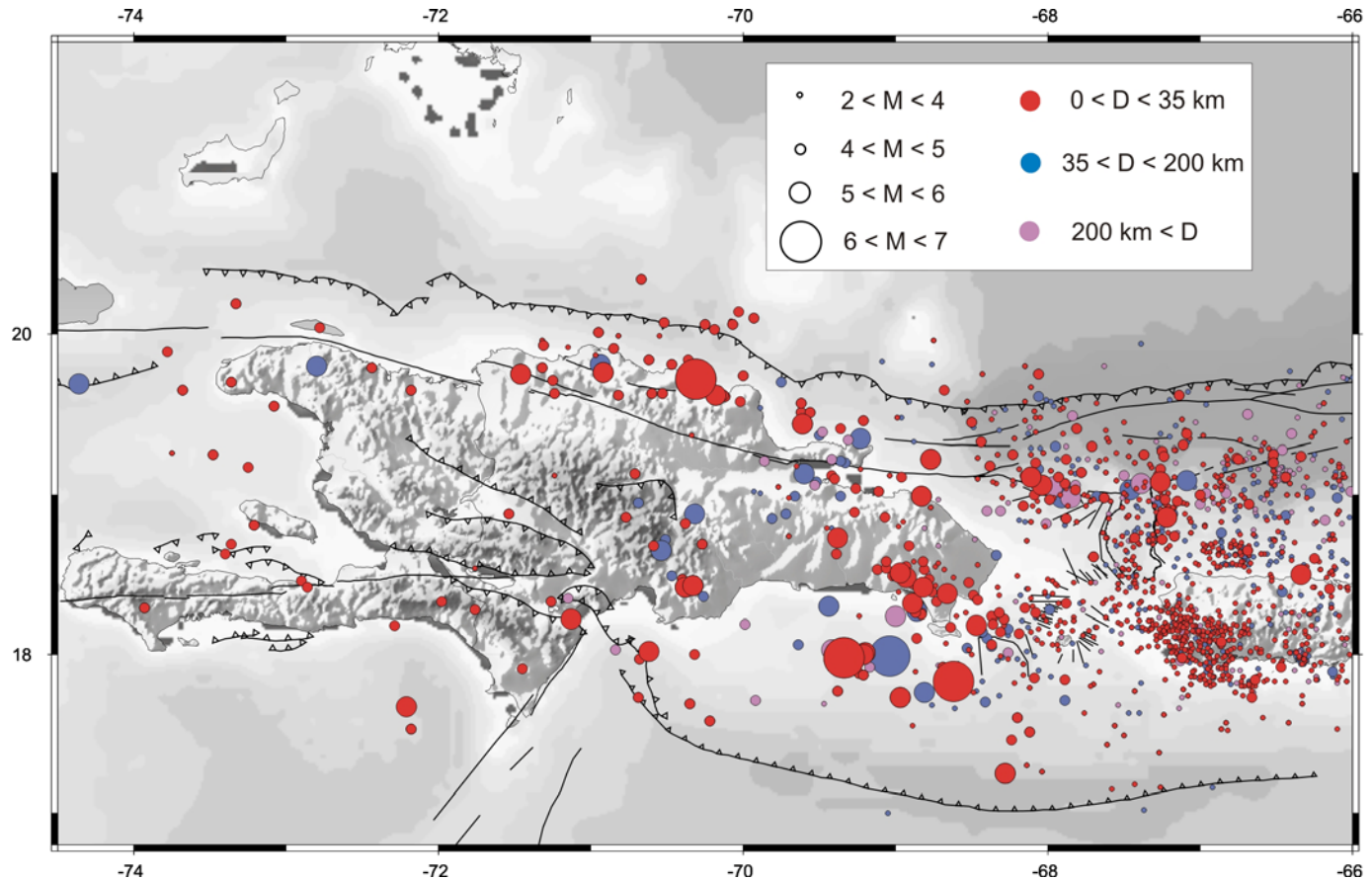
Hispaniola

- 3 zones de failles actives majeures
- D'autres failles, probablement moins actives mais très mal connues
- Comment sait-on qu'une faille est active? Sismicité, traces en surface



Sismicité instrumentale

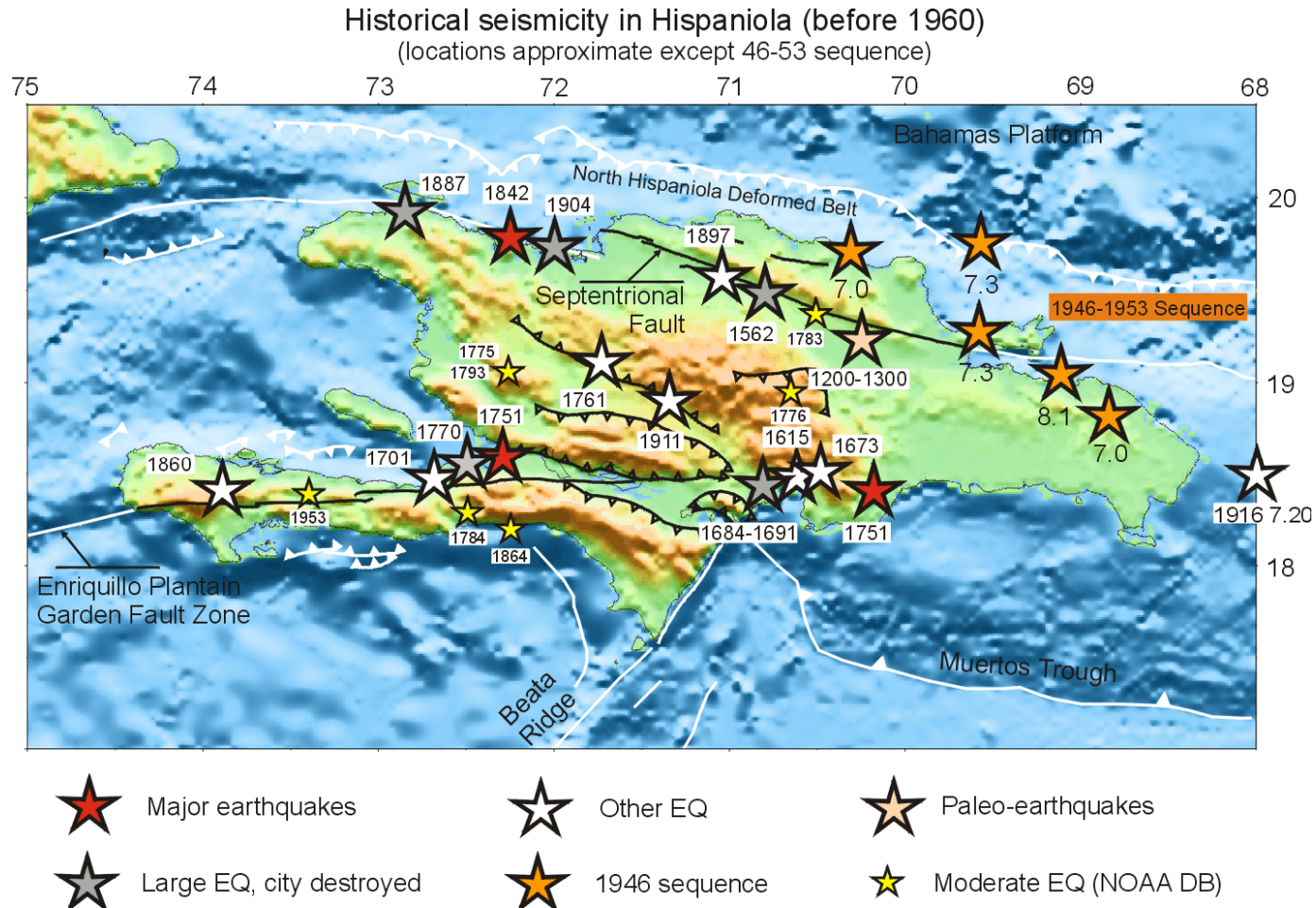
- Très mal connue, sauf pour les quelques rares séismes $> M5$
- Seul séisme majeur dans les 50 dernières années: nord-est République Dominicaine
- Problème: pas de réseau sismologique pour localiser les petits séismes régionaux...



