



**Cinématique du Nord de l'Amérique Centrale,  
zone de jonction triple Cocos-Caraïbe-Amérique du  
Nord**

**Apport des données sismologiques et géodésiques aux modèles régionaux**

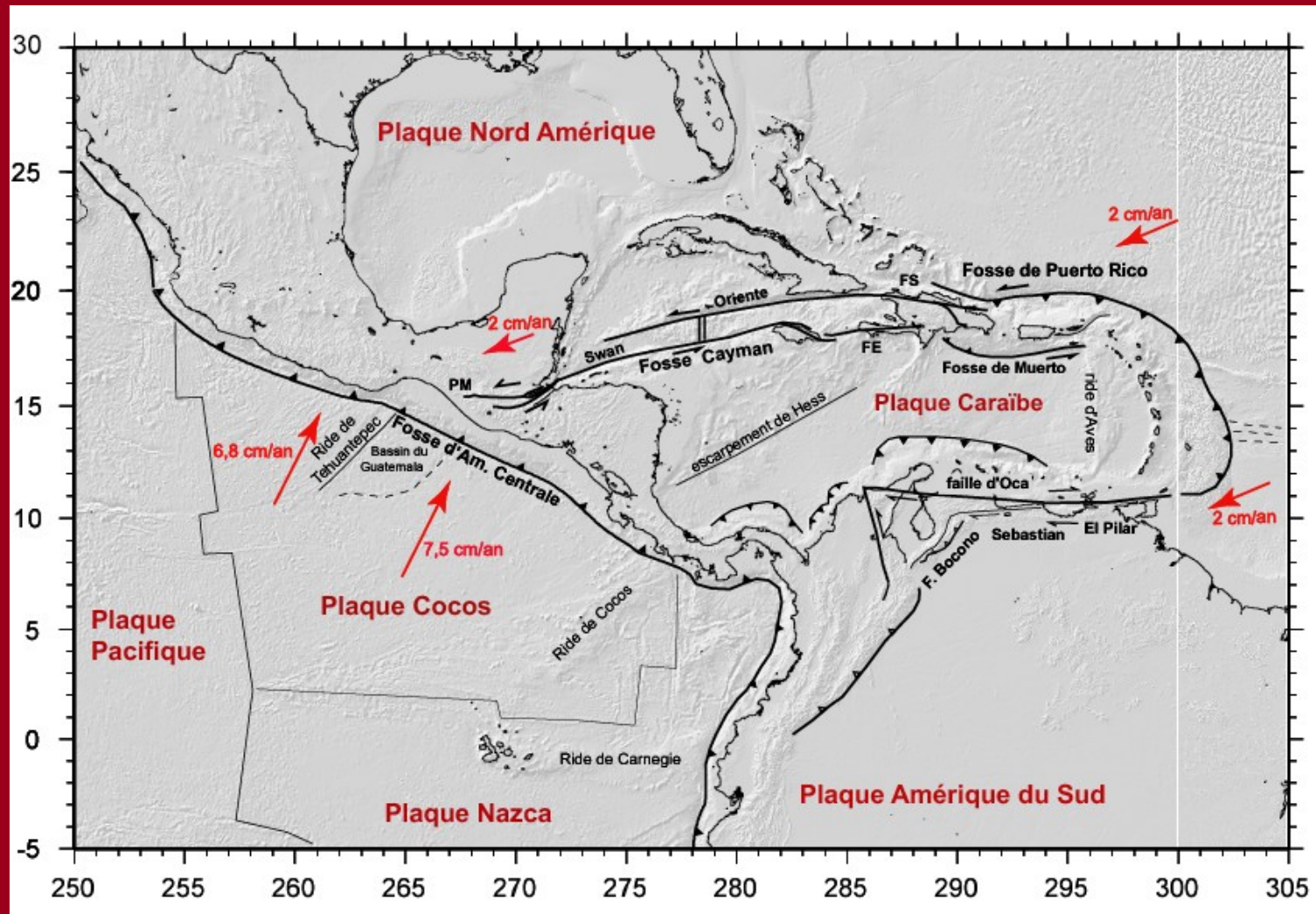
**Aurore Franco**

*Hélène LYON-CAEN, Cécile LASSERRE*

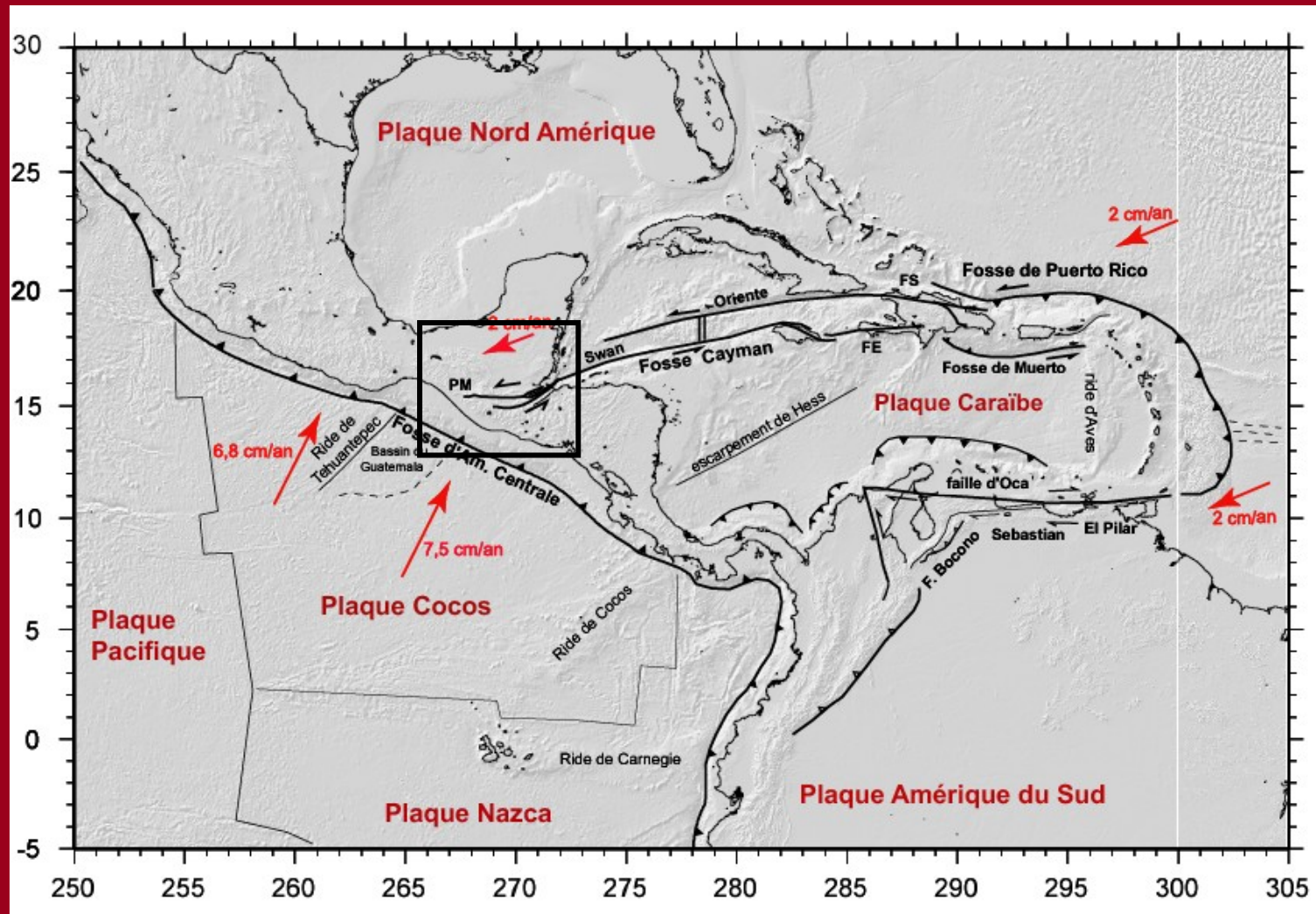
Laboratoire de Géologie-ENS

**ENS-19 Septembre 2008**

# Le domaine Caraïbe



# Le domaine Caraïbe



# La jonction triple Cocos-Caraïbe-Amérique du Nord

## Les grandes structures:

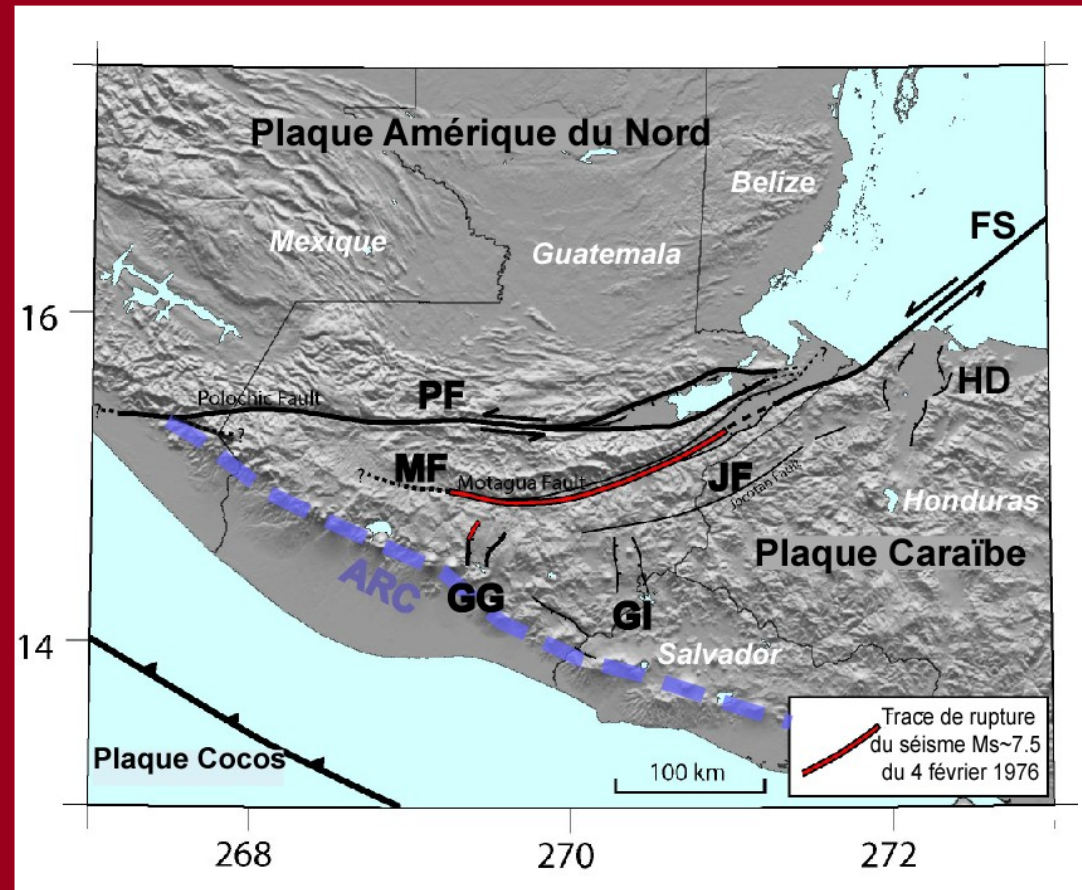
- 3 failles décrochantes: Polochic, Motagua, Jocotan, associées à de grands séismes historiques:

-Polochic: 1816 Mw = 7,5

-Motagua: 1976 Mw = 7,5

- Grabens Nord-Sud

- Arc volcanique



# Les grandes questions et objectifs de l'étude

- **Cinématique régionale**

- Variation de la vitesse relative NA/CA à l'abord de la jonction triple?

- **Contributions relatives des différentes structures dans l'accommodation de la déformation?**

- **Couplage le long de la subduction**

- **Comportement court terme des failles:**

- Vitesse de glissement, profondeur de blocage des failles, fluage éventuel, activité sismique actuelle?

- **Structure en profondeur du système de failles: épaisseur crustale, connection des failles en profondeur**

➤ *Géodésie GPS et sismologie*

# Plan

## 1- Activité sismique et structure

- Sismicité actuelle du système de failles Polochic-Motagua
- Structure en profondeur par fonctions récepteur  
(*moho, géométrie, variations latérales*)

## 2- Cinématique actuelle de la zone de jonction triple

- Analyse du Champ de vitesse en relation avec les différentes structures  
(*failles de Polochic, de Motagua, zone d'extension...*)
- Modèle régional

## 3- Conclusions

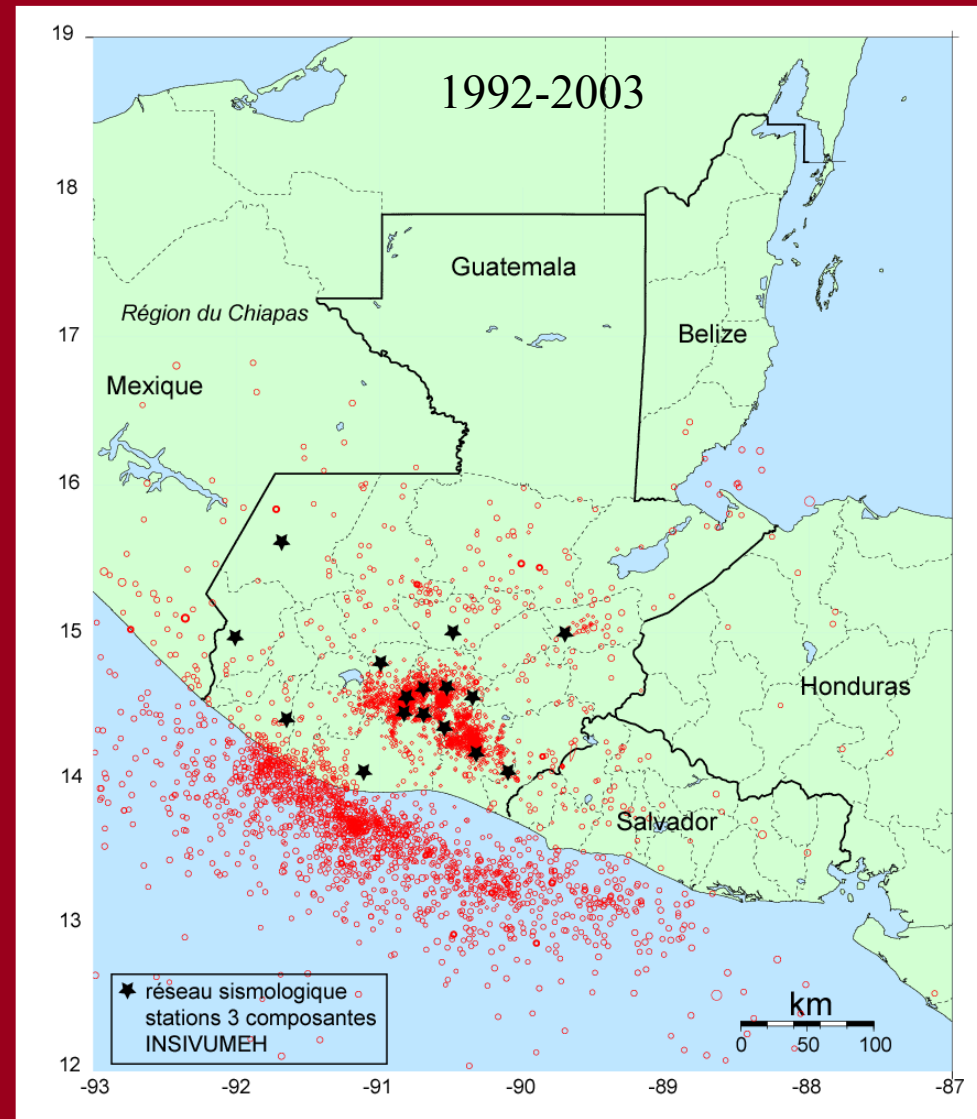
## 4- Perspectives

# Réseau sismologique guatémaltèque

➤ Surveillance des volcans actifs

➤ Sismicité superficielle enregistrée par le réseau local est issue de la subduction ou des volcans

⇒ Réseau ne permet pas d'appréhender l'activité sismique du système de failles Polochic-Motagua



# Objectifs de l'étude sismologique

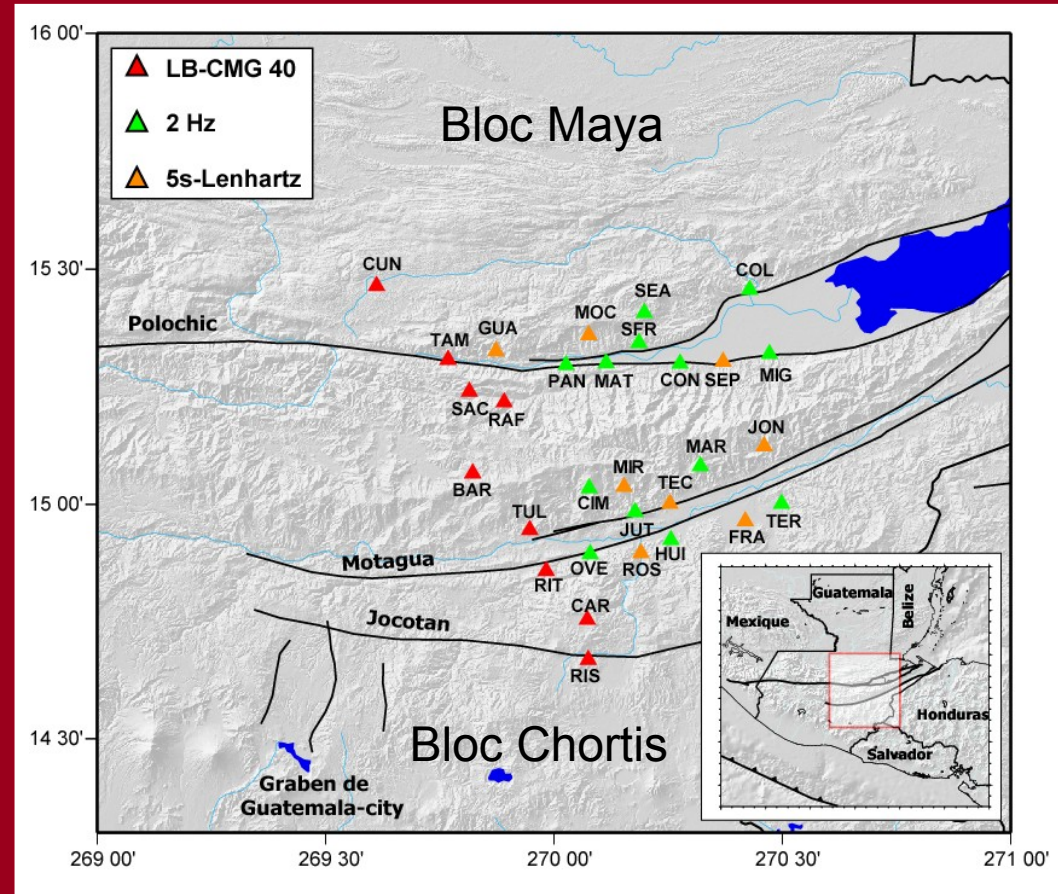
## Le réseau franco-guatemaltèque:

6 mois (Janvier-Juin 2005)

30 stations autour des failles Polochic-Motagua

1) Microsismicité

2) Structure (large bande, 5s) en relation avec l'histoire géologique





# Les données: séismes locaux

- Constat:

- Sismicité faible (~500 séismes détectés)

- Problèmes rencontrés:

- base de temps

- fonctionnement des stations

- sites, climat

- vols, vandalisme, ...

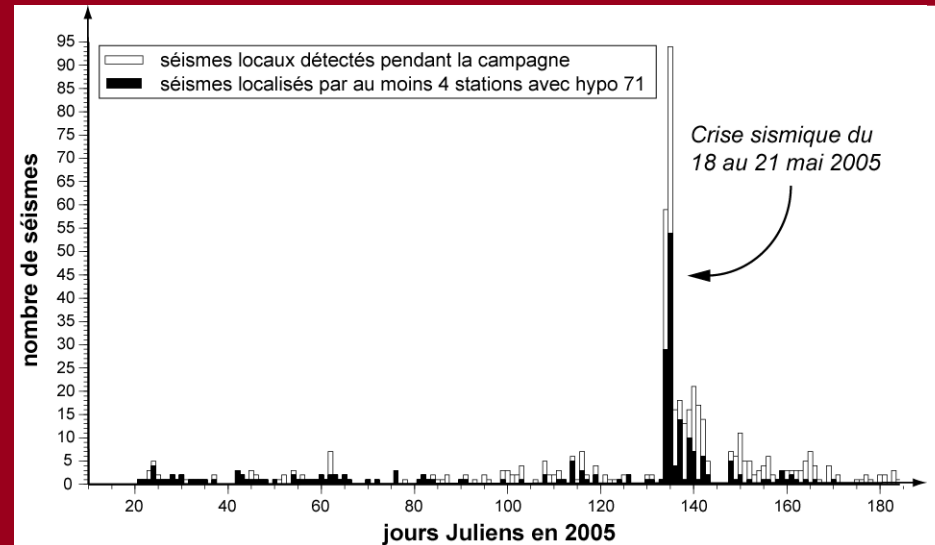
- Localisation:

- Classe 1:  $\Delta H \leq 2 \text{ km}$   $\Delta Z \leq 2 \text{ km}$

~ 50 séismes

- Classe 2:  $\Delta H \leq 5 \text{ km}$   $\Delta Z \leq 5 \text{ km}$

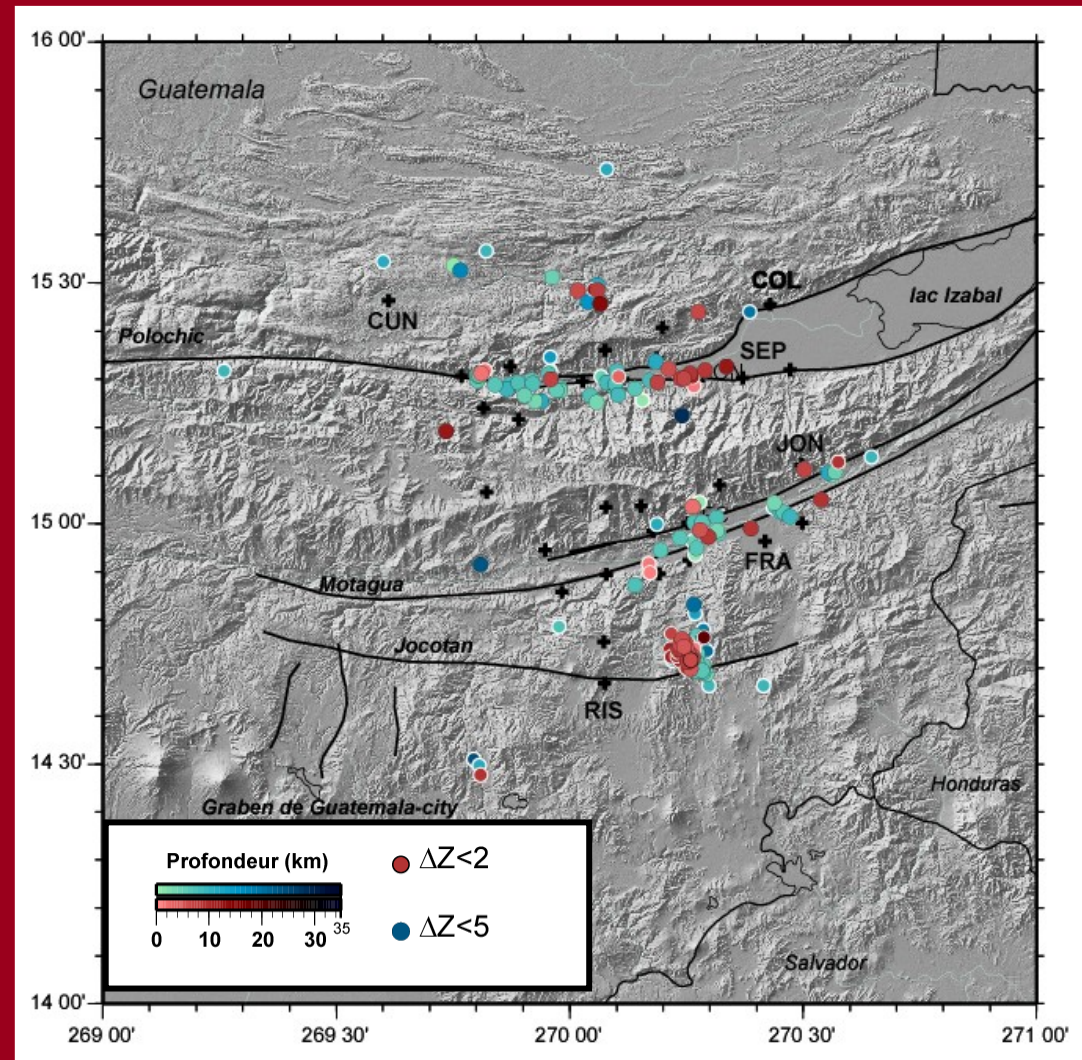
~ 200 séismes



# Répartition de la microsismicité

## Magnitude supérieure à 2

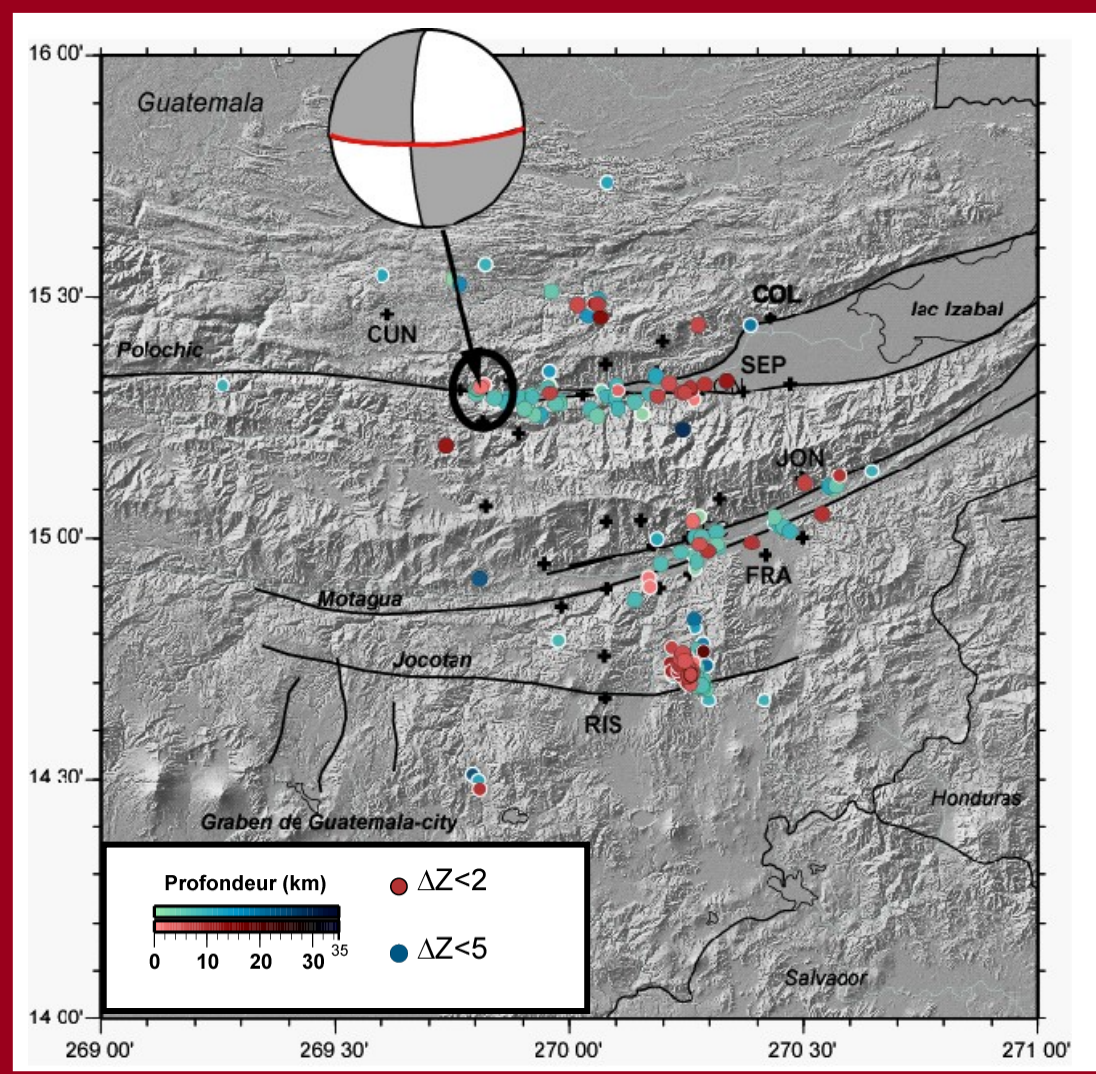
- Sismicité superficielle
- Localisée sur les failles de Motagua et de Polochic



# Répartition de la microsismicité

## Magnitude supérieure à 2

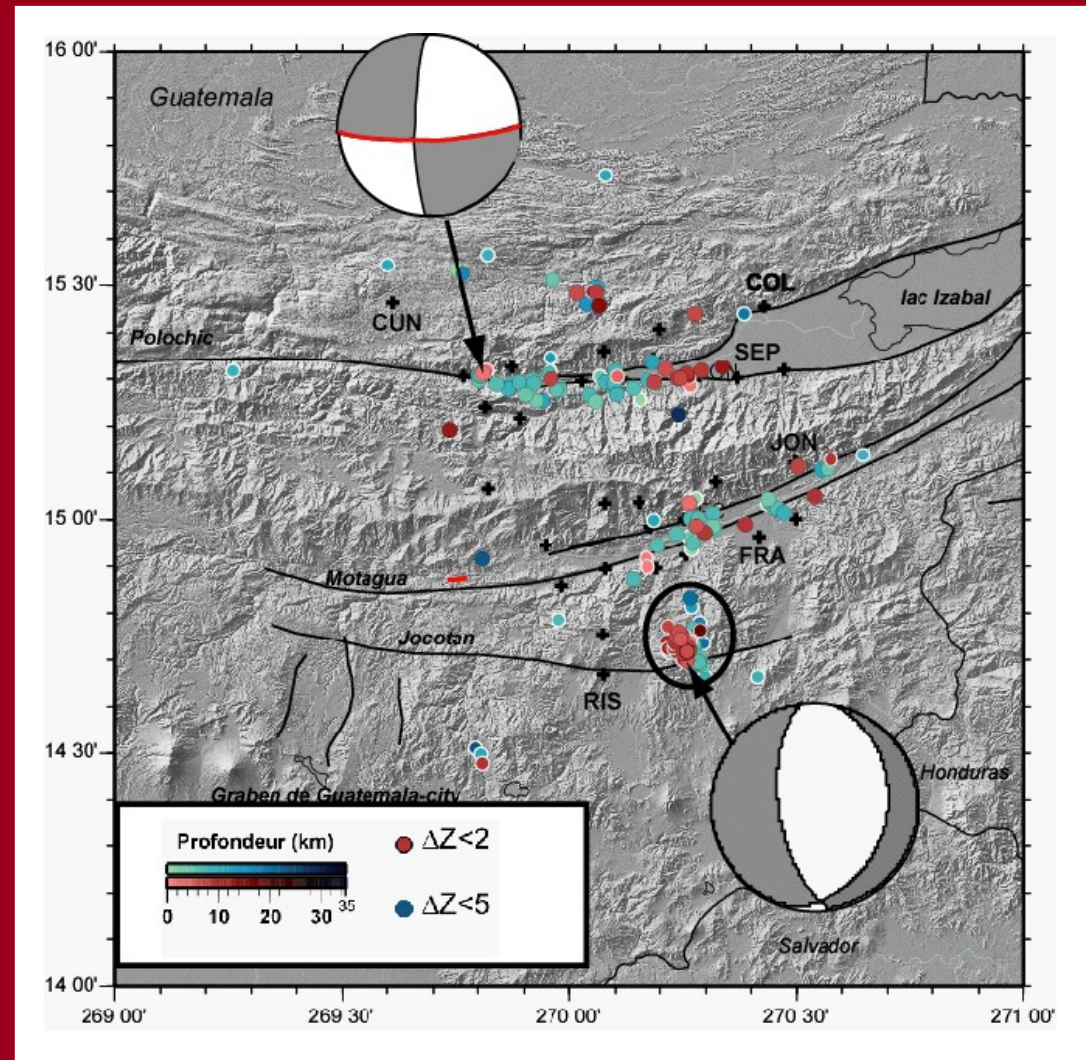
- Sismicité superficielle
- Localisée sur les failles de Motagua et de Polochic
- 1 séisme  $M_w=4,3$  suivi de quelques répliques



# Répartition de la microsismicité

## Magnitude supérieure à 2

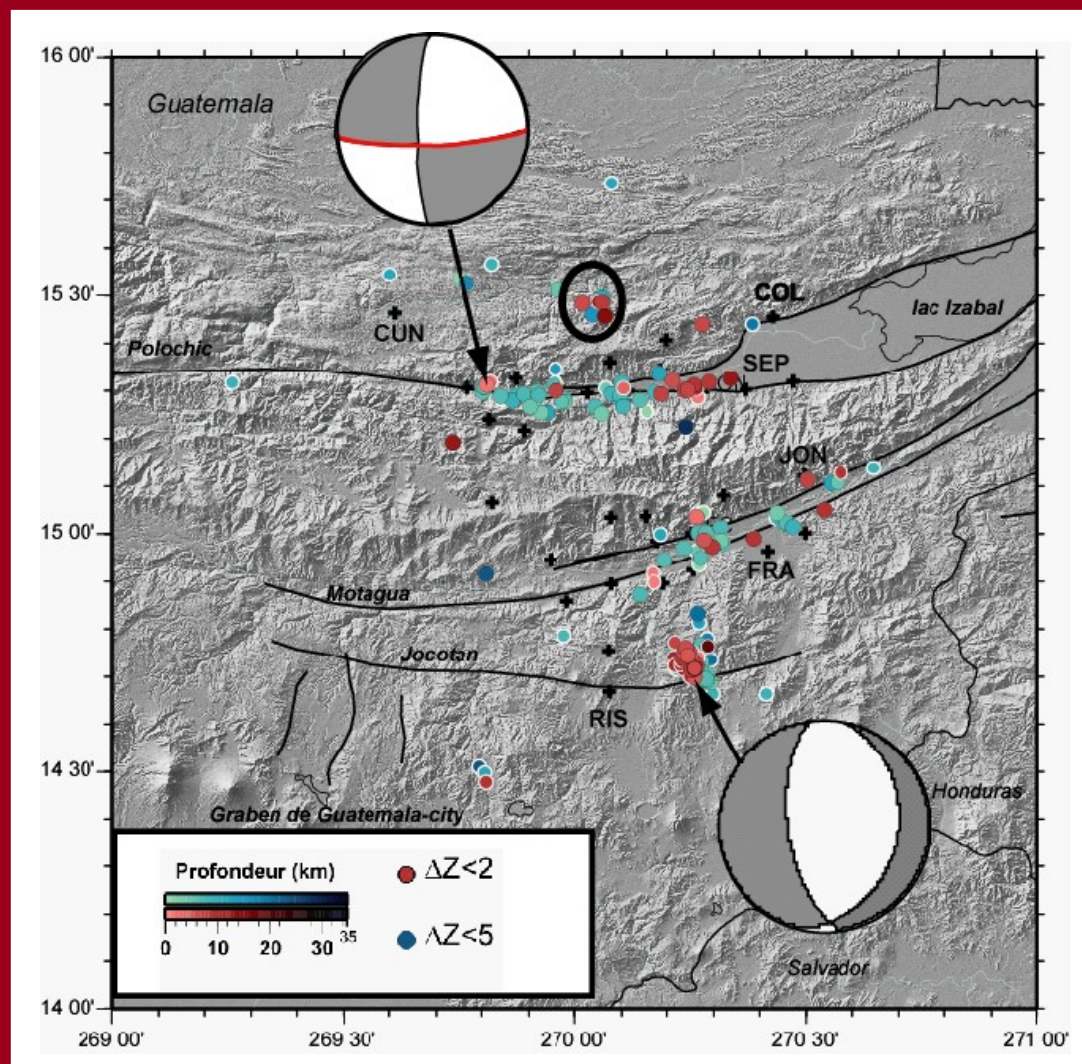
- Sismicité superficielle
- Localisée sur les failles de Motagua et de Polochic
- 1 séisme  $M_w=4,3$  suivi de quelques répliques
- Essaim au Sud
- crise sismique de plus de 200 répliques
- évènement principal  $M_w \sim 5$



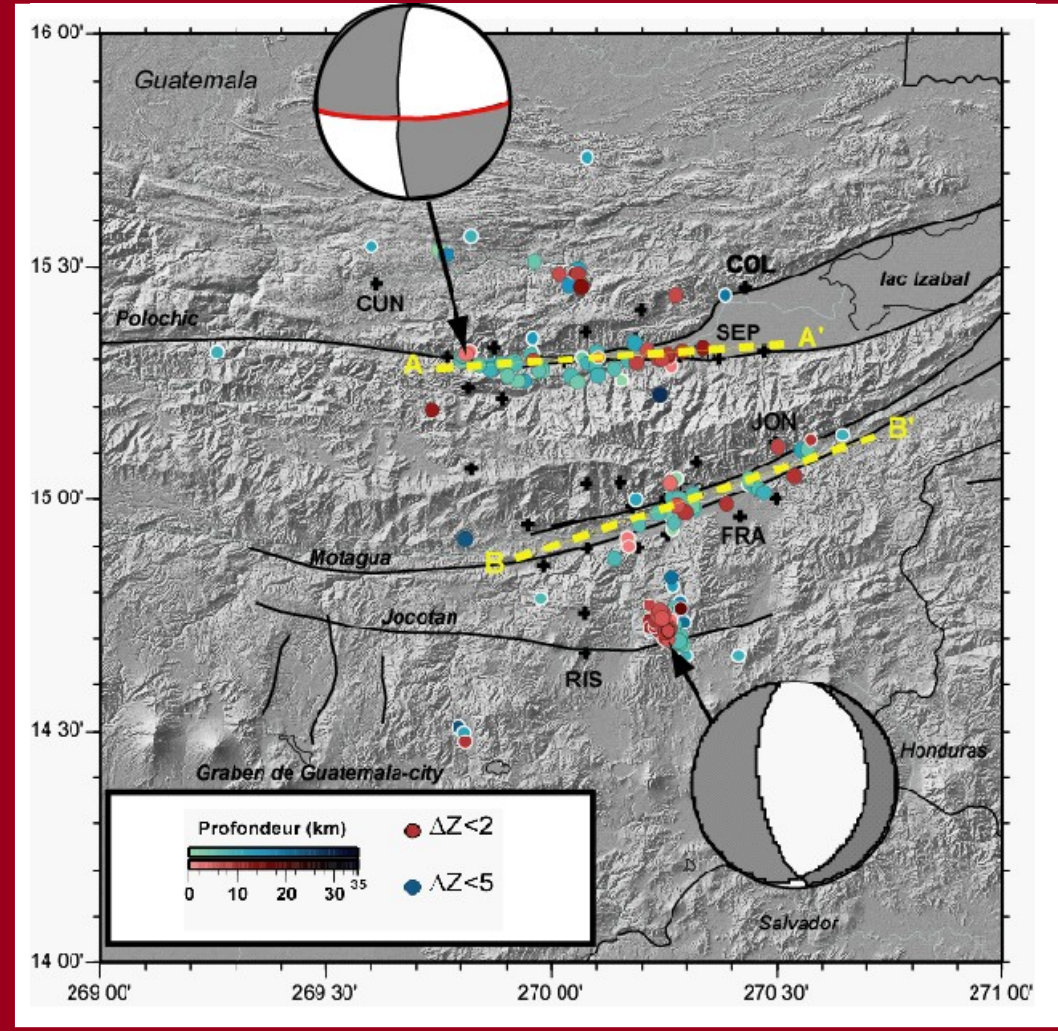
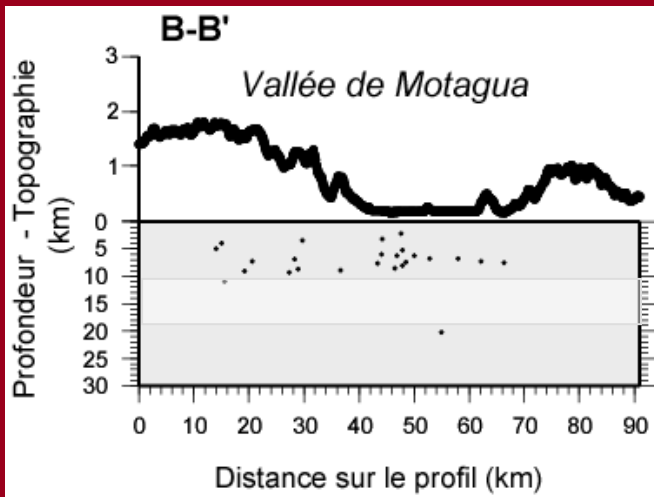
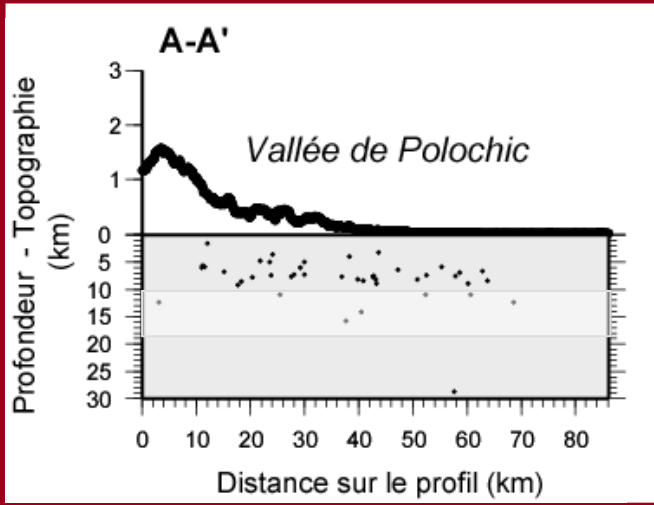
# Répartition de la microsismicité

## Magnitude supérieure à 2

- Sismicité superficielle
- Localisée sur les failles de Motagua et de Polochic  
1 séisme  $M_w=4,3$  suivi de quelques répliques
- Essaim au Sud  
crise sismique de plus de 200 répliques  
évènement principal  $M_w \sim 5$
- Groupe de séismes au Nord dans une zone de plis