Sismicité instrumentale, 1972-2002, catalogue NEIC (USGS)

Sismicité historique

- Des séismes historiques majeurs
- Effacés des mémoires en une génération...
- Il y a eu des gros séismes ⇒ il y aura de gros séismes
- Difficulté de localiser et quantifier les séismes historiques



Les failles actives

- Zoom sur la vallée du Cibao
- Trace d'une faille active visible dans la topographie = escarpement
- Tranchées au travers de cet escarpement \Rightarrow répétition de séismes, datation des séismes
- Analyse géomorphologique \Rightarrow vitesse de glissement moyenne sur la faille



La Presqu'île du Sud

Est

Frontiere

Ouest

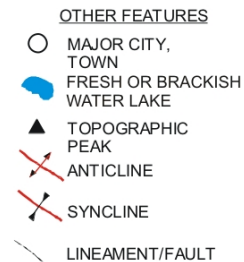
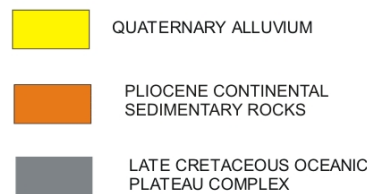
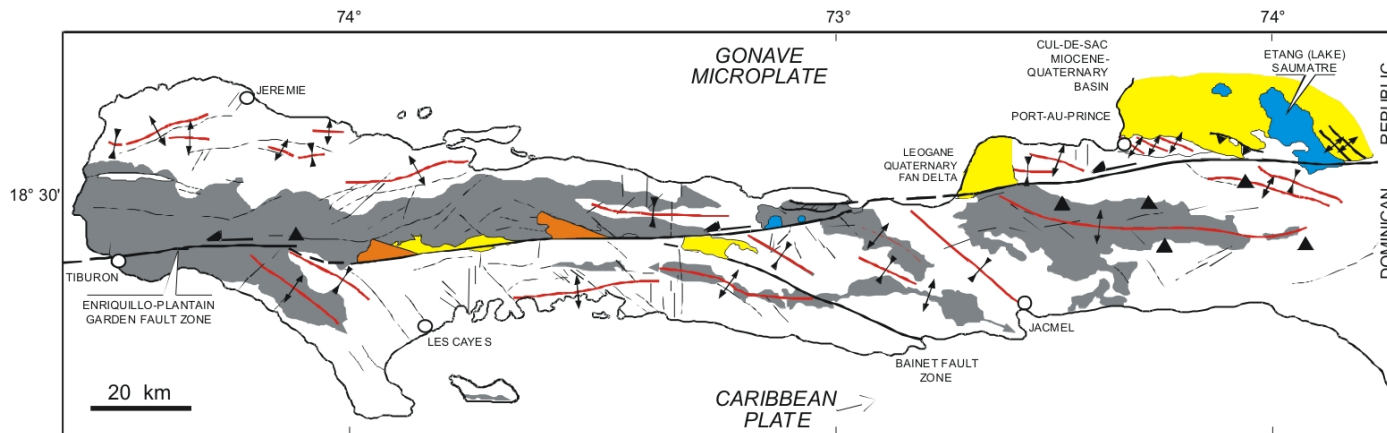
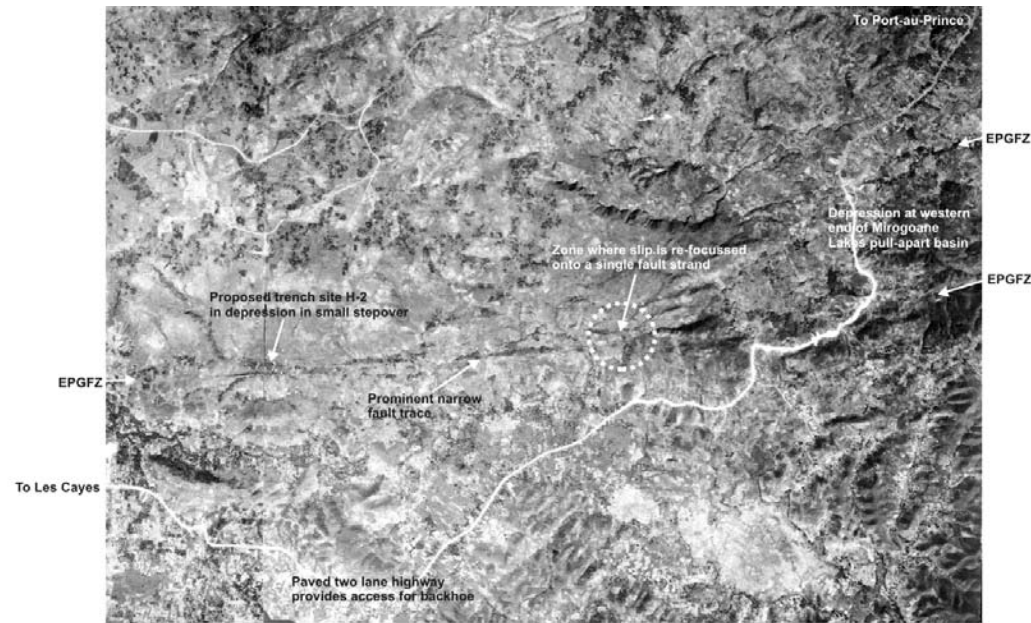
Port-au-Prince



- Vue depuis la faille d'Enriquillo
- Trace sub-continue dans la morphologie
- Se poursuit en continu jusqu'à Port-au-Prince
- Menace majeure, mais très mal connue:
 - Cartographie de détail?
 - Vitesse de glissement?
 - Paleosismicité?

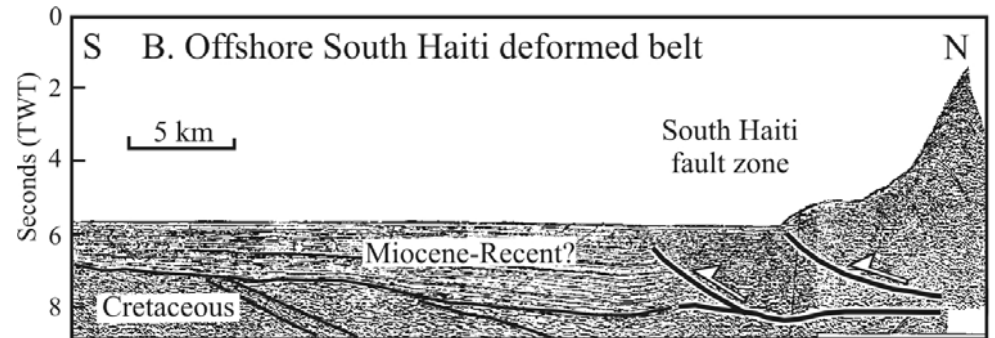
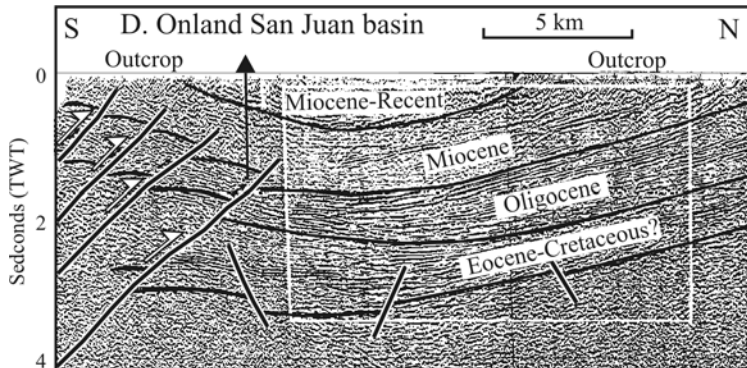
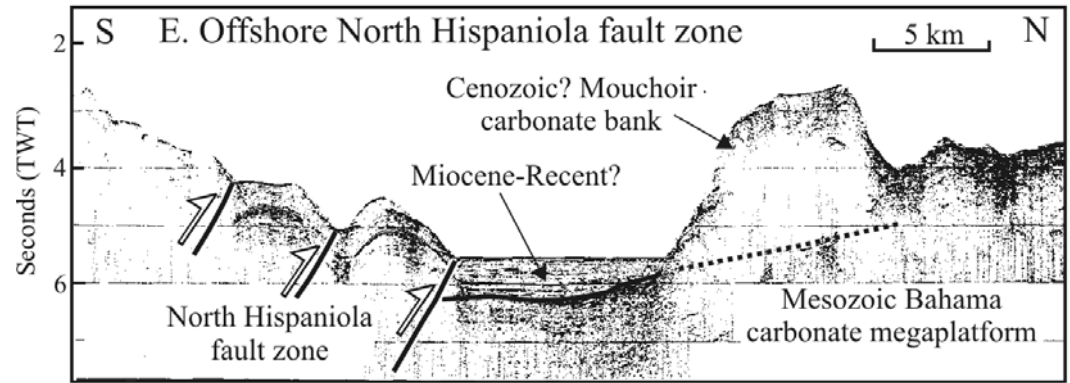
La Presqu'île du Sud

- Une zone de faille active majeure, visible à toutes les échelles
- Des opportunités pour étudier sa paleosismicité