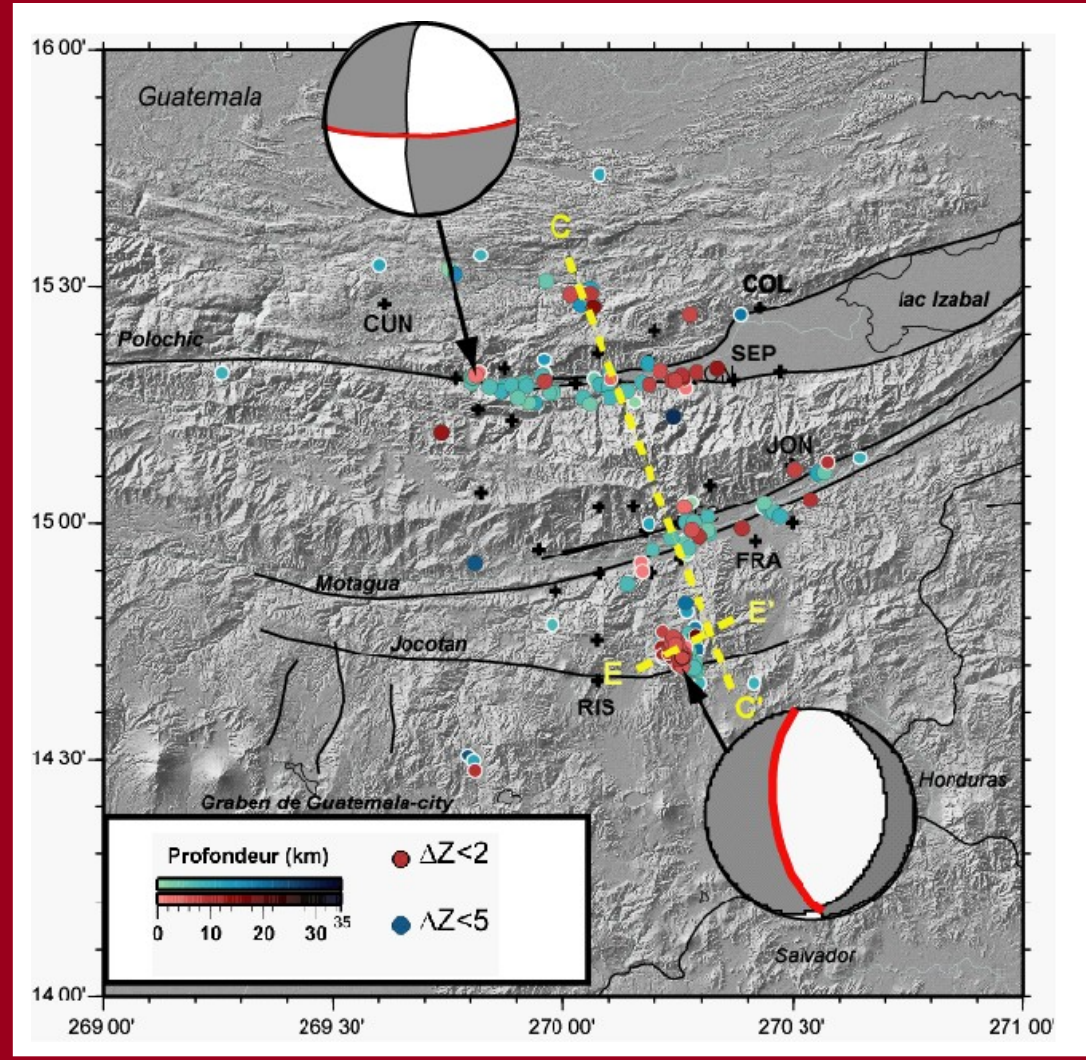
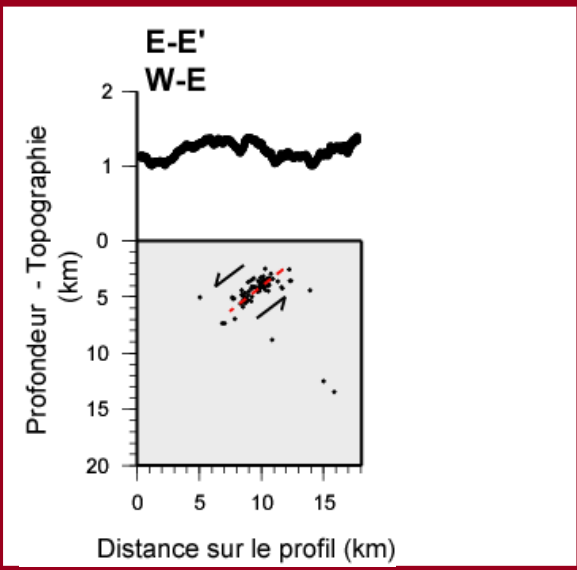
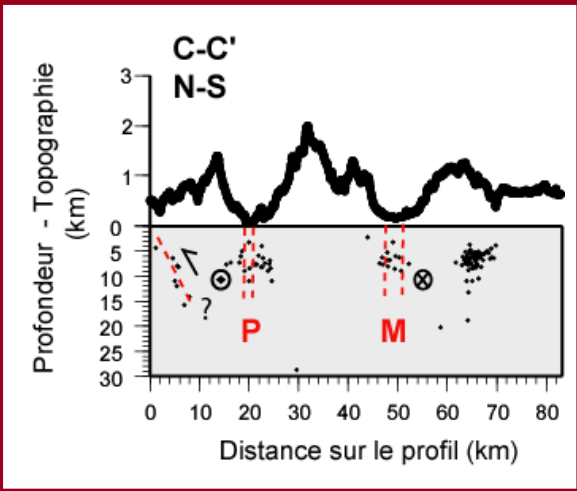


# Epaisseur sismogénique



- Epaisseur sismogénique ~ 10 à 15 km
- Activité sismique comparable sur les failles de Polochic et de Motagua

# Pendage des structures



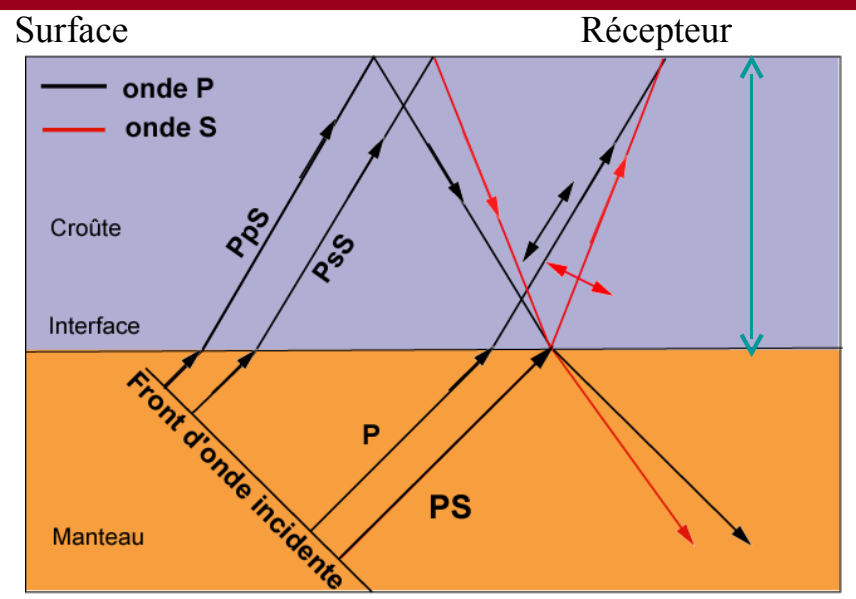
## Pour résumer

- Activité sismique comparable sur les failles de Polochic et de Motagua
- Aucune activité détectée sur la faille de Jocotan
- Séismes localisés sur 15 km de profondeur
- Quelques séismes associés à des structures annexes
  - Extension au Sud de la faille de Motagua
  - Plis au Nord de la faille de Polochic

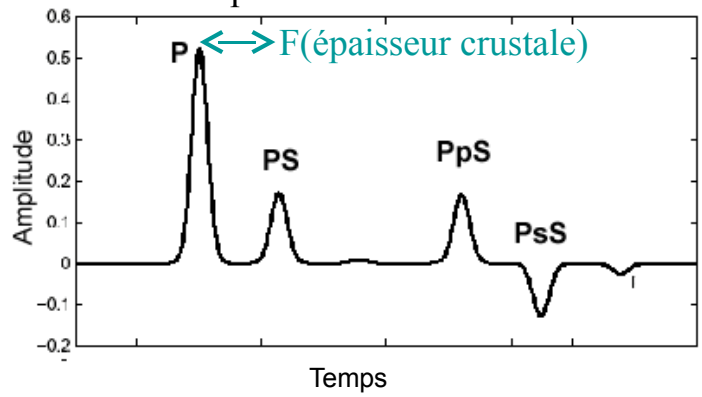


# Méthode: les fonctions récepteur

=> Détection des interfaces



Réponse de la structure



Fonction source

Réponse instrumentale

Réponse structurale

(Composante verticale)  $Z(t) = I(t) * S(t) * E_Z(t) \sim I(t) * S(t)$

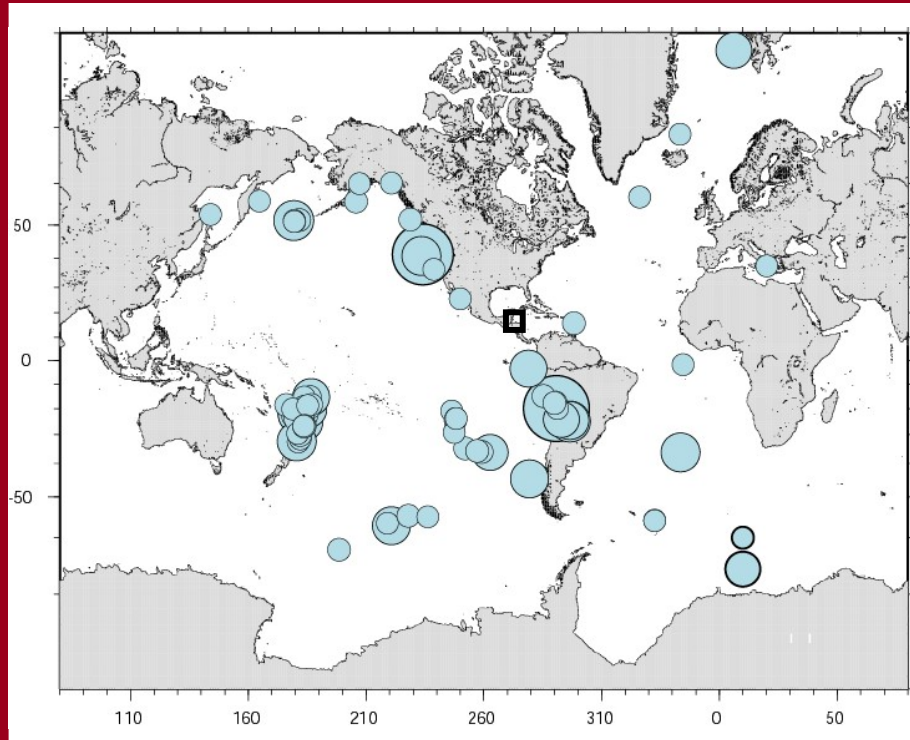
(Composante radiale)  $R(t) = I(t) * S(t) * E_R(t) \sim \underline{Z(t)} * \underline{E_R(t)}$

=> Déconvolution

- Sélection des séismes
- Filtrage
- Calcul des fonctions récepteur (déconvolution)
- Test de qualité => sélection des fonctions récepteur
- Sommation par station des fonctions récepteur sélectionnées

# Deux approches

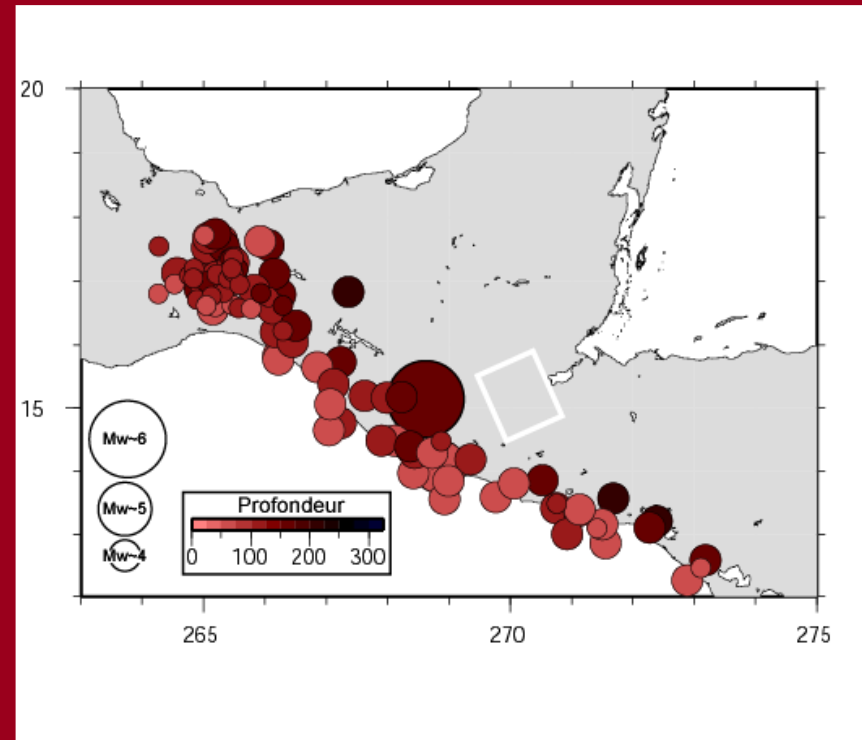
## Téleséismes



Méthode classique:

- Distance épacentrale  $20^\circ < D < 100^\circ$
- Magnitude  $M_w > 5,5$

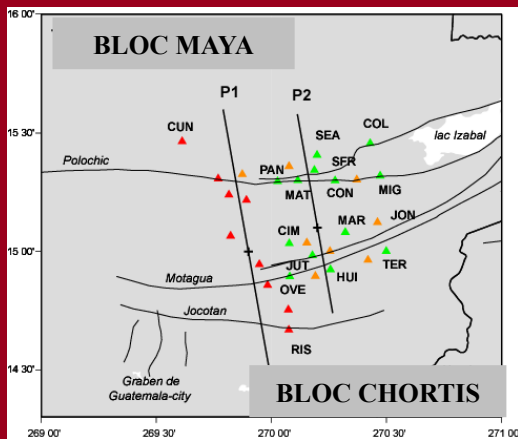
## Séismes régionaux



- Profondeur supérieure à 80 km
- Magnitude  $M_w > 3,5$

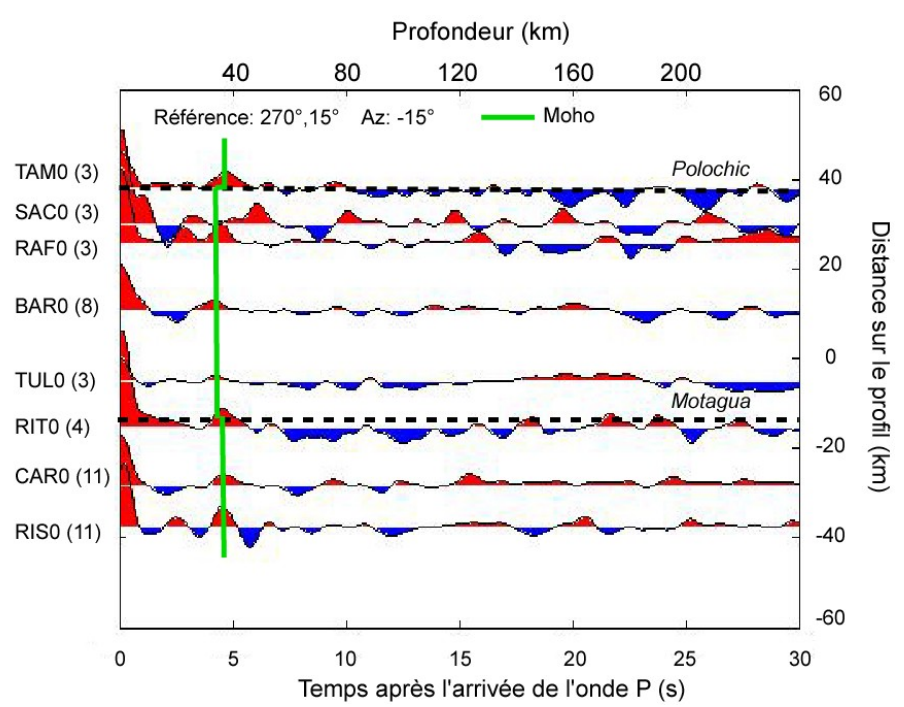
**Cependant:** faible quantité de données fiables et contenu monofréquentiel du signal

# Fonctions récepteur et épaisseur crustale

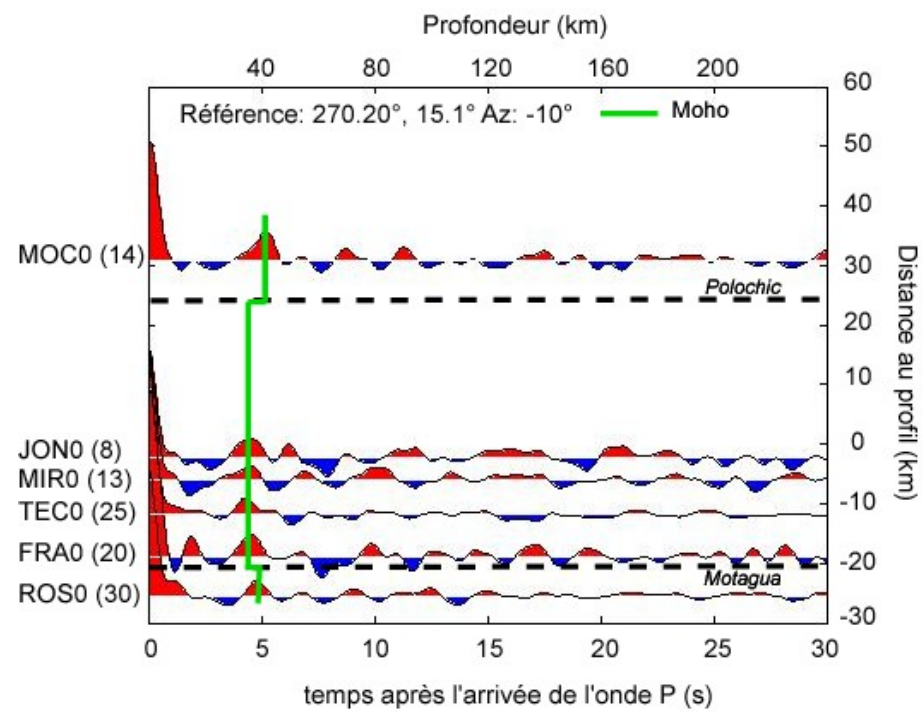


- Epaisseur moyenne de la croûte ~35 km
- Variation d'épaisseur crustale?
  - Amincissement entre les failles de Polochic et de Motagua?
  - Epaississement au Nord de la faille de Polochic?