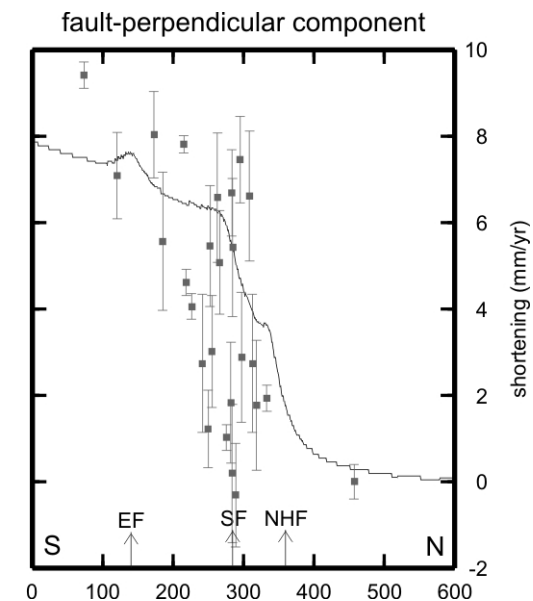
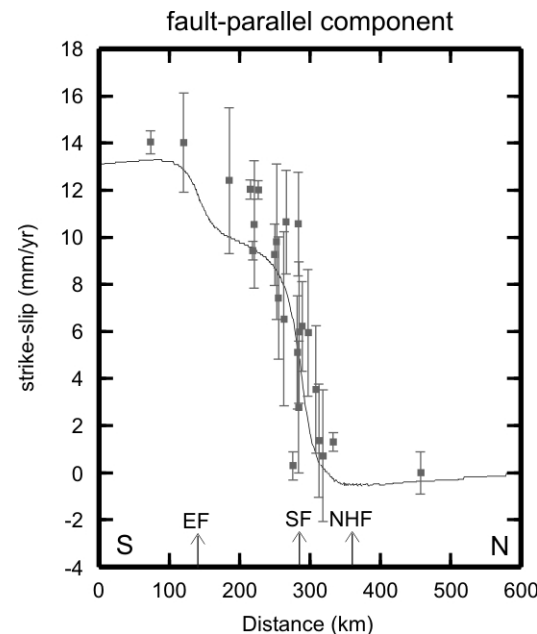
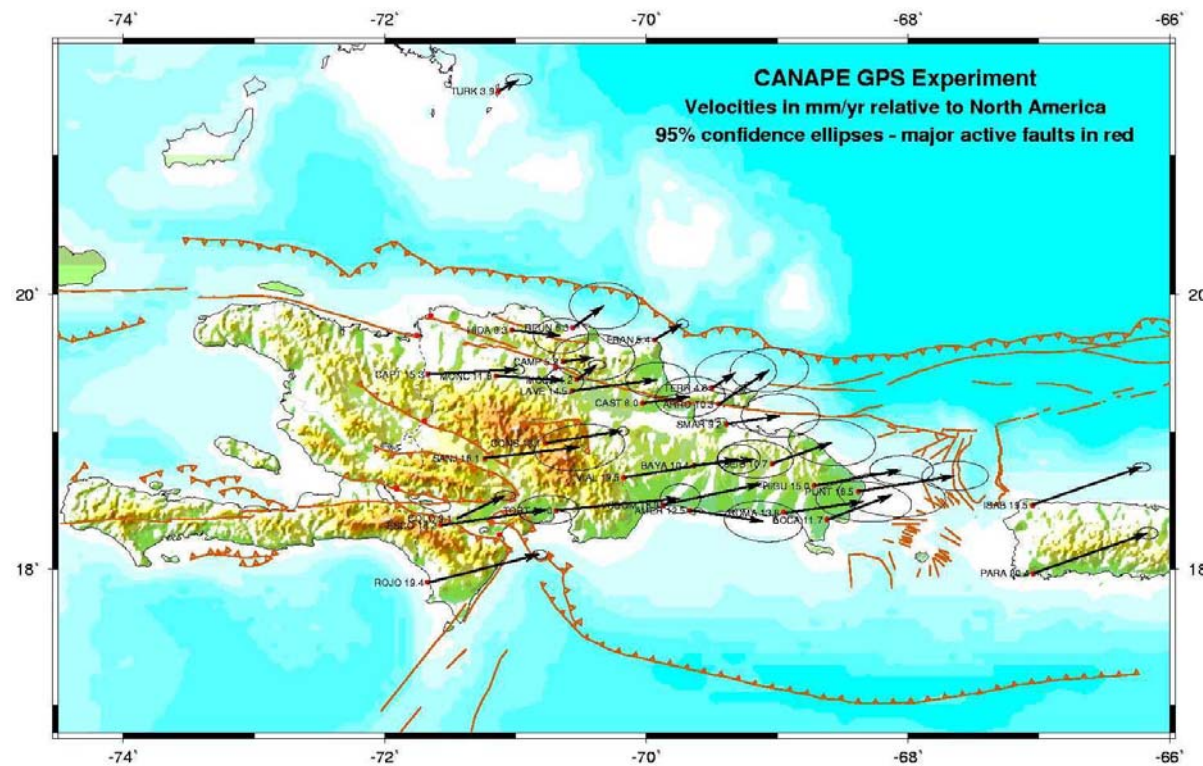
Les autres failles actives?

- Marge nord haïtienne
- Marges Nord et Sud de la Presqu'île du Sud
- Ailleurs...?



Les failles actives

- GPS \Rightarrow gradient de vitesse
- Pas de discontinuité au travers des failles actives \Rightarrow elles sont **bloquées**
- Mais déformation de part et d'autre: on peut montrer que cette déformation correspond à une **accumulation de déformation élastique**



Les failles actives

- Lors d'un séisme \Rightarrow déformation élastique accumulée est relâchée subitement
 - Déplacement le long d'un segment de faille, éventuellement rupture en surface: très probable pour les séismes en décrochement en Hispaniola
 - Émission d'ondes sismiques: se propagent dans toutes les directions, dépendent de la rupture, sont atténuées avec la distance de propagation, mais peuvent aussi être amplifiées
- On sait maintenant:
 - Mesurer le déplacement permanent du sol dû à un séisme
 - Modéliser ces propagations et donc le mouvement du sol associé



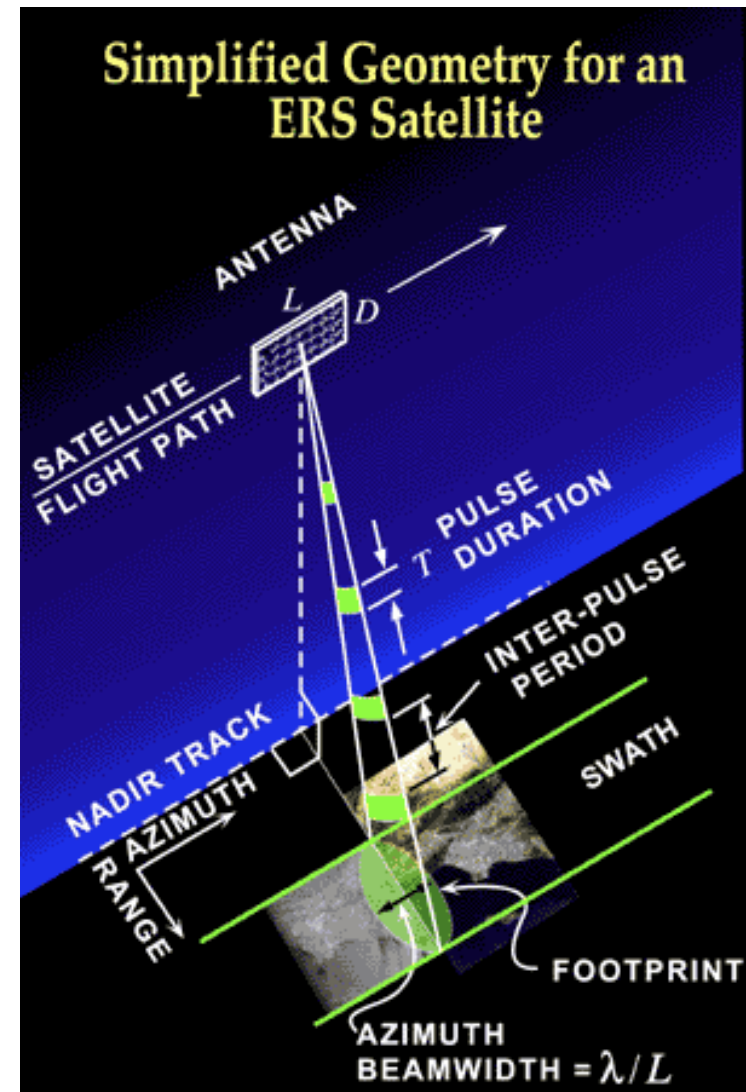
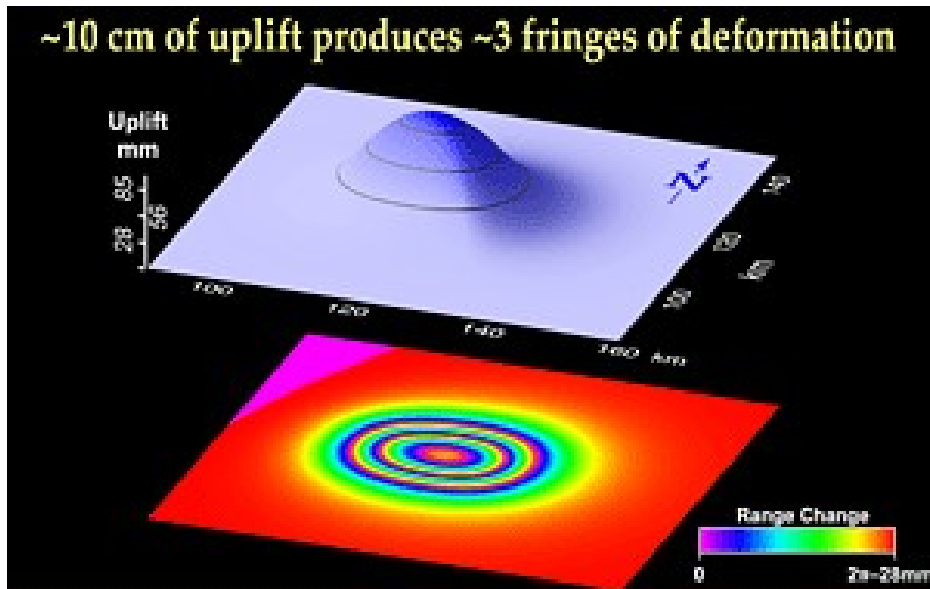
Taiwan, 1999, faille inverse



Turquie, 1999, faille décrochante

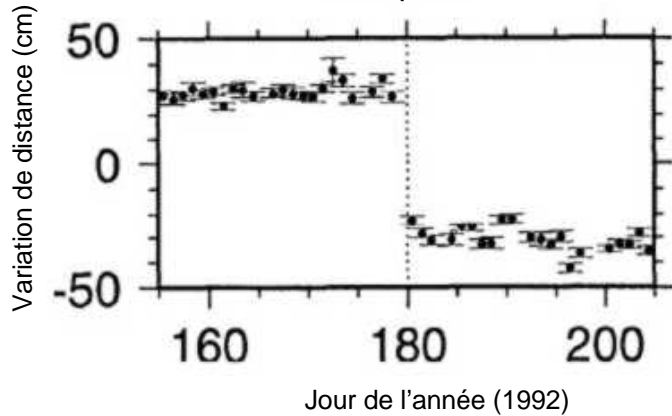
L'interférométrie radar

- Émission d'un signal radar par un satellite, réception par le même satellite
- Mesure du temps de trajet satellite-sol-satellite \Rightarrow distance sol-satellite.
- Comparaison de cette mesure de distance entre avant et après un séisme \Rightarrow mesure du mouvement ("statique") du sol dû au séisme
- Cartographie précise de la déformation co-sismique
- Limitations: mesure 1-D, végétation et relief.