## Profil large bande (P1)

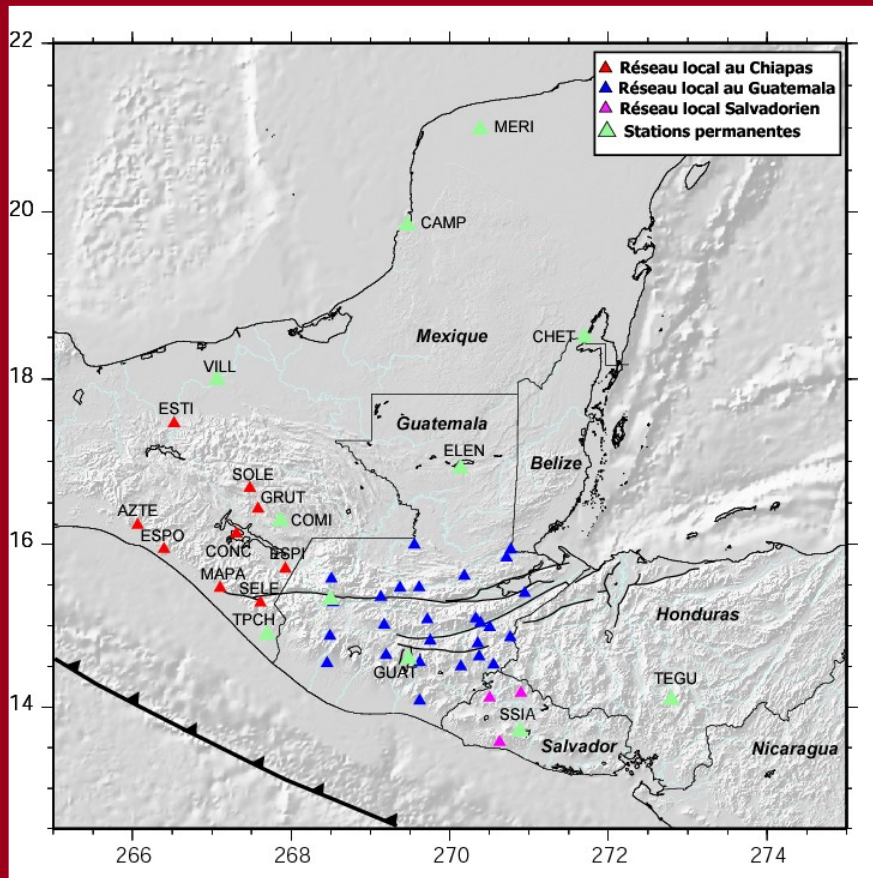


## Profil 5s (P2)



# Objectifs de l'étude GPS

- 1) Interactions des trois plaques CA/NA/CO
- 2) Contributions des différentes structures



## Les observations GPS utilisées:

- **Guatemala** : 1999-2003-2006 (*ENS, P6, Guatemala*)
  - **Salvador**: 2003-2006 (*IGN*)
  - **Chiapas**: 2002, 2003, 2004, 2005 (*UNAM*)
- Au total: 34 sites mesurés au moins 2 fois sur 3 ans.
- **Stations permanentes**

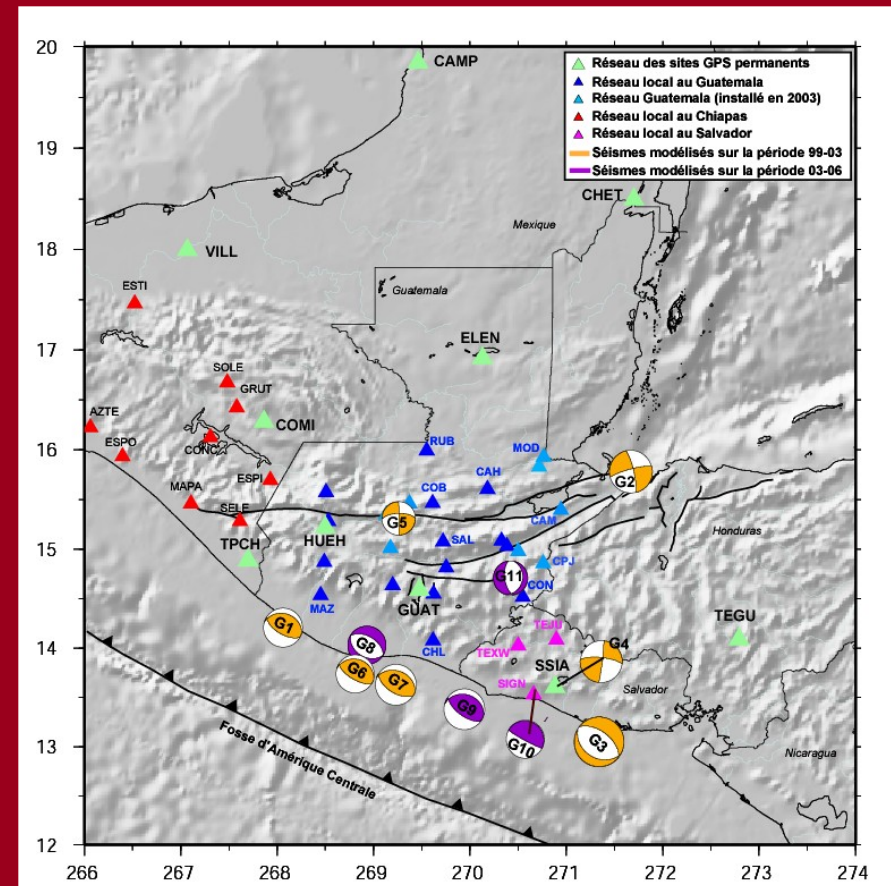
Traitement séparé des trois sous-réseaux GPS avec GAMIT/GLOBK  
Puis combinaison

# Traitement et qualité de traitement

➤ Modélisation et prise en compte des déplacements cosismiques dus aux séismes survenus entre les périodes de mesures

➤ Evaluation des incertitudes en introduisant un bruit markovien sur les données

⇒ Incertitudes sur les vitesses comprises entre 1 et 2  $\text{mm.an}^{-1}$



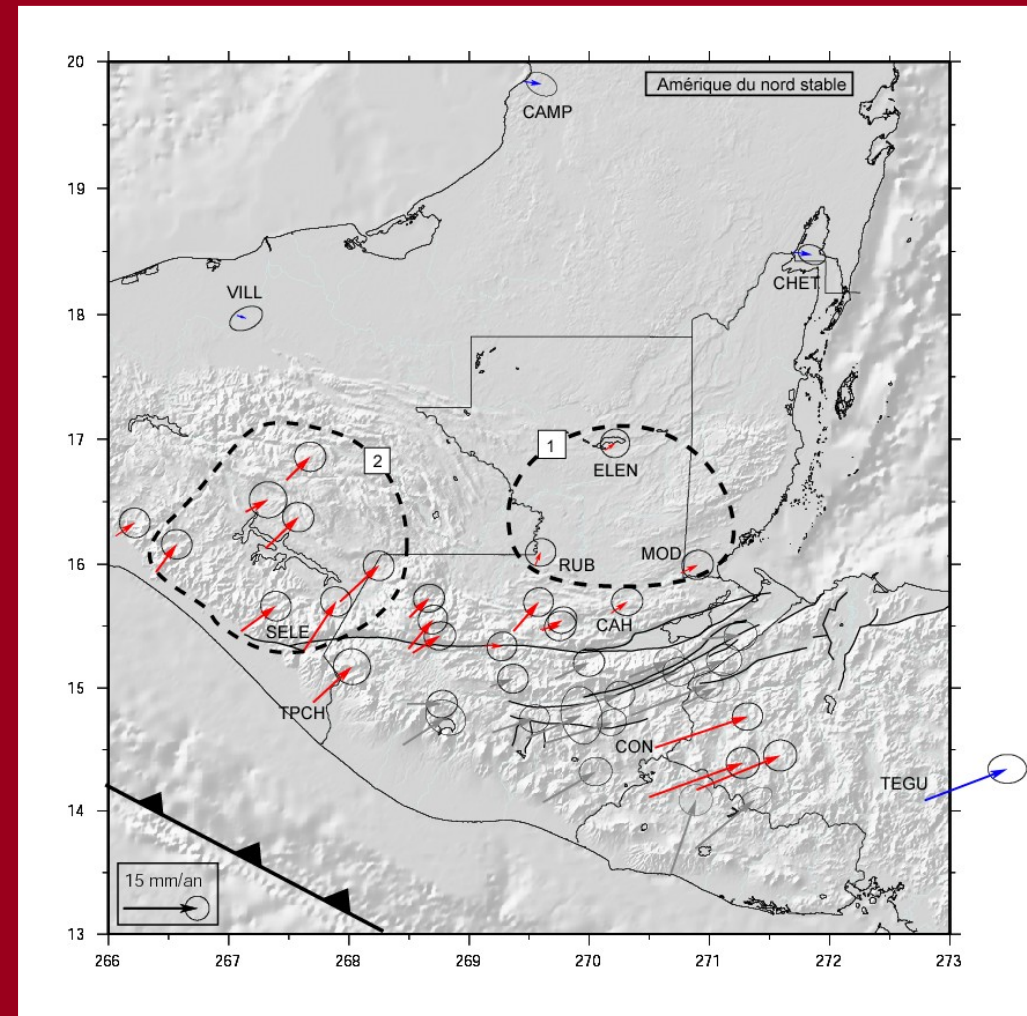
# Champ de vitesse dans le repère Amérique du Nord

Pôle NA/ITRF00 *DeMets et al., 2006*

1) Sites à vitesse faible appartiennent à la plaque Amérique du Nord stable

2) Mouvement perpendiculaire à la fosse d'Amérique Centrale  
=> effet de la subduction de la plaque Cocos

3) Mouvement sénestre à travers le système de failles Polochic-Motagua



# Champ de vitesse dans le repère Caraïbe

Pôle CA/ITRF 2000 *DeMets et al., 2006*

1) sites à vitesse faible appartiennent à la plaque Caraïbe stable

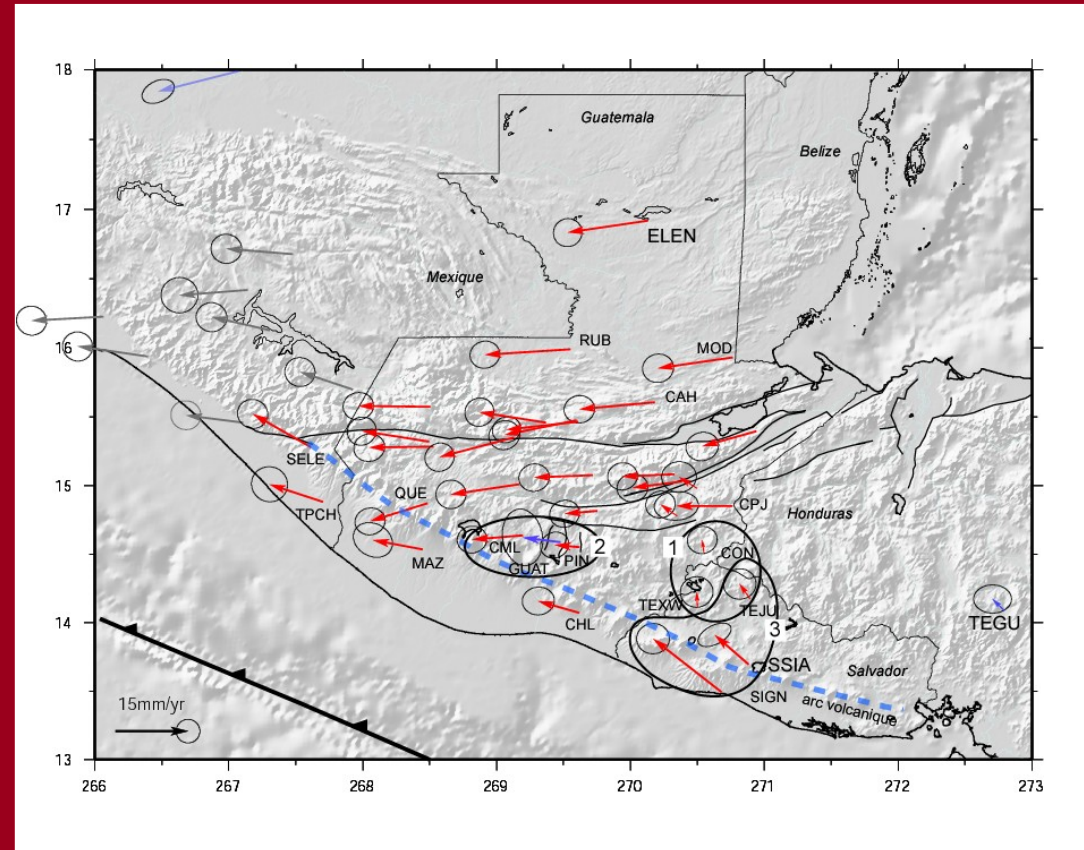
=> Vitesse CA/NA (ELEN-CON)  $\sim 20 \text{ mm.an}^{-1}$

2) déformation interne à travers les grabens

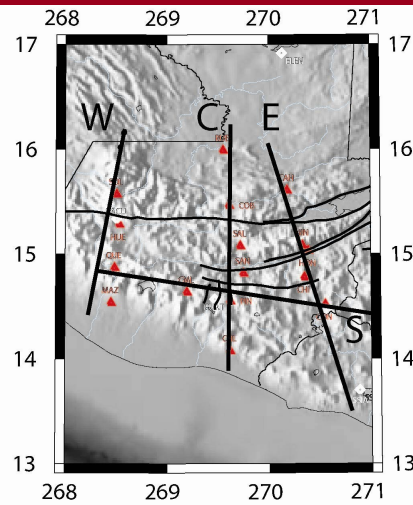
3) mouvement dextre à travers l'arc volcanique

=> Analyse cinématique en profils

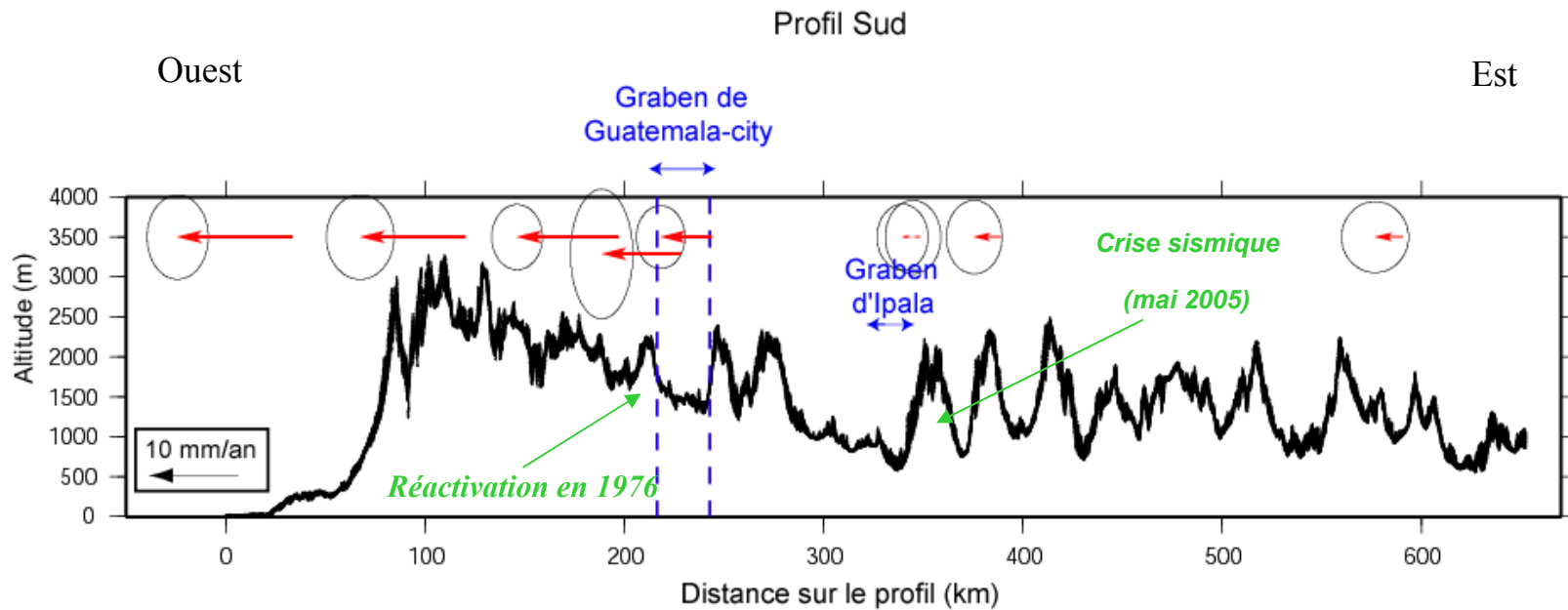
=> Modèle régional



# Extension Est-Ouest à travers la série de grabens

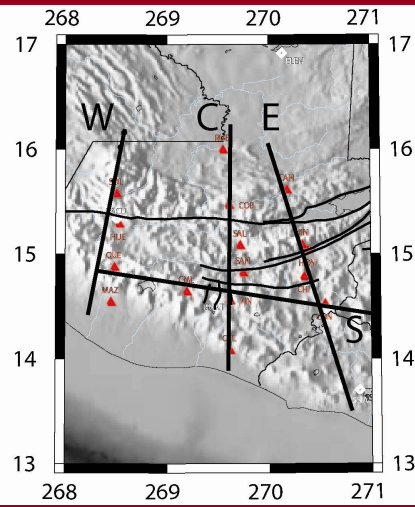


- Gradient  $\sim 10 \text{ mm.an}^{-1}$  (estimation du taux d'extension)
- Extension principalement accommodée dans la zone des grabens de Guatemala-City et d'Ipala



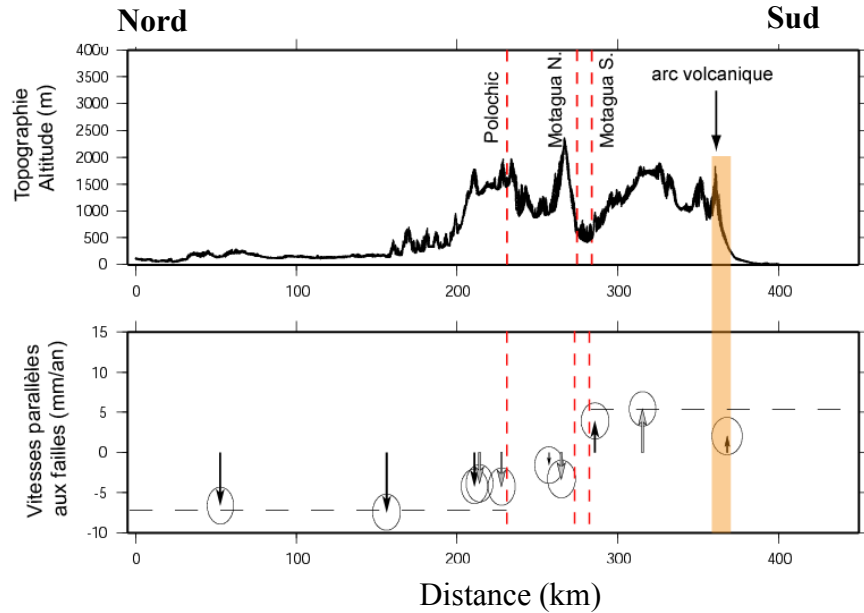


# Cinématique des failles décrochantes

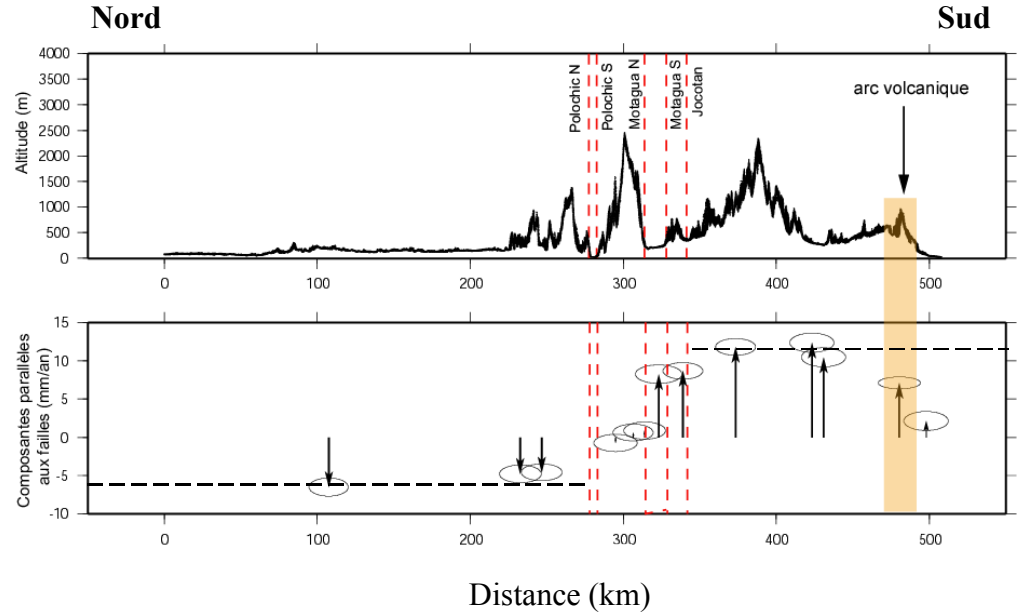


- Décroissance Est-Ouest de la vitesse à travers le système de failles
  - Mouvement dextre à travers l'arc volcanique
- => Modélisation élastique d'une faille verticale dans un demi espace infini

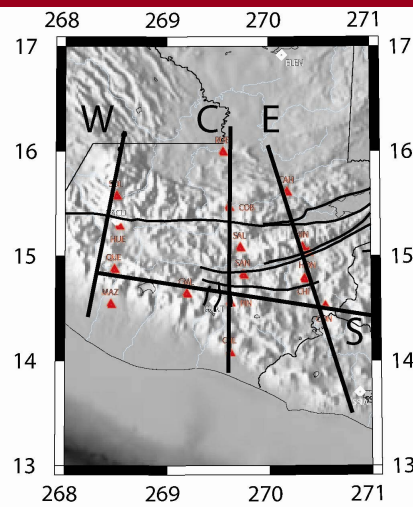
Profil Central (C)



Profil Est (E)

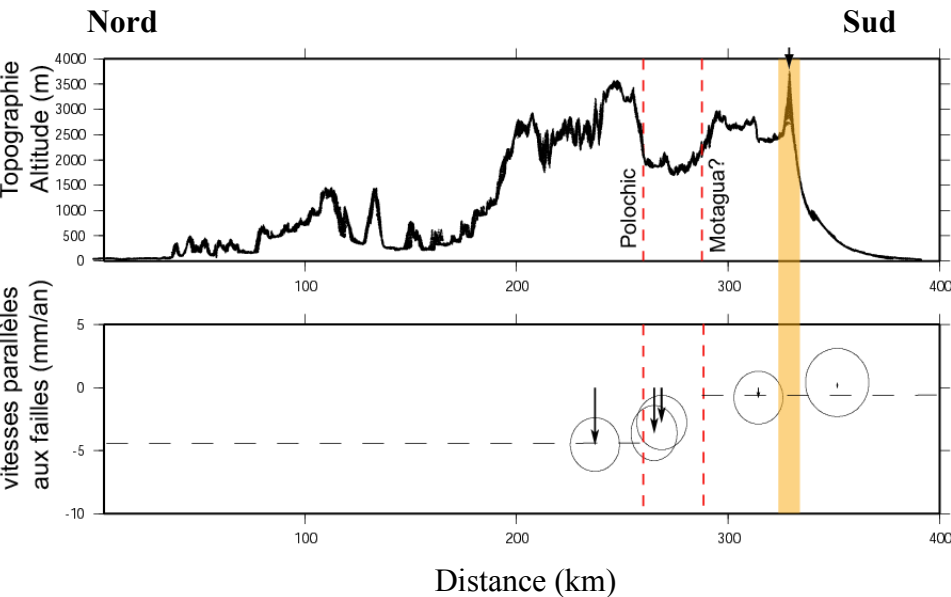


# Cinématique des failles décrochantes

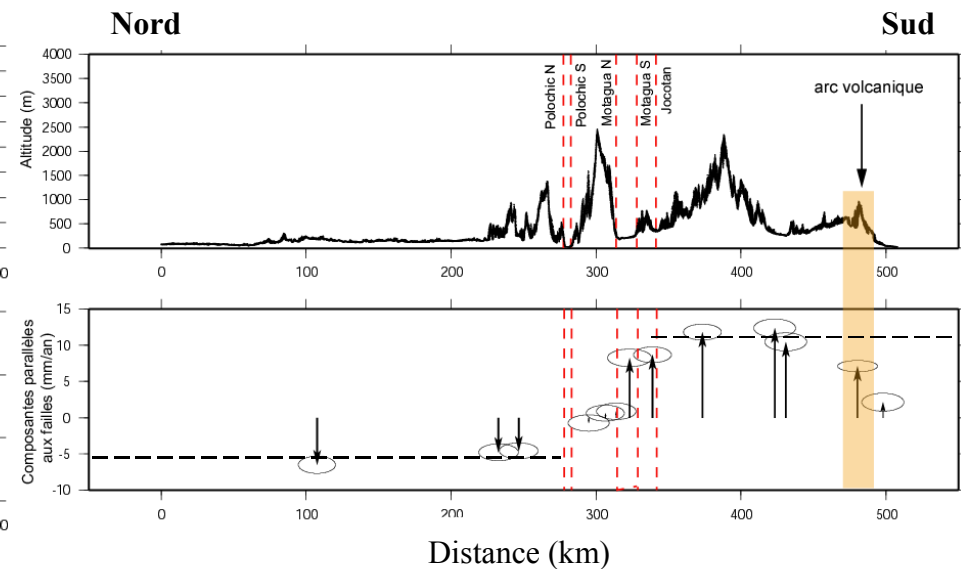


- Décroissance Est-Ouest de la vitesse à travers le système de failles
  - Mouvement dextre à travers l'arc volcanique
- => Modélisation élastique d'une faille verticale dans un demi espace infini

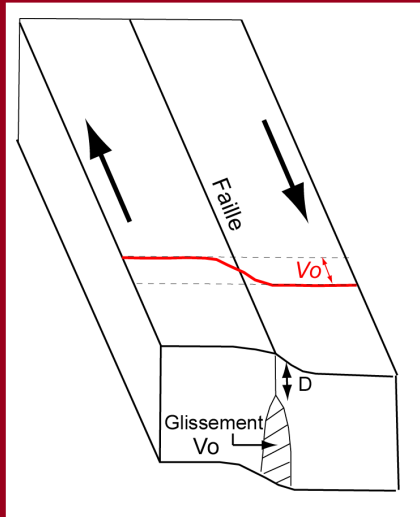
**Profil Ouest (W)**



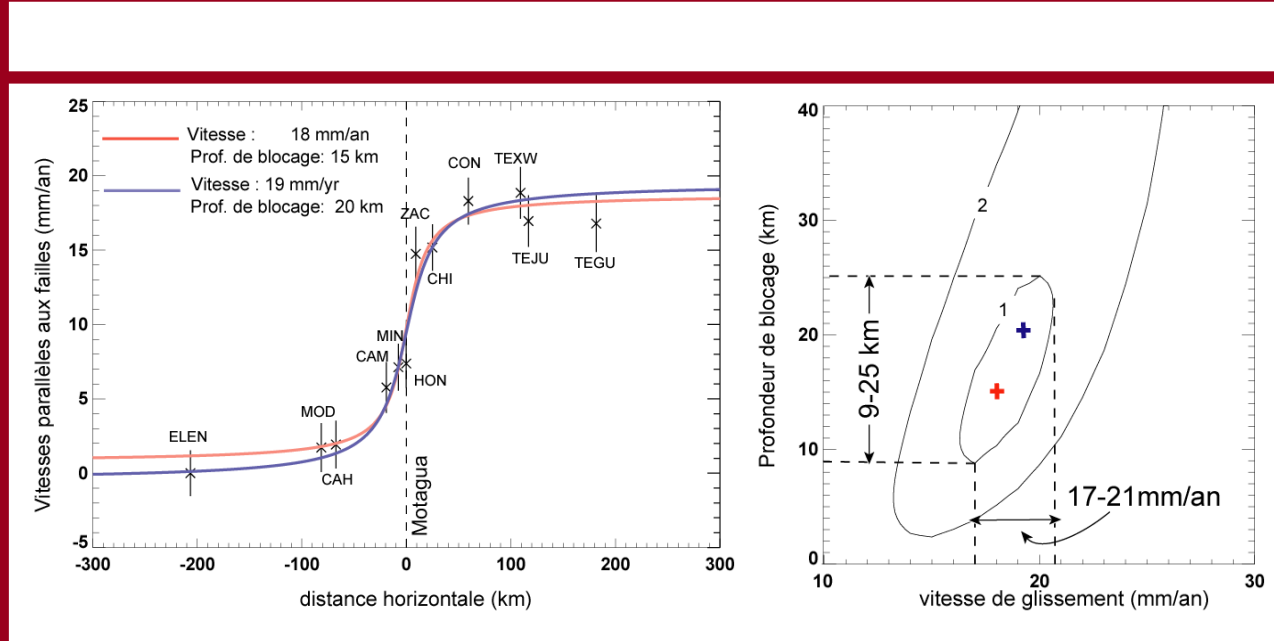
**Profil Est (E)**



# Modèle élastique à une seule faille



$$V = \frac{V_{mot}}{\pi} \arctan\left(\frac{X-X_0}{D_{mot}}\right) + A$$

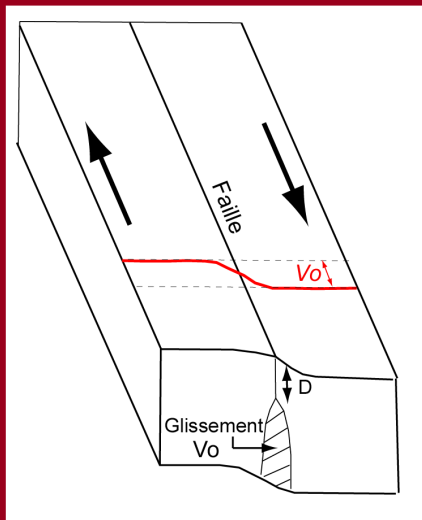


Profil Est:

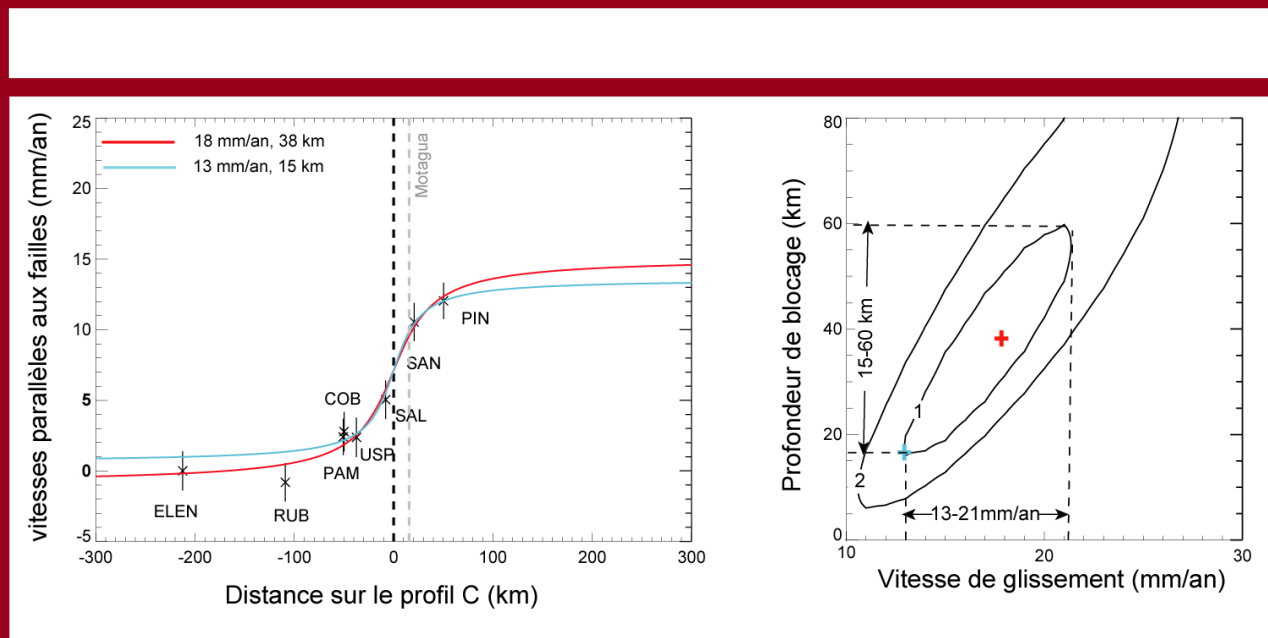
$D_{mot} = 15 \text{ km}$

$V_{mot} = 18 \text{ mm.an}^{-1}$

# Modèle élastique à une seule faille



$$V = \frac{V_{mot}}{\pi} \arctan\left(\frac{X - X_0}{D_{mot}}\right) + A$$



## Profil Est:

$D_{mot} = 15\text{km}$

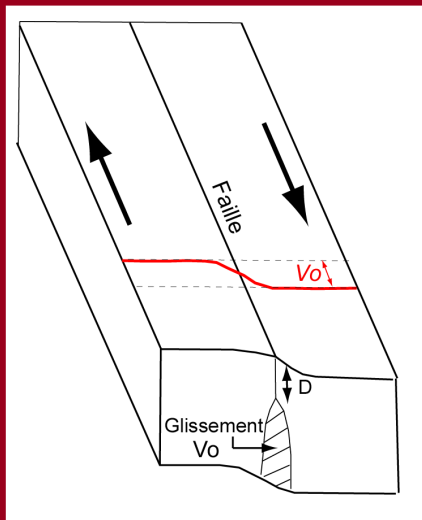
$V_{mot} = 18\text{mm}\cdot\text{an}^{-1}$

## Profil Central:

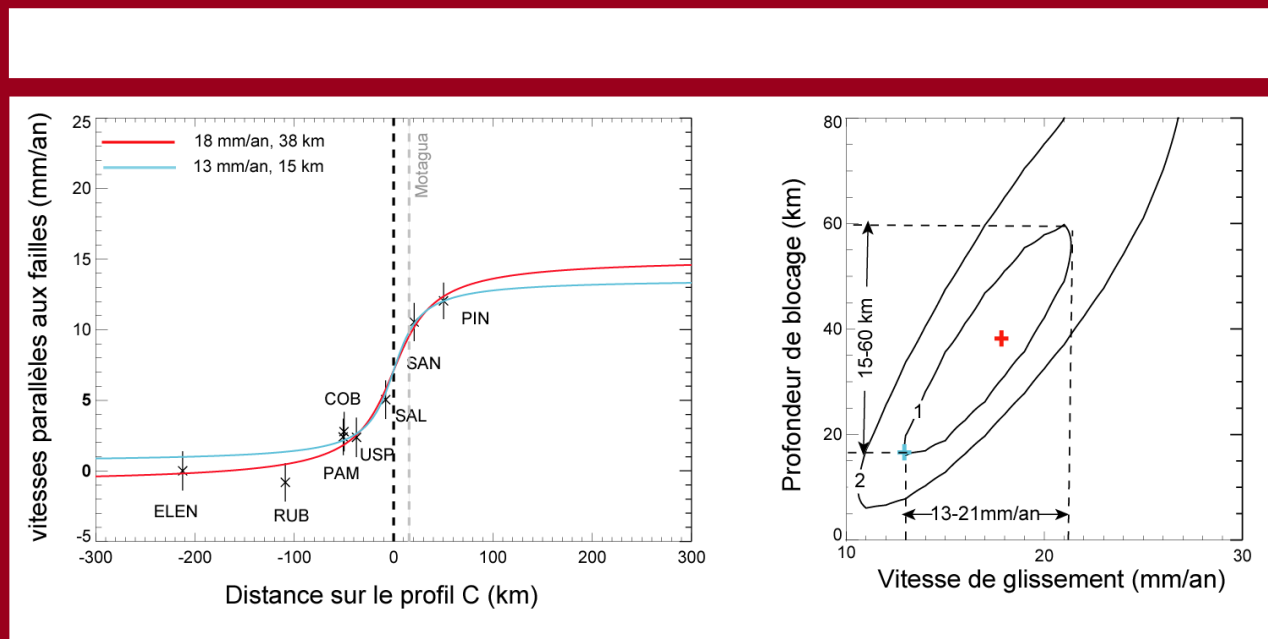
$D_{mot} = 38\text{km}$

$V_{mot} = 18\text{mm}\cdot\text{an}^{-1}$

# Modèle élastique à une seule faille



$$V = \frac{V_{mot}}{\pi} \arctan\left(\frac{X - X_0}{D_{mot}}\right) + A$$



## Profil Est:

$D_{mot} = 15\text{km}$

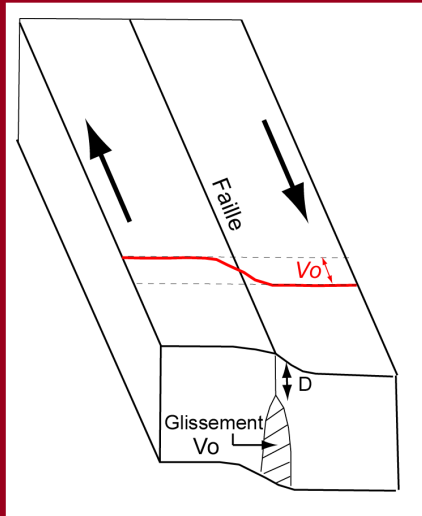
$V_{mot} = 18\text{mm}\cdot\text{an}^{-1}$

## Profil Central:

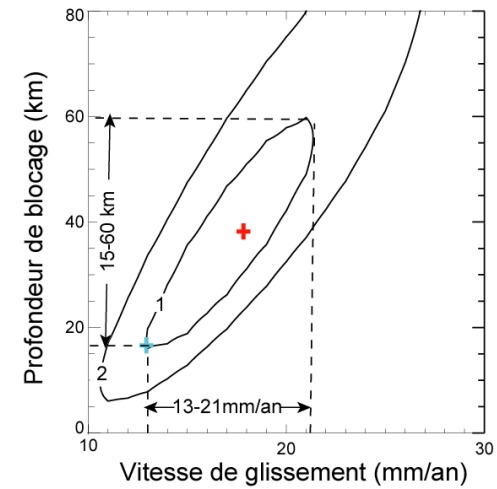
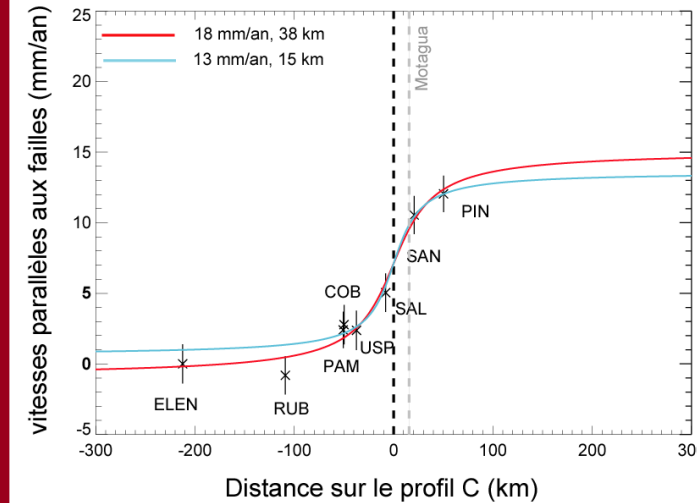
$D_{mot} = 15\text{km}$

$V_{mot} = 13\text{mm}\cdot\text{an}^{-1}$

# Modèle élastique à une seule faille



$$V = \frac{V_{mot}}{\pi} \arctan\left(\frac{X-X_0}{D_{mot}}\right) + A$$



Profil Est:

$D_{mot} = 15\text{km}$

$V_{mot} = 18\text{mm.an}^{-1}$

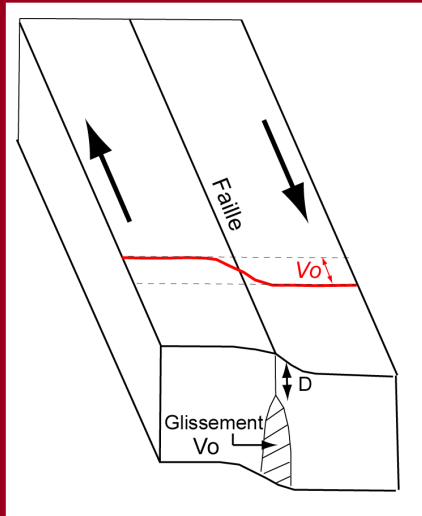
Profil Central:

$D_{mot} = 15\text{km}$

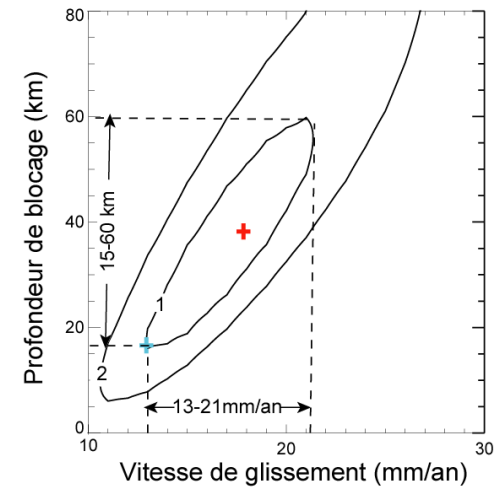
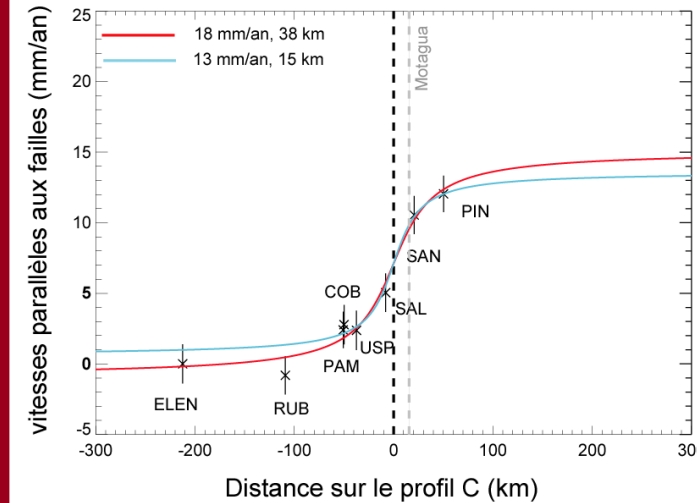
$V_{mot} = 13\text{mm.an}^{-1}$

Profil Ouest:  $V_{mot} = 5\text{mm.an}^{-1}$  ?

# Modèle élastique à une seule faille



$$V = \frac{V_{mot}}{\pi} \arctan\left(\frac{X-X_0}{D_{mot}}\right) + A$$



Profil Est:

$D_{mot} = 15\text{km}$

$V_{mot} = 18\text{mm.an}^{-1}$

Profil Central:

$D_{mot} = 15\text{km}$

$V_{mot} = 13\text{mm.an}^{-1}$

Profil Ouest:  $V_{mot} = 5\text{mm.an}^{-1}$  ?