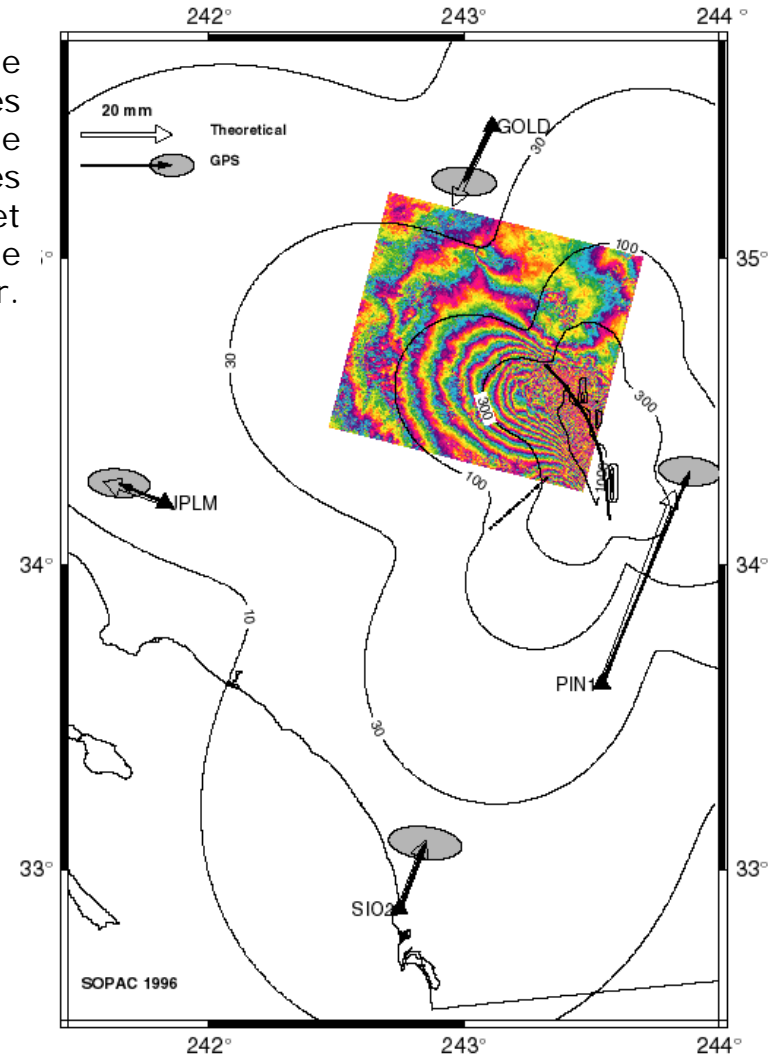


Un exemple d'approche intégrée en Californie: Landers, $M=7.2$, juin 1992

Variation de la distance GOLD-PIN1 mesurée par GPS

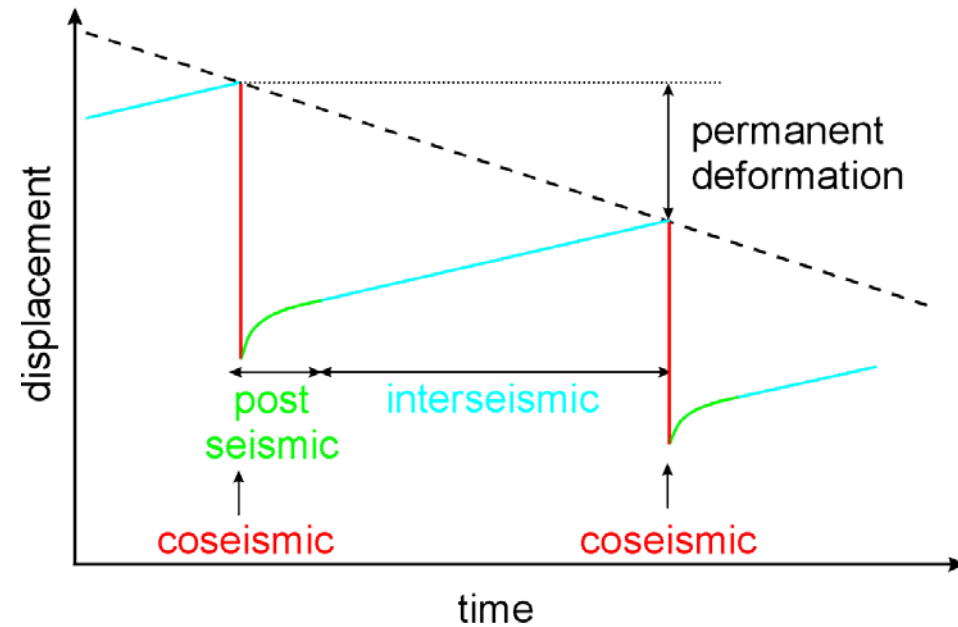
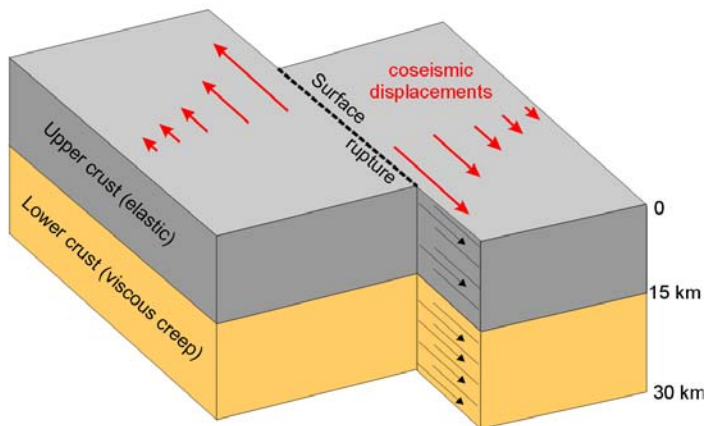
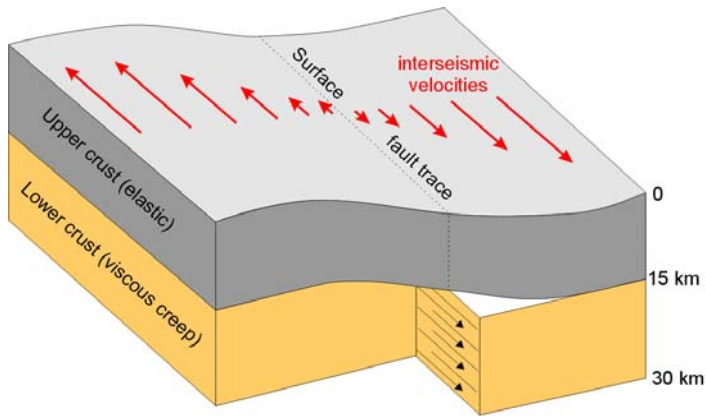


Déplacements de surfaces causés par le séisme de Landers mesurés par GPS et interférométrie radar.



Décalage cosismique d'une route causé par la rupture de Landers

Le cycle sismique



Les observations actuelles montrent que:

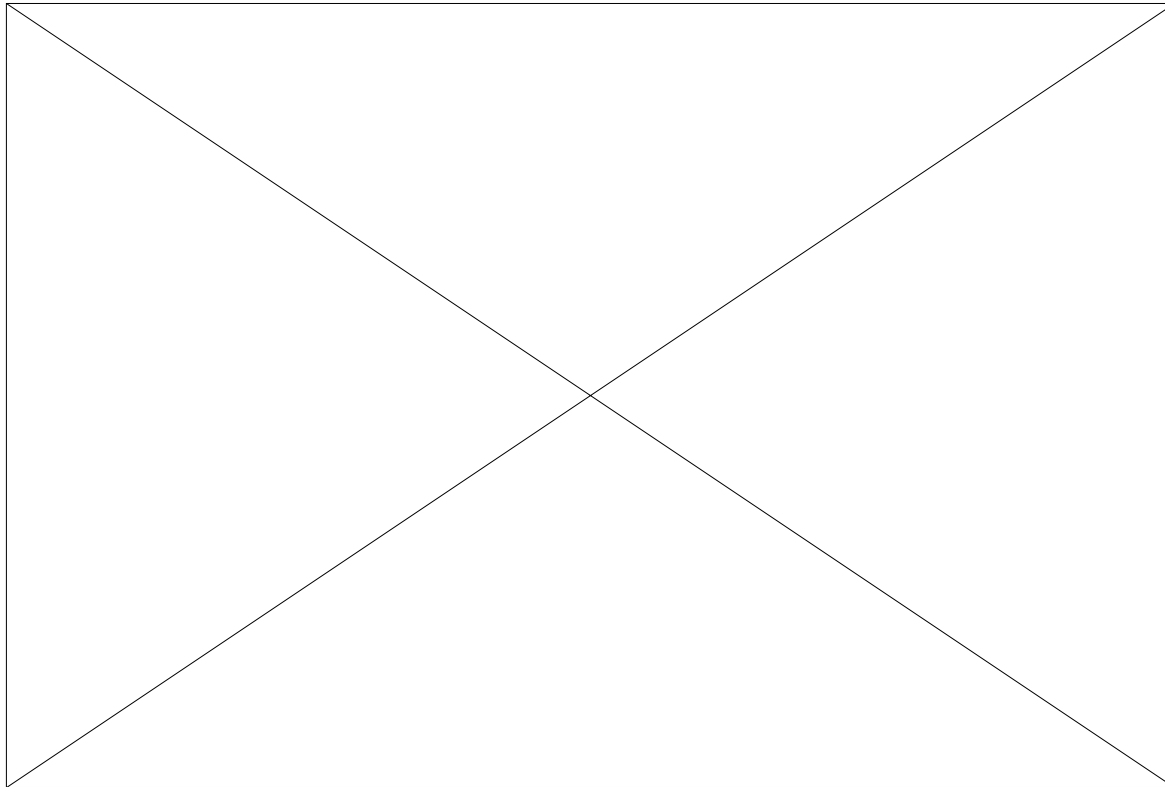
- Entre les séismes:
 - Failles actives bloquées
 - Région ~ 100 km autour de ces failles accumulent de la déformation élastique
- Pendant un séisme:
 - Glissement "instantané" sur un segment de faille
 - Relâchement de la déformation élastique accumulée
- Après un séisme:
 - Modification des contraintes autour de la rupture \Rightarrow répliques
 - Éventuellement: déformation post-sismique

Interactions entre failles

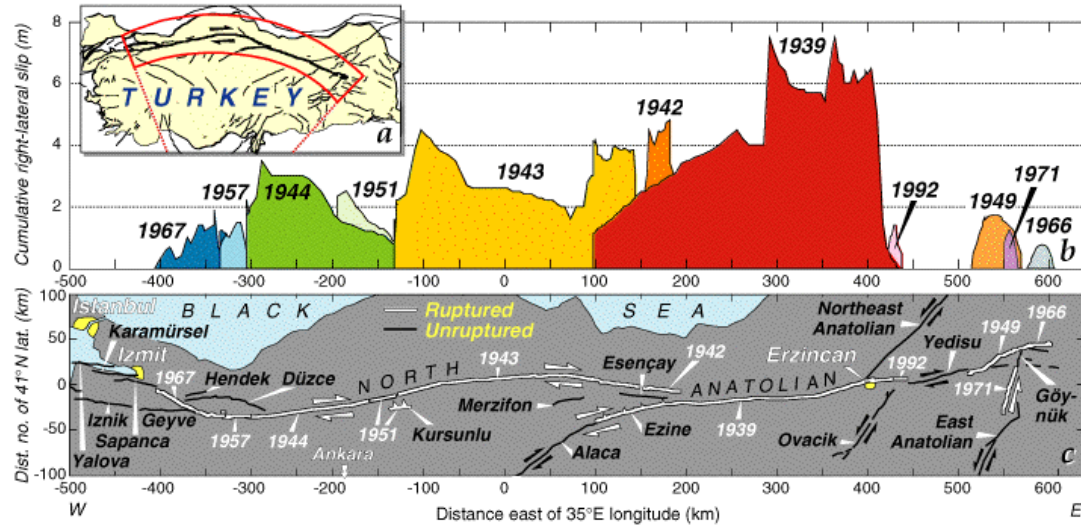
- Pourquoi les failles ne glissent-elles pas en continu? \Rightarrow friction \Rightarrow résistance au mouvement
- Comment déclencher un séisme?
 - En réduisant la friction
 - En augmentant la contrainte cisailante
 - En diminuant la contrainte normale \Rightarrow Notion de contrainte de Coulomb: $\sigma_c = \tau + \mu' \sigma_n$
 - μ' = coefficient de friction apparent
 - τ et σ_n = contraintes cisailante et normale
- Variations de contrainte de Coulomb:
 $\Delta\sigma_c = \Delta\tau + \mu' \Delta\sigma_n$
 - Positive \Rightarrow rupture favorisée
 - Négative \Rightarrow rupture défavorisée

Interactions entre failles

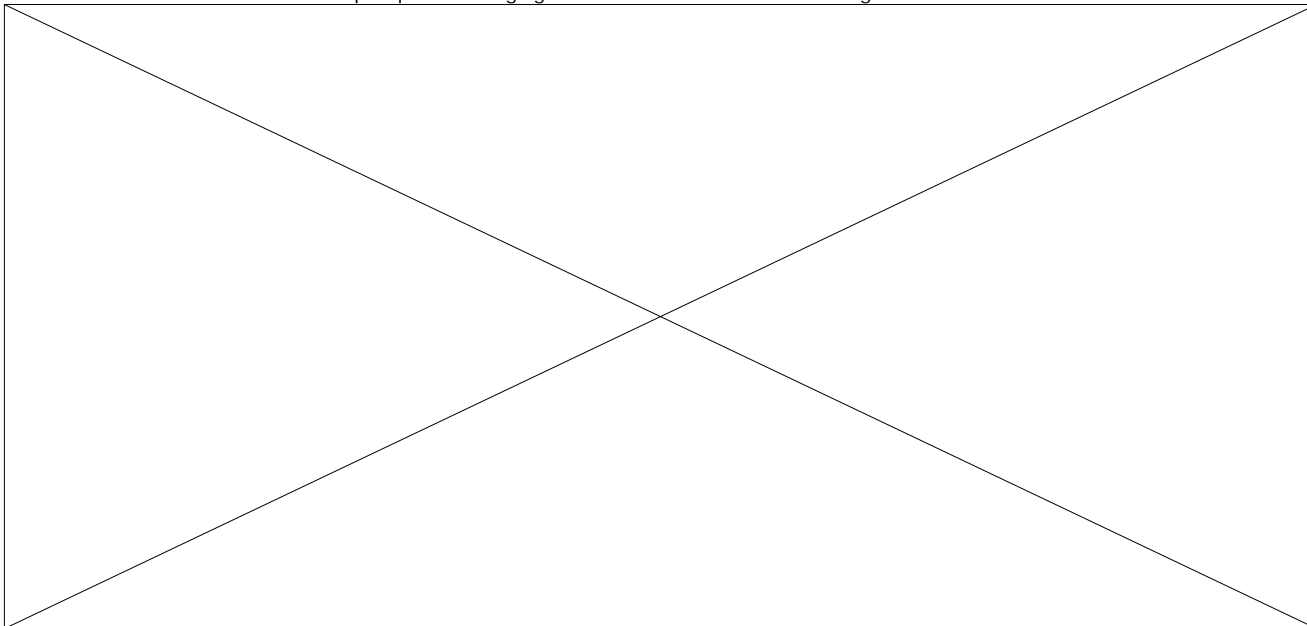
- Séisme \Rightarrow modification des contraintes autour de la rupture \Rightarrow le glissement est favorisé sur certaines failles, défavorisé sur d'autres
- Transfert de contrainte: statique, post-sismique
- Modèle validé en Turquie (faille Nord Anatolienne)
- L'occurrence d'un séisme dépend aussi des autres séismes dans la région (<http://quake.wr.usgs.gov/research/deformation/modeling/animations/>)