- Faille bloquée sur 15 km
- Vitesse décroissante d'Est en Ouest vers la jonction triple
- Faille centrée sur la faille de Motagua

**Quelle est la contribution de la faille de Polochic dans l'accommodation de la déformation?**

# Modèle élastique à deux failles

Contribution relative des failles de Polochic/Motagua?

$$V = \frac{V_{pol}}{\pi} \arctan\left(\frac{X}{D_{pol}}\right) + \frac{V_{mot}}{\pi} \arctan\left(\frac{Y}{D_{mot}}\right) + A$$

Hypothèse  $D_{mot} = D_{pol}$

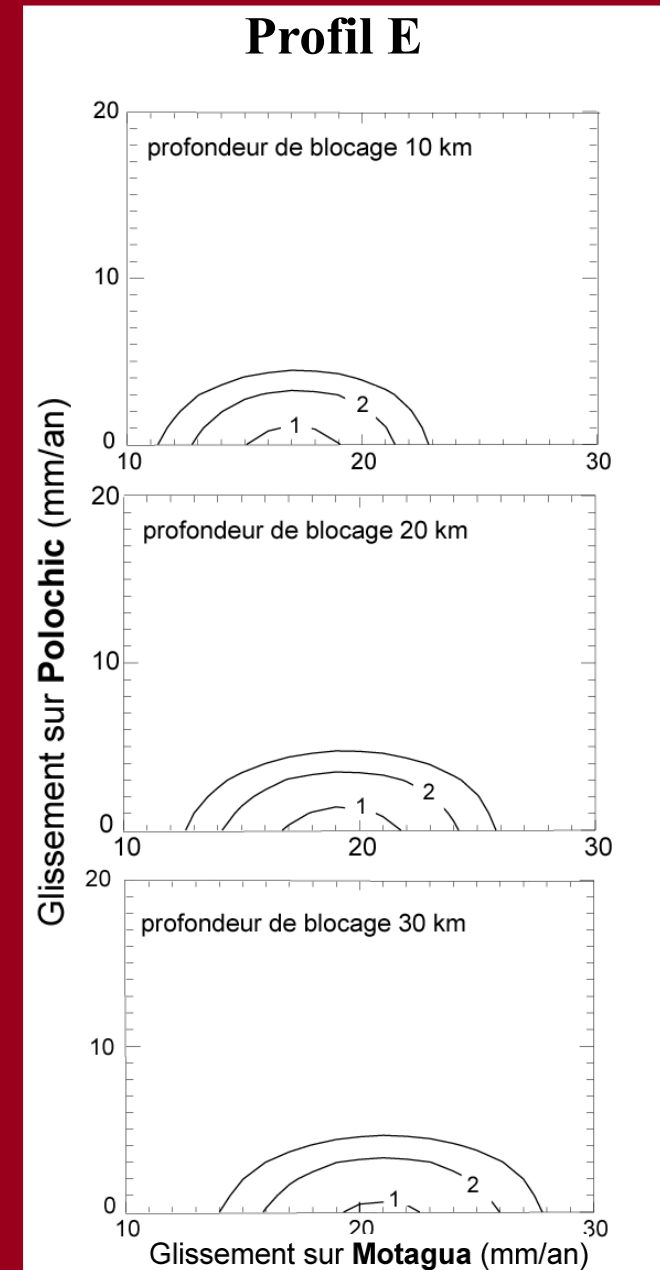
**La faille de Polochic ne semble pas accommoder plus de 15 % de la déformation totale**

⇒ Effets post-sismiques à la suite du séisme de 1976 ?

- Modèle viscoélastique montre que les effets post-sismiques n'excèdent  $1 \text{ mm.an}^{-1}$

⇒ Interaction complexe entre les deux failles à l'échelle de plusieurs cycles sismiques?

⇒ Rhéologie?





# Vers un modèle cinématique régional

## ➤ Analyses précédentes:

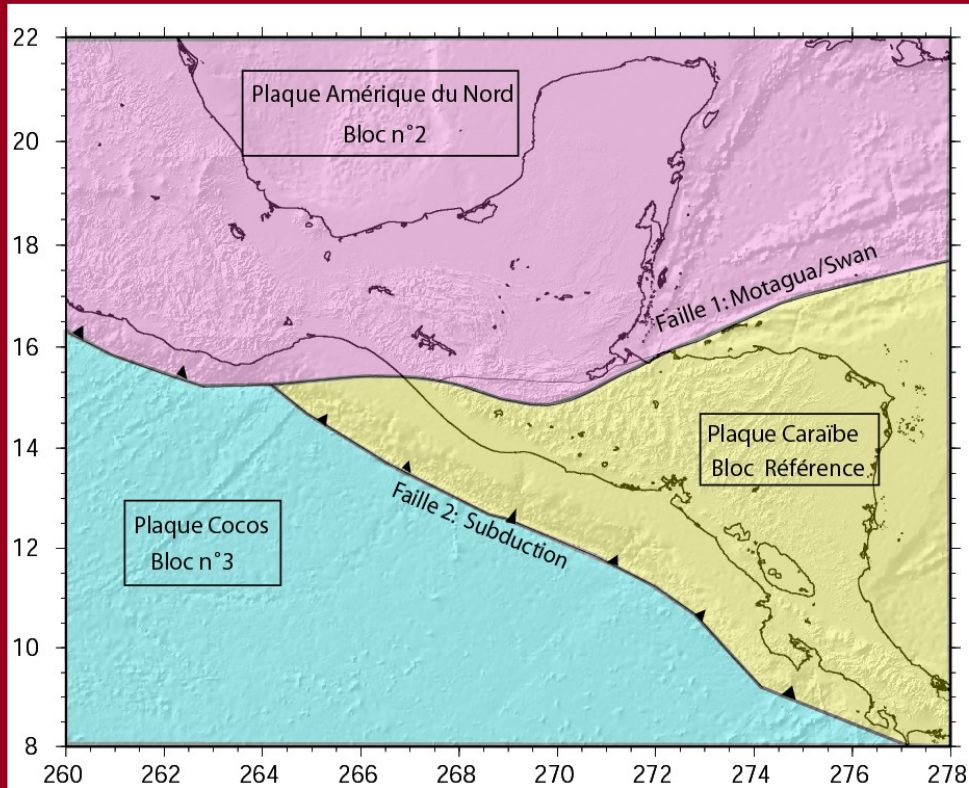
- Caractérisation simple des différents types de déformation
- Ordre de grandeur de ces déformations

**Cependant :** Rotations de blocs, géométrie complexe des structures non prises en compte.

## ➤ Modèle régional:

- Géométrie réaliste des structures
- Interactions entre les mouvements de blocs et déformation localisée sur les différentes structures
- Arc volcanique, Couplage le long de la subduction

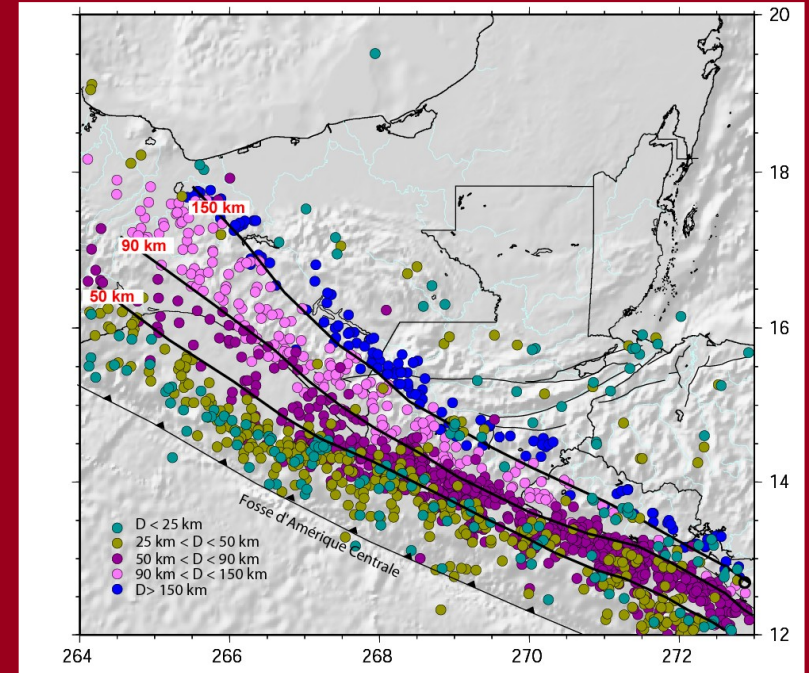
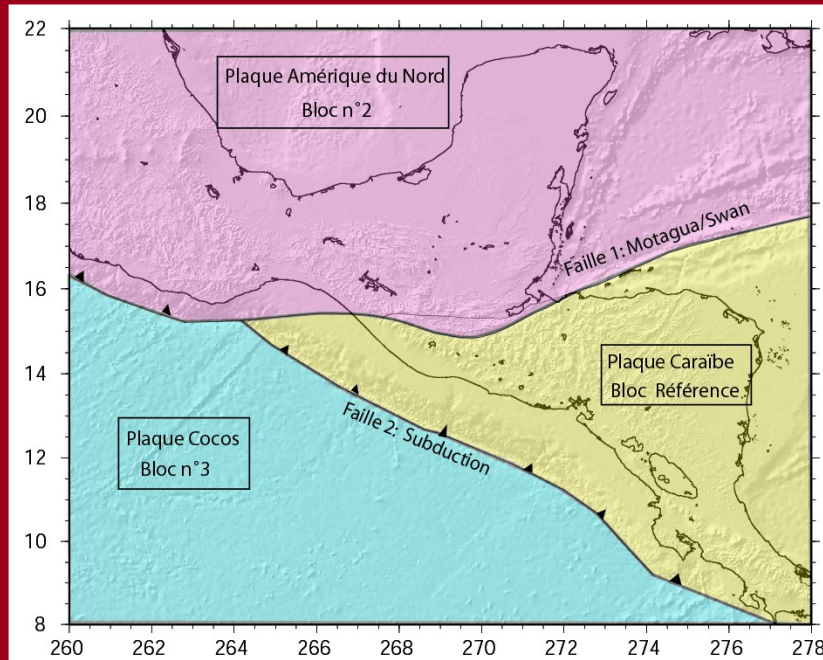
# Modèle Régional



Modèle DEFNODE (*McCaffrey, 2002*)

- Cinématique grande échelle: Rotation de blocs rigides
- Déformation localisée sur des failles aux frontières de ces blocs

# Géométrie du modèle



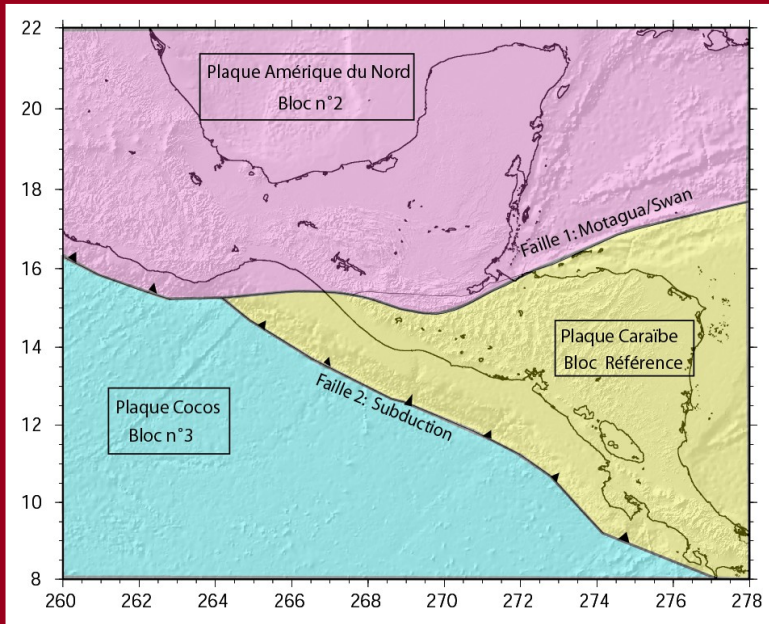
- 3 blocs (NA, CO, CA)-(CA référence)

- 2 failles:

Motagua

Subduction, géométrie contrainte par la sismicité d'Engdhal (1998)

# Paramètres du modèle



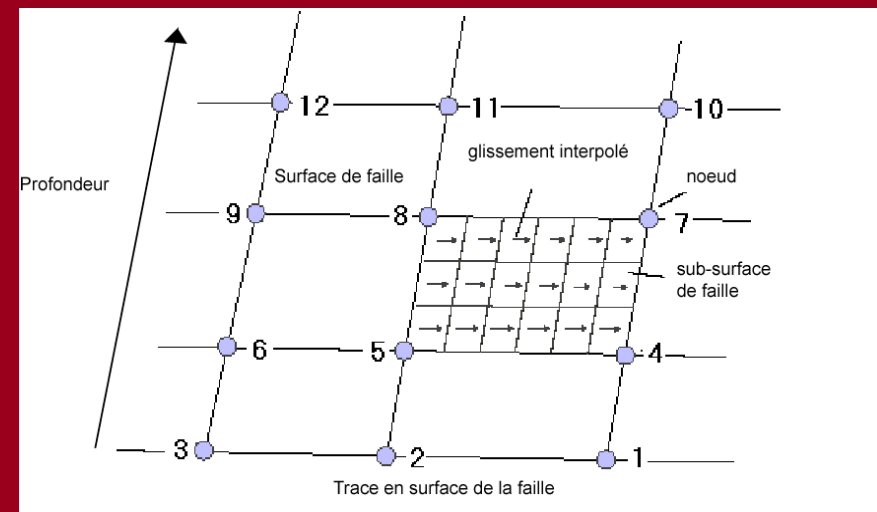
- Pôles et vitesses de rotation des blocs  
CO/CA et NA/CA fixes (*DeMets et al., 2006*)

$V_0$  fixe vitesse en champ lointain

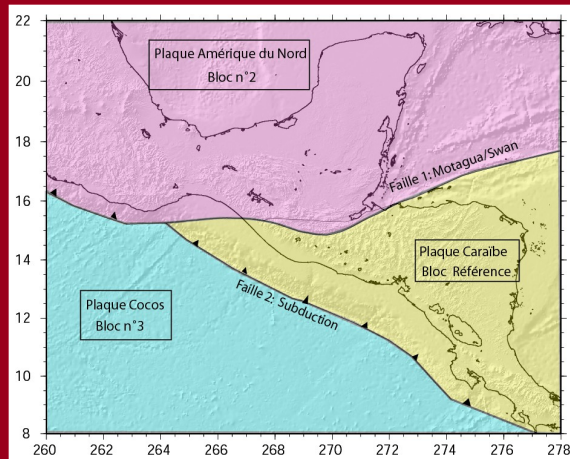
- Couplage  $\Phi$  inversé pour chaque nœud  
définissant la géométrie en profondeur  
des failles

Sur chaque nœud:  
 $V = V_0(1 - \Phi)$

## Paramétrisation des zones de failles



# Modèle de référence (3 blocs)

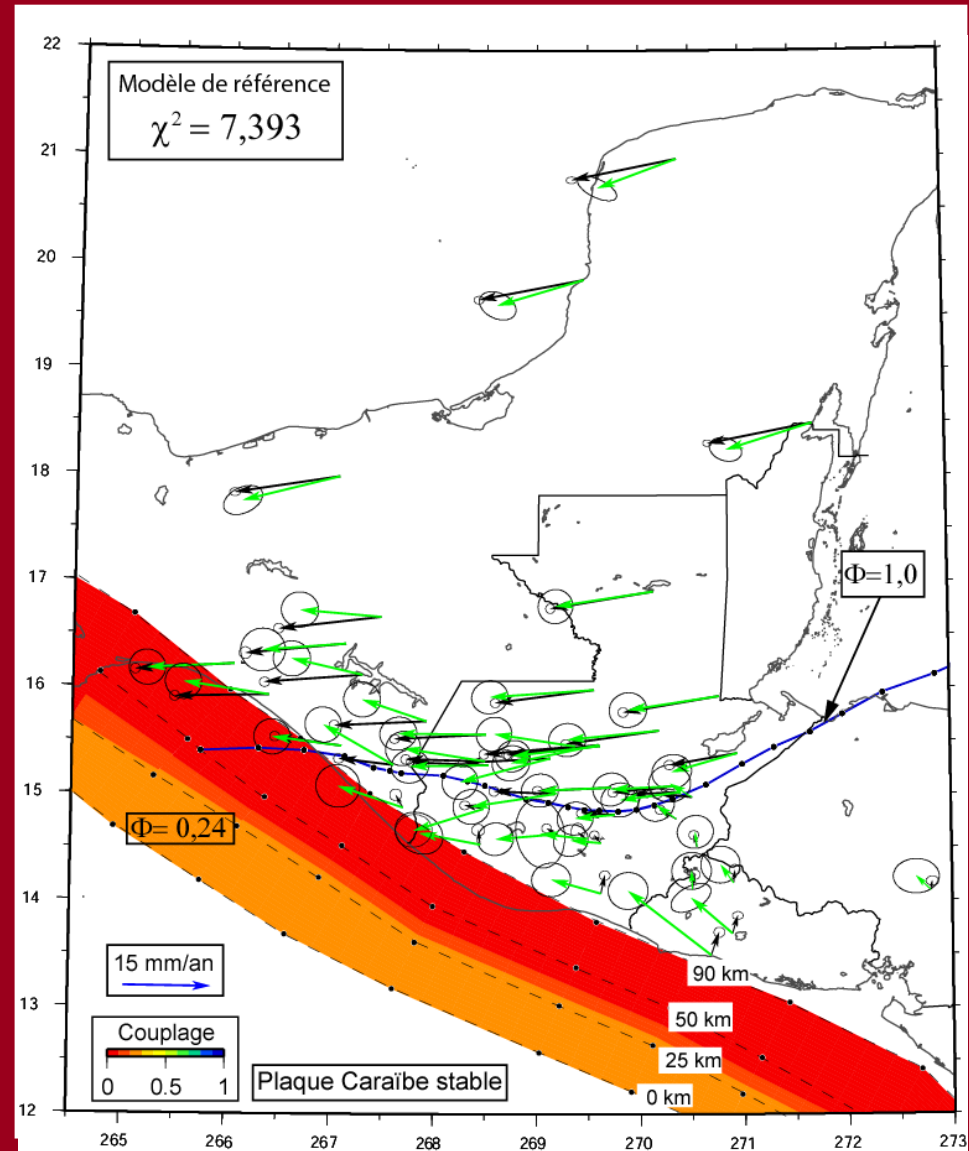


## Hypothèses:

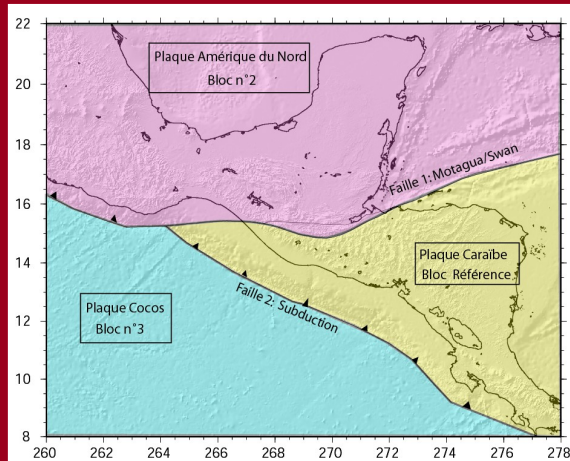
- Couplage constant sur les 25 premiers kilomètres de la subduction
- Couplage constant le long de faille de Motagua

## Résultats :

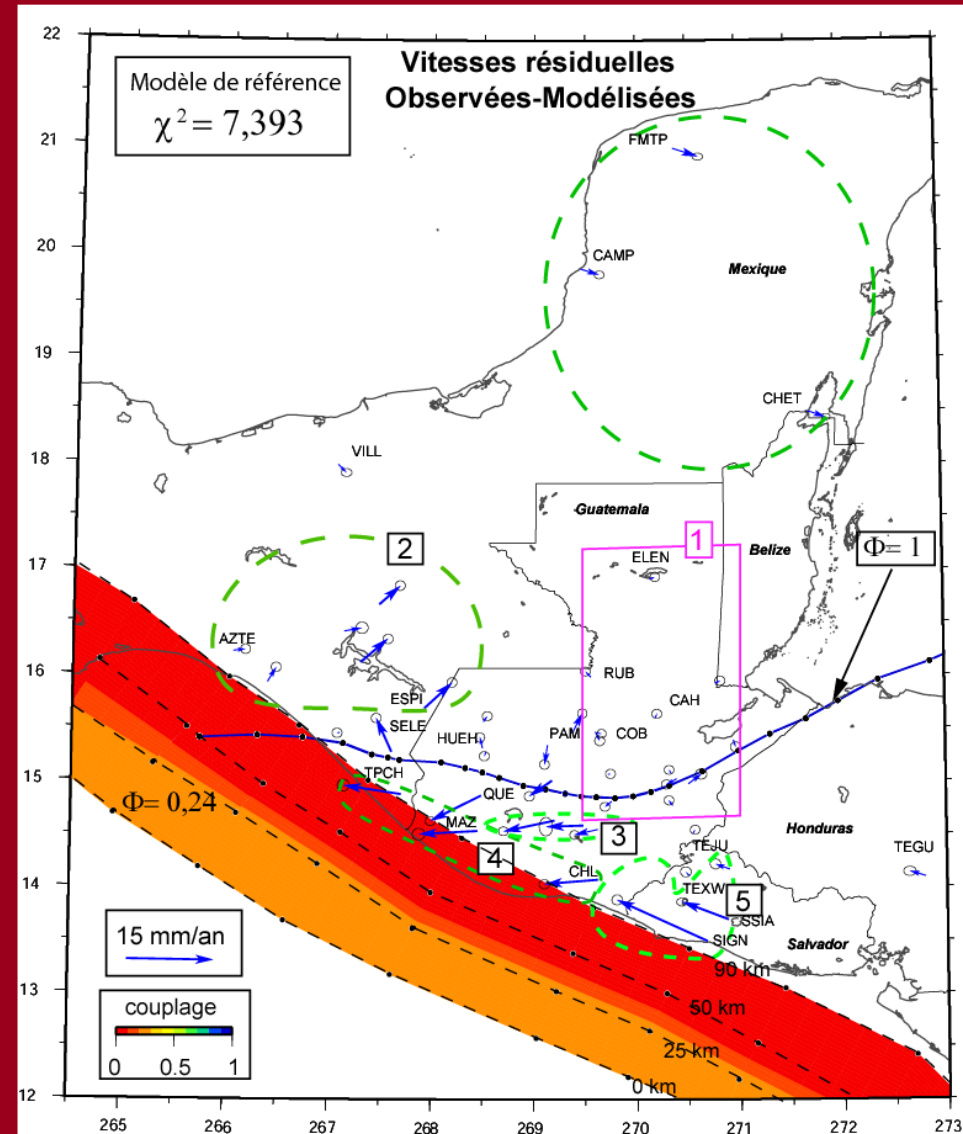
- Couplage faible sur la subduction 24%
- Couplage complet sur la faille de Motagua



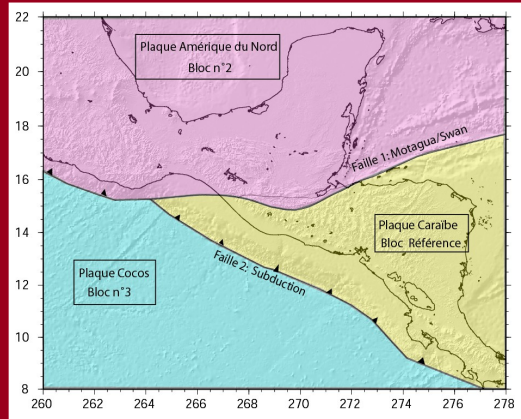
# Modèle de référence (3 blocs)



- Groupe 1: Bon accord modèle-données
- Groupe 2: Au Chiapas, résidus importants perpendiculaires à la subduction suggèrent un couplage CO/NA plus important
- Groupes 3-4-5: Champ de déformation interne à l'ouest de CA ne peut être expliqué par un modèle 3 blocs



# Modèle Amérique du Nord (3 blocs)

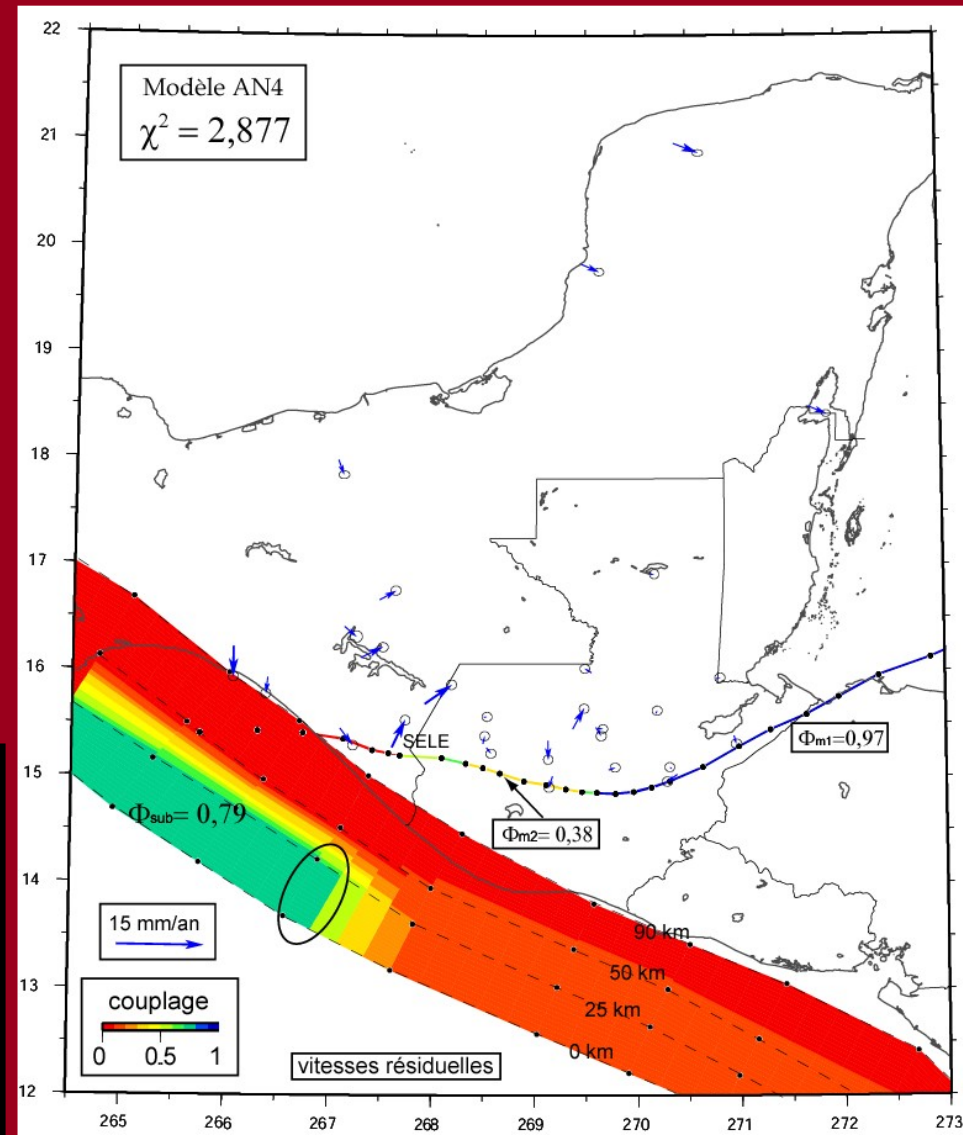


## Hypothèses:

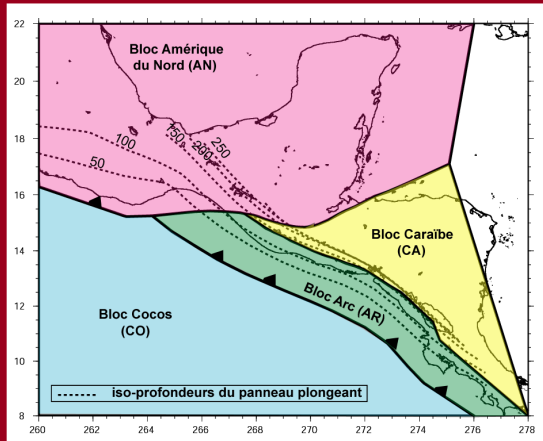
- Couplage variable sur la faille de Motagua
- Couplage sur les 25 premiers kilomètres de la subduction CO/NA

## Résultats:

- Décroissance du couplage sur la faille de Motagua d'Est en Ouest cohérent avec les analyses précédentes
- Fort couplage CO/NA (80%)



# Modèle 4 blocs

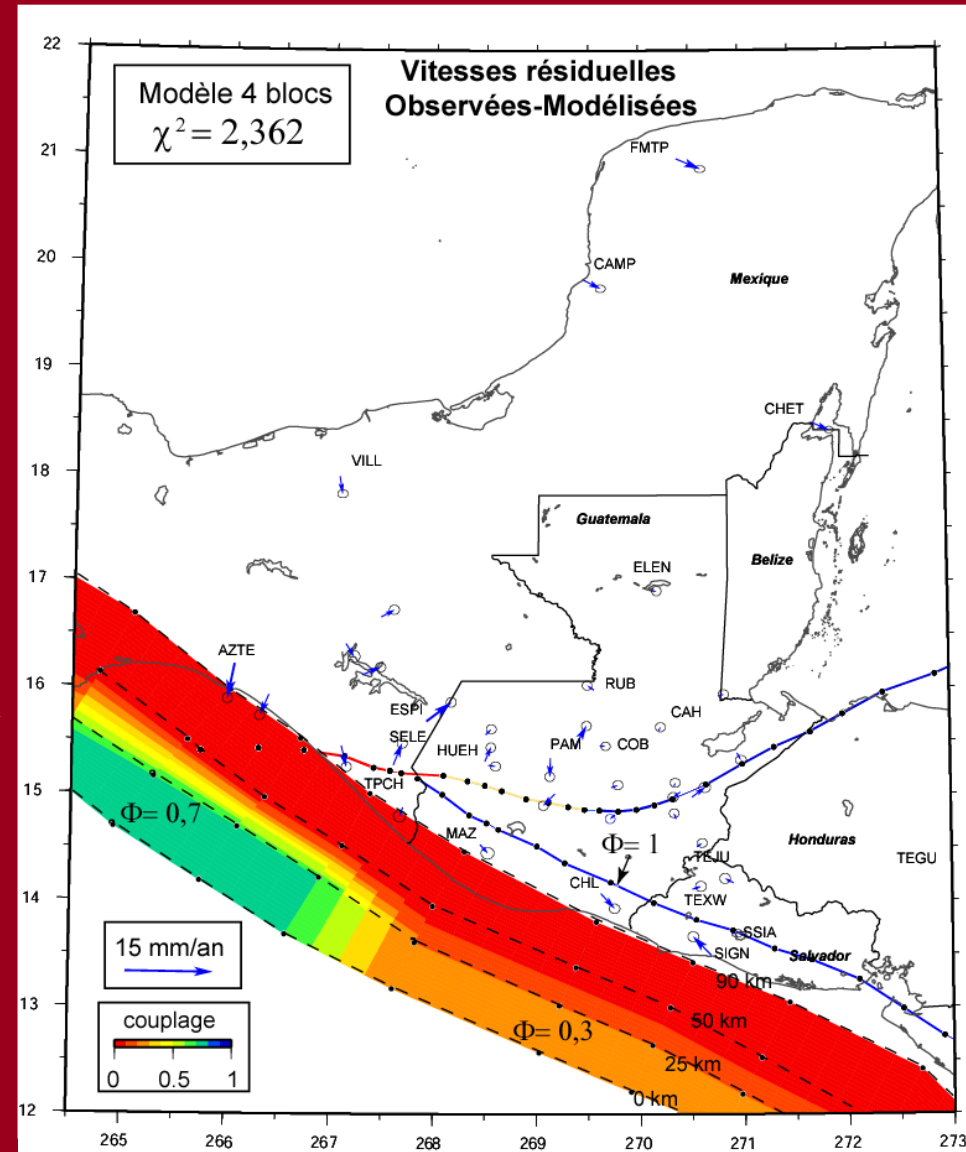


## Hypothèses:

- 3 failles: Motagua, Subduction, faille d'Amérique Centrale
- Paramètres fixés:  $\Phi$  dégressif sur la faille de Motagua, pôles et vitesses de rotation NA/CA CO/CA
- Paramètres inversés:  $\Phi$  subduction,  $\Phi$  faille Am. Centrale, pôle et vitesse AR/CA

## Résultats:

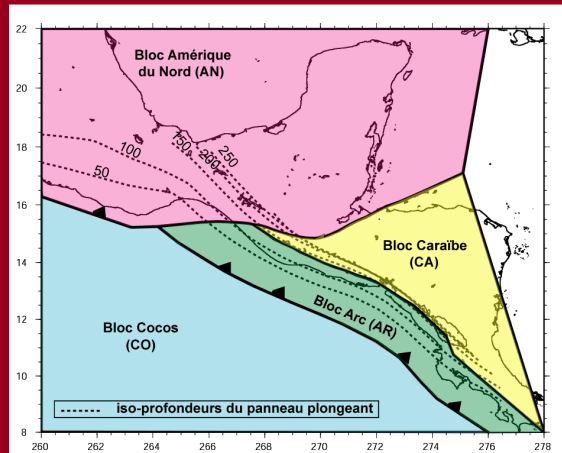
- **Couplage faible sur CO/AR**



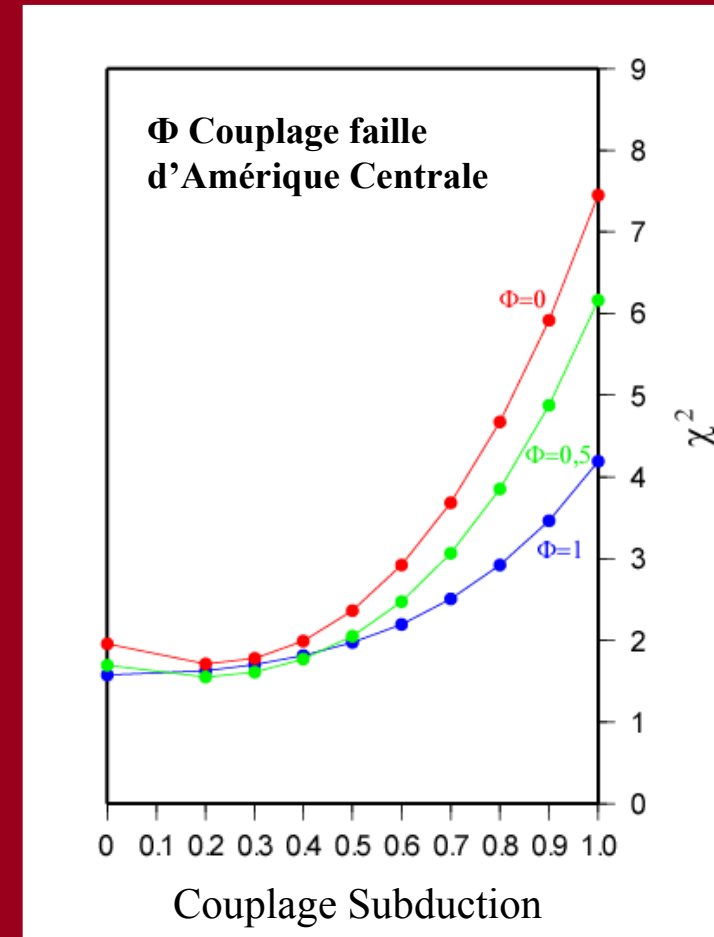


# Corrélation dans l'inversion des différents paramètres

- Pôle et vitesse de rotation AR/CA
  - Couplage sur la subduction
  - Couplage sur la faille d'Amérique Centrale



- Pour tous les modèles:  
Couplage CO/AR compris entre 0 et 50%
  - Cas d'un couplage faible sur l'arc  
Couplage CO/AR inférieur à 30%
- => Variation du couplage CO/NA CO/AR



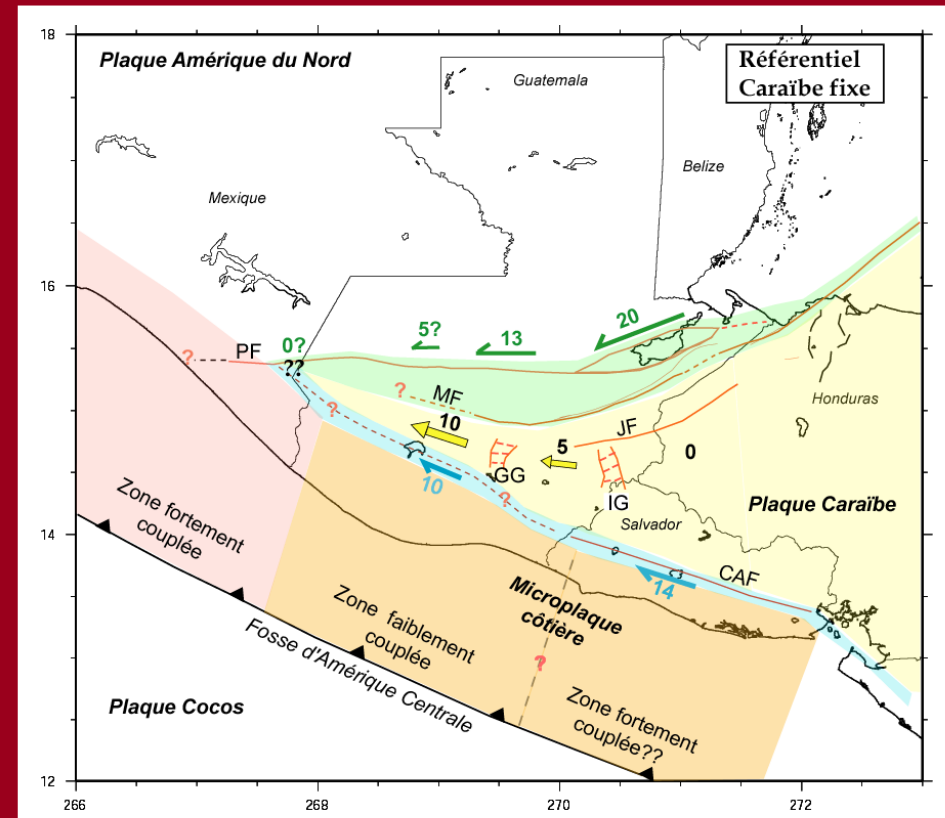
## Pour résumer

- Modèle 4 blocs permet d'expliquer une grande partie des observations (à l'exception de l'extension Est-Ouest à travers les grabens)
  
- Mise en évidence de variations latérales de couplage:
  - le long de la faille de Motagua
  - le long de la subduction de la plaque Cocos (Guatemala/Chiapas et Guatemala-Salvador?)

# Conclusions générales

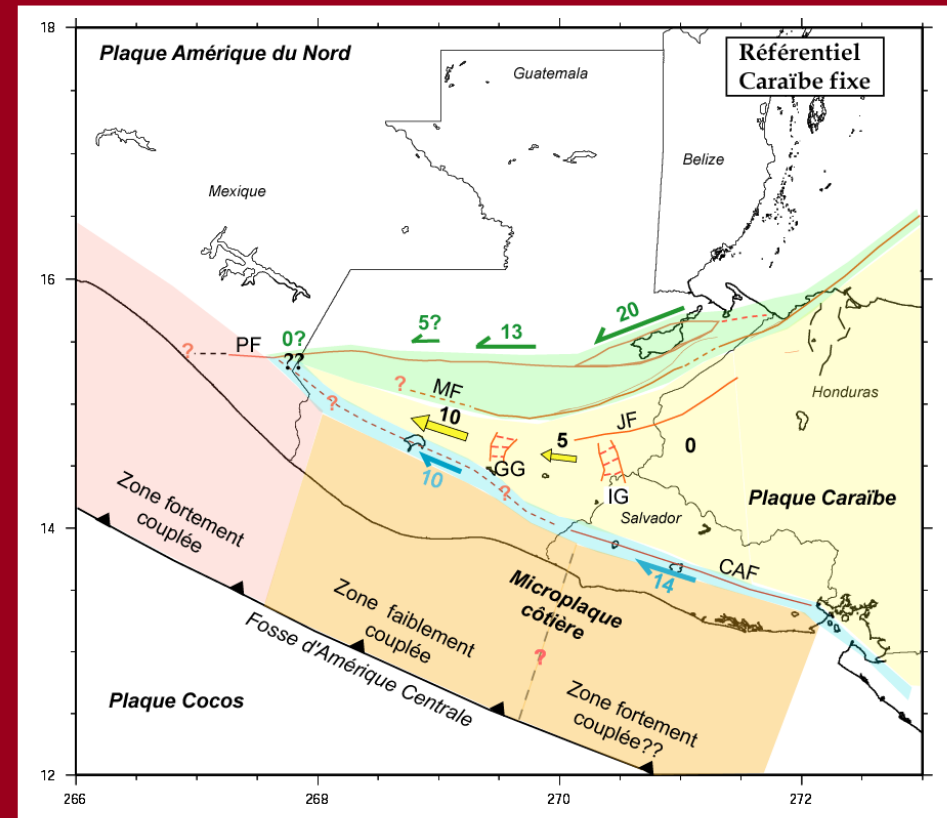
➤ La vitesse relative entre les plaques CA/NA est estimée à  $\sim 20\text{mm/an}$

Cohérent avec des études réalisées plus à l'Est (*Dixon, 1998; DeMets, 2001*)



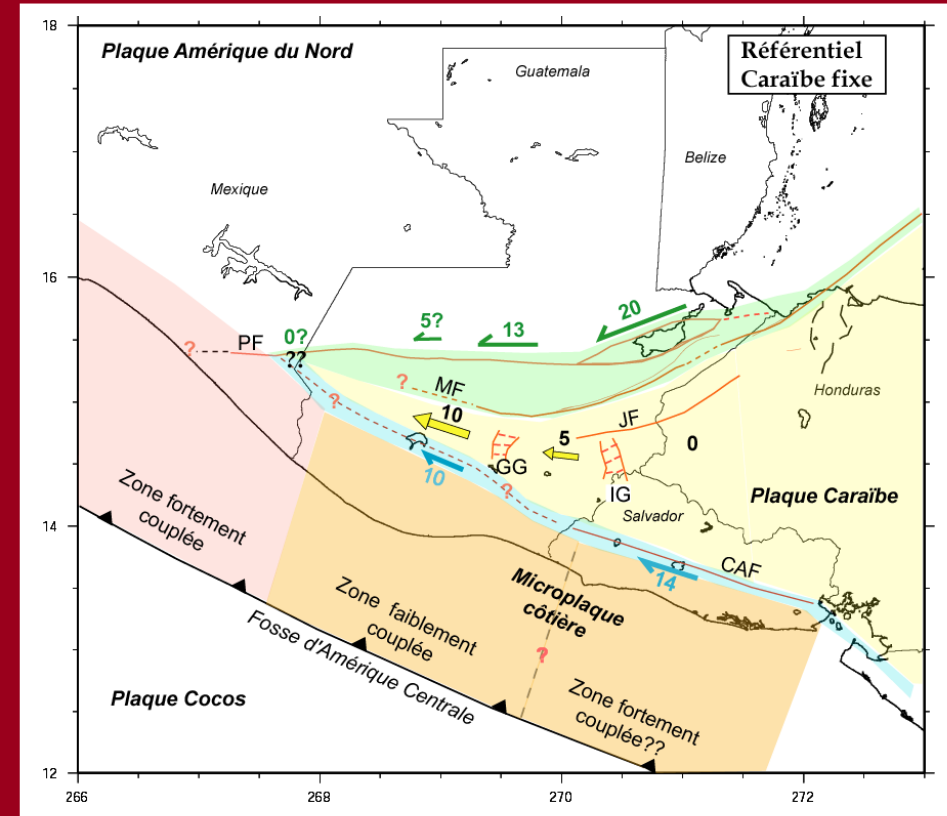
# Conclusions générales

- Décroissance de la vitesse de glissement d'Est en Ouest vers la jonction triple
- Glissement intersismique localisé sous 15 km (~épaisseur sismogénique) et essentiellement sous la faille de Motagua (85% de la déformation)
- La faille de Polochic semble actuellement accommoder très peu de déformation