Interactions entre failles

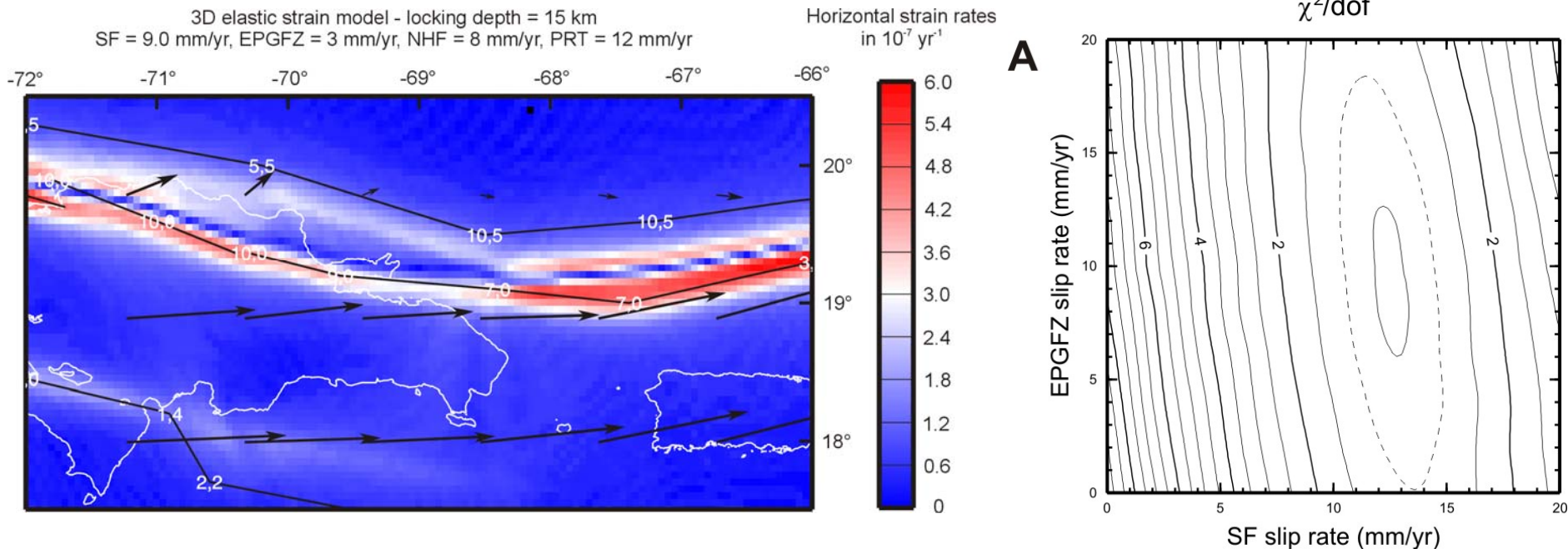


<http://quake.wr.usgs.gov/research/deformation/modeling/animations/>



Une application en RD

- Mesures GPS en République Dominicaine \Rightarrow accumulation de déformation élastique sur la faille Septentrionale
- Comparaison avec paléosismologie:
 - Dernier séisme 770-960 ans, récurrence \sim 800-1200 ans \Rightarrow Phase terminale du cycle sismique?
 - Vitesse de glissement = 13 mm/an \Rightarrow déficit de glissement 7.9 a 14.7 m depuis le dernier séisme majeur
 - Correspond a un séisme de $M_w=7.7$ à 7.9 si la totalité de ce déficit était relâché aujourd'hui en un seul séisme.
- Incertitude pour la faille de la Presqu'île du Sud = 100% (9 ± 9 mm/an)



Bilan

- Connu:
 - Vitesse relative des plaques Caraïbe-Amérique du Nord
 - Sismicité historique: il existe des failles capables de magnitudes 7.5 à 8 en Haïti
 - Principales failles sismogènes: Presqu'île du Sud, marge nord d'Haïti
 - République Dominicaine:
 - Faille Septentrionale ~12 mm/an, récurrence 800-1200 ans
 - Marge nord ~5 mm/an
- Inconnu:
 - Distribution spatiale et temporelle de la sismicité actuelle
 - Historique des séismes sur 10 000 ans ou plus
 - Vitesse de glissement sur les principales failles sismogènes
 - Cartographie détaillée des failles actives
 - Distribution spatiale de l'accumulation de déformation élastique
 - Interactions entre failles
- Besoins de "premier ordre":
 - Étude morphotectonique et paléosismologique
 - Réseau sismologique
 - Mesures géodésiques

Conclusions

- Il y eu des séismes majeurs, il y aura des séismes majeurs
- Des solutions existent pour prendre en compte la menace sismique.
- Des données géologiques, tectoniques, sismologiques et géodésiques quantitatives sont la base fondamentale de toute analyse d'aléa sismique.
 - En Haïti, très peu d'informations quantitatives sur la déformation active.
 - Une des urgences est de commencer l'acquisition systématique de ces données.
- Des techniques modernes existent: GPS, INSAR, paléosismologie, modélisation numérique, il faut les utiliser
- Des concepts modernes se développent: cycle sismique, transfert de contrainte, il faut les utiliser.