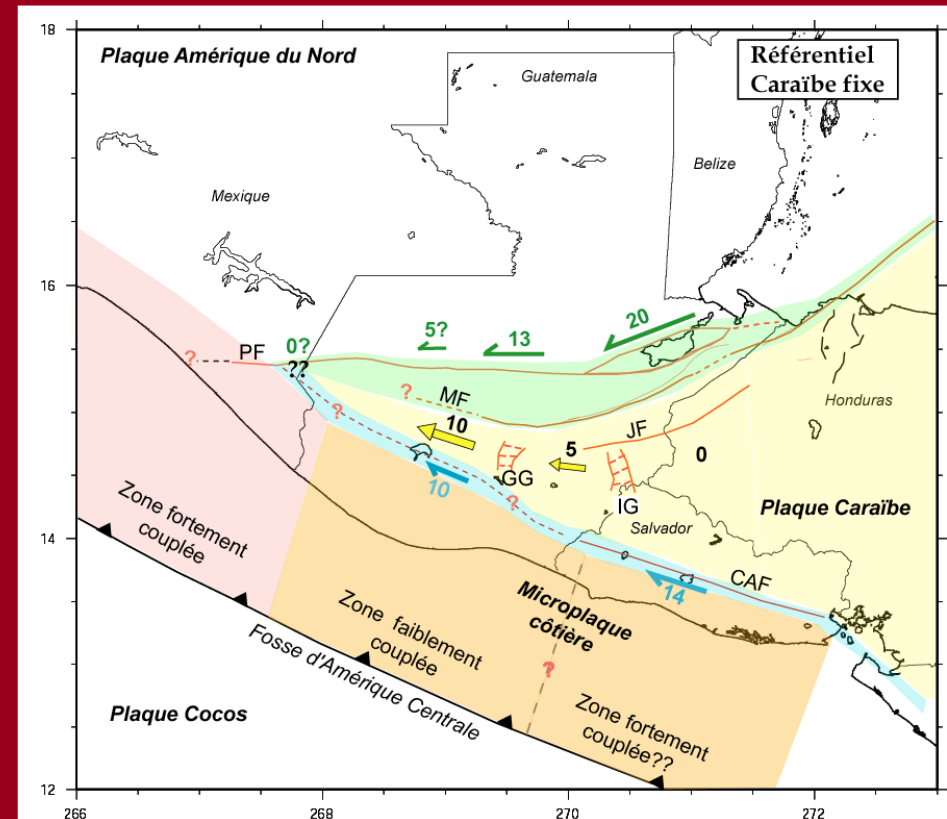
# Conclusions générales

- Extension Est-Ouest à travers les grabens
  - Estimation  $\sim 10\text{mm.an}^{-1}$
  - Répartie entre les grabens de Guatemala-city et d'Ipala



# Conclusions générales

- Mouvement dextre observé à travers l'arc volcanique:
  - Localisé sur une faille bloquée?
  - Rotation du micro-bloc arc?
  
- Variations du couplage le long de la subduction (Chiapas/Guatemala/Salvador?):
  - Permanentes?
  - Transitoires?



# Perspectives

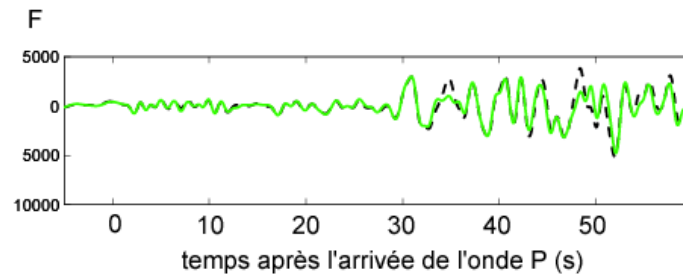
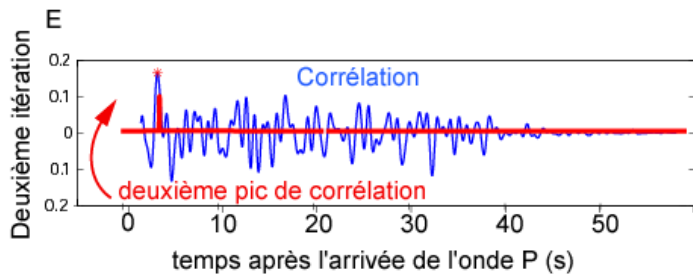
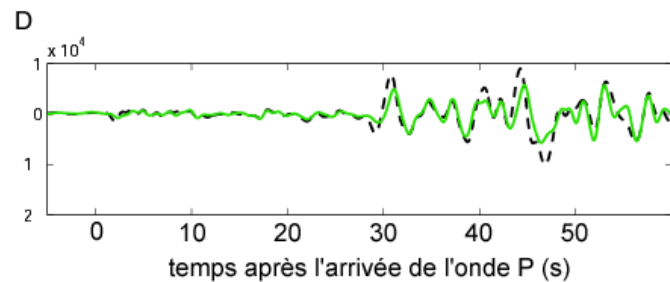
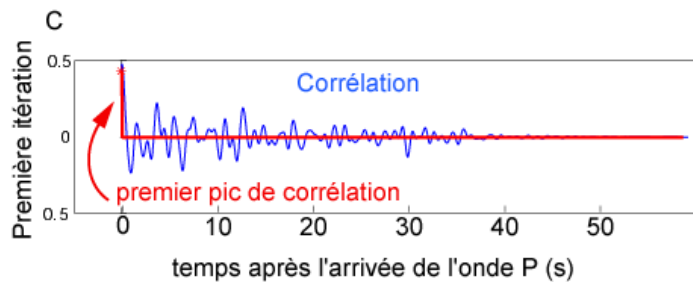
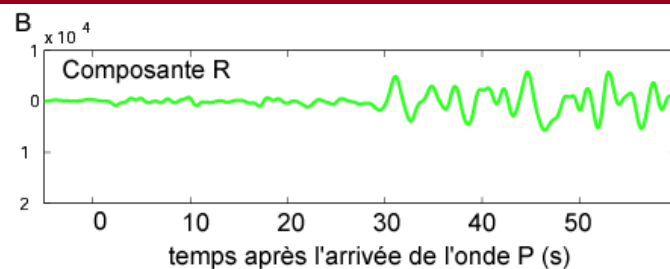
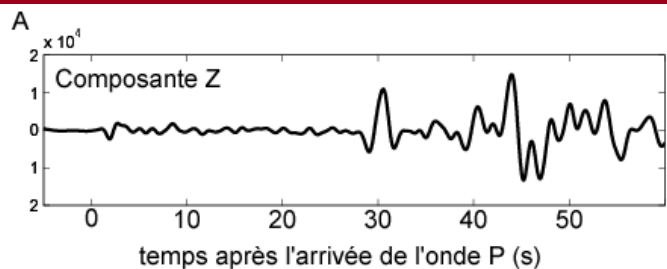
- Densification des points de mesure (GPS, InSAR-ALOS)
- Complément de l'étude des structures en profondeur (tomographie)
- Etude du comportement long terme des failles (tectonique et paléosismologie)
- Projet à l'échelle régionale (Mexique, Guatemala, Salvador, Honduras)



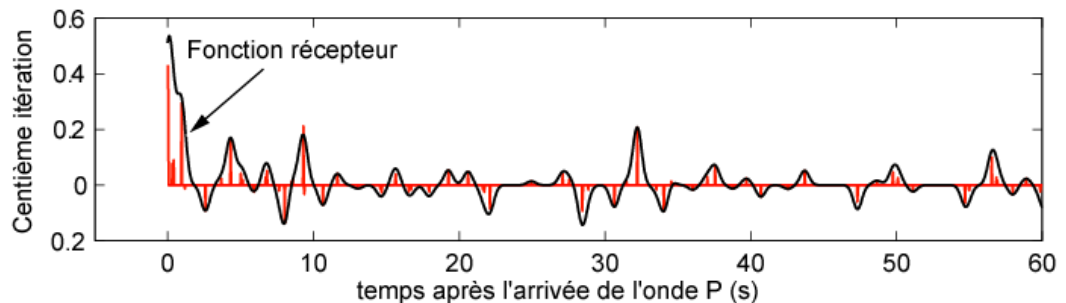




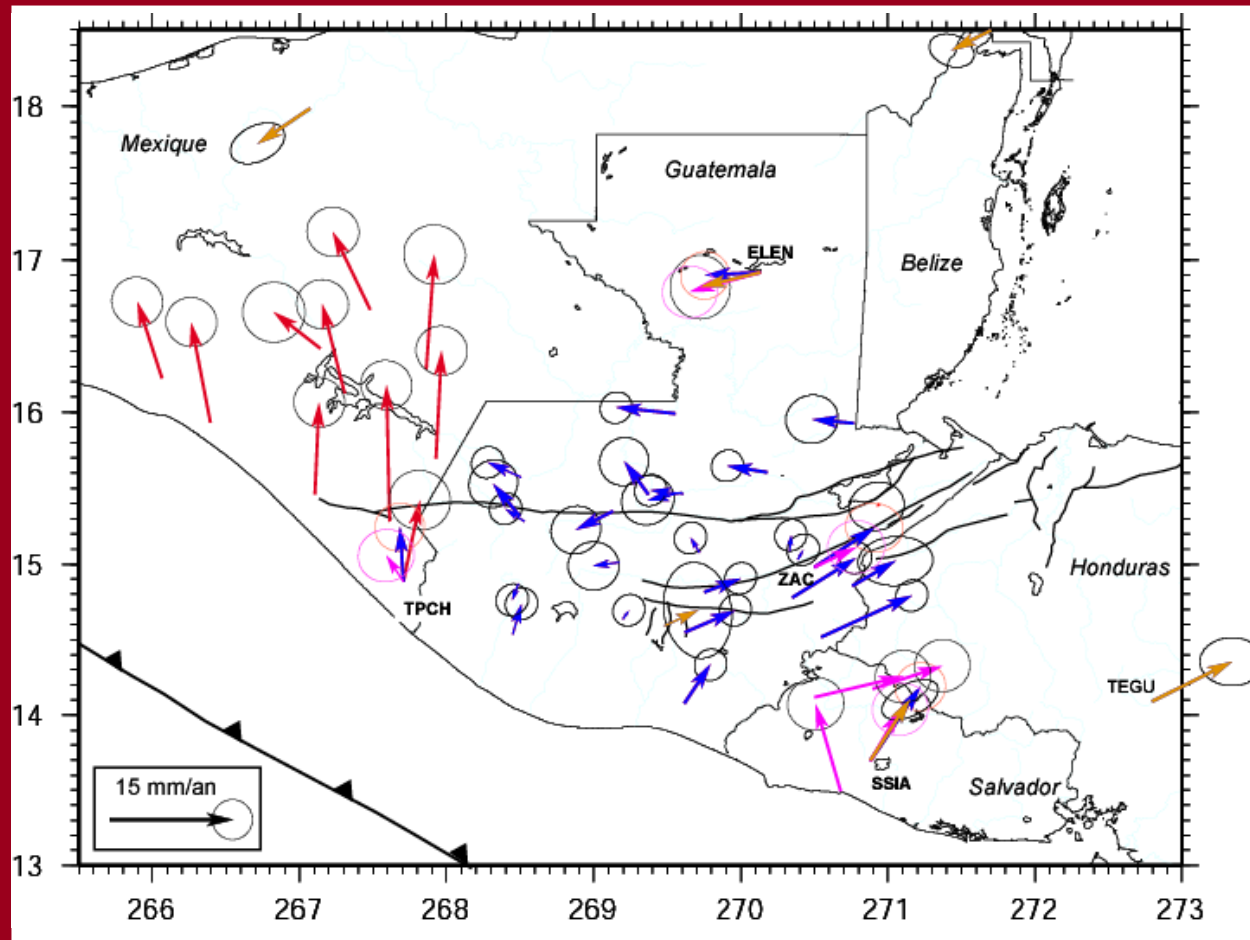
# Exemple de déconvolution (*Ligorria et Ammon, 1999*)



(...)



# Solution des trois sous-réseaux dans le référentiel ITRF 2000



- Champ de vitesse Guatemala cohérent avec des données indépendantes issues des mesures de stations permanentes (*DeMets et al., 2006*).
- Ajustement 3 paramètres (rotation) des solutions Salvador et Chiapas par rapport à la solution Guatemala

# Les effets post-sismiques du séisme de 1976

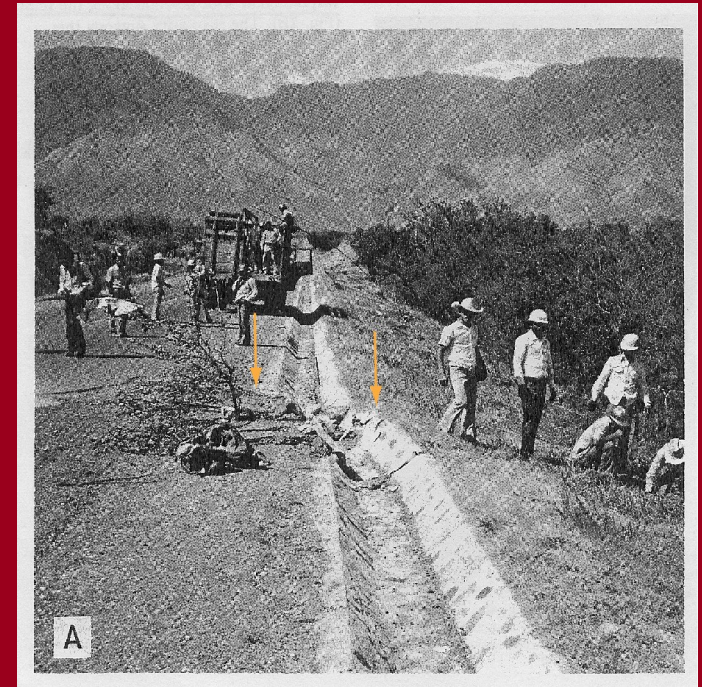
## ➤ Le séisme de 1976 ( $M_w \sim 7,5$ ):

- Rupture 200 km
- Glissement moyen  $\sim 1$  à 2 m (*Plafker, 1976*)

## ➤ Mesures GPS réalisées entre 23, 27 et 30 ans après le séisme

## ➤ Quels sont les mécanismes de déformation post-sismiques possibles ?

- Glissement asismique : localisé, observé après de quelques jours à quelques mois après le séisme de 1976 (*Bucknam & Plafker, 1978*)
- Effets poroélastiques: observés quelques mois à la suite d'un séisme (*Peltzer et al., 1998; Jonsson et al., 2003*)
- Relaxation viscoélastique: le temps de relaxation peut atteindre plusieurs dizaines d'années (*Kenner & Segall, 2000; Vergnolle et al., 2003*)



# Les effets post-sismiques du séisme de 1976

➤ Modèle 3 dimensions d'une couche sismogénique élastique sur un demi espace visqueux infini (*Yu et al., 1996*)

➤ Paramètres

- Milieu élastique:

$$E=30 \text{ km}, \mu=3.10^{10} \text{ N.m}$$

- Rupture

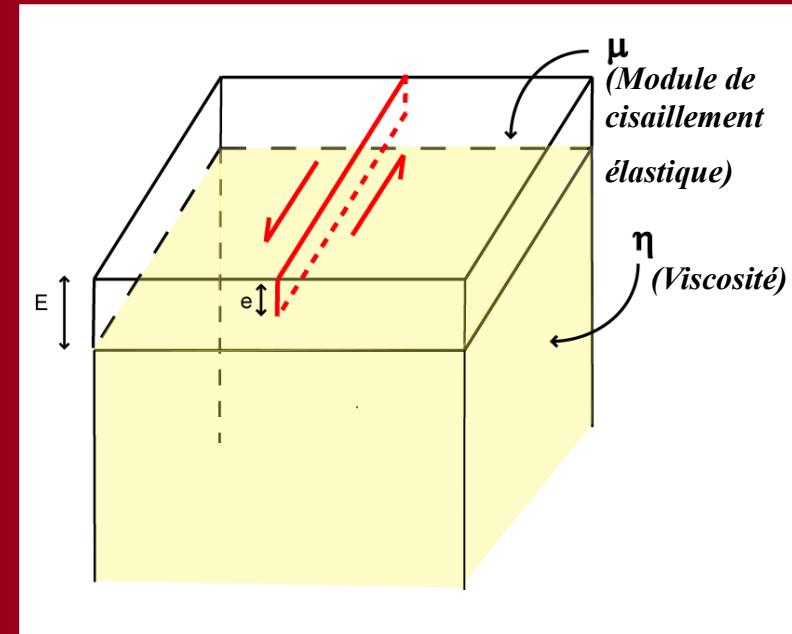
$$e=10 \text{ km}, D=1,4 \text{ m}$$

- Milieu visqueux

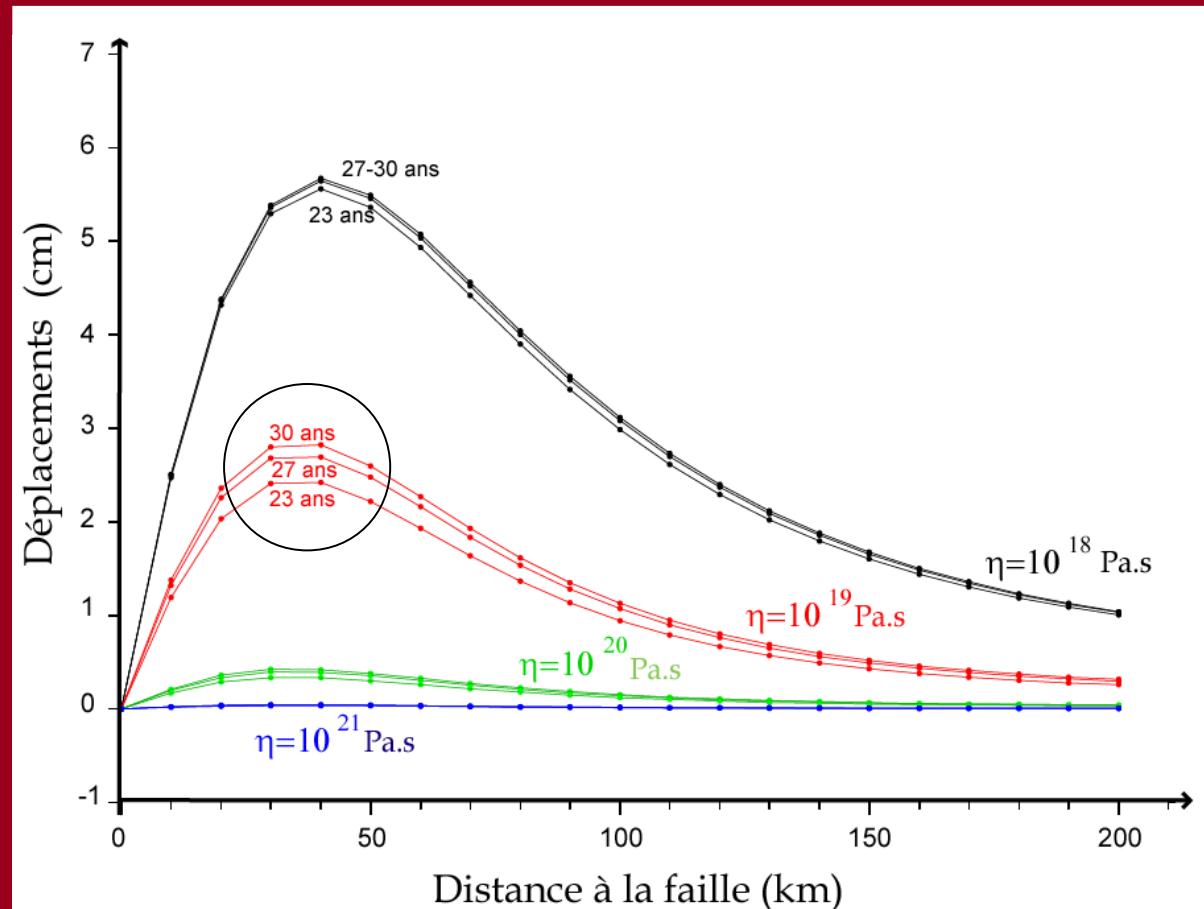
$$\eta \text{ comprise entre } 10^{18} \text{ et } 10^{21} \text{ Pa.s}$$

- Temps de relaxation

$$\tau = \frac{2 \eta}{\mu}$$



# Les effets post-sismiques du séisme de 1976



Les éventuels effets post-sismiques n'excèdent pas  $0,1 \text{ cm.an}^{-1}$

