



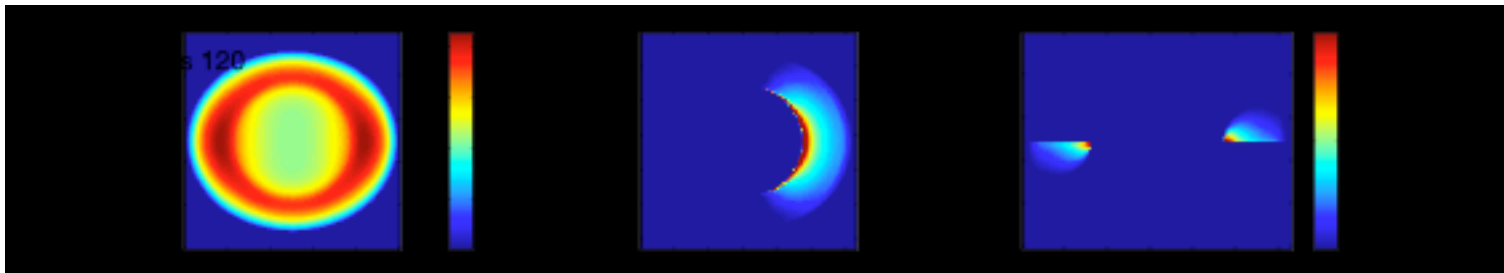
Vers l'arrêt spontané de la rupture en dynamique de la source : non-élasticité du milieu et loi de friction hétérogène

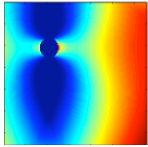
Thèse de doctorat de l'université Joseph Fourier

présentée par :

Sébastien Hok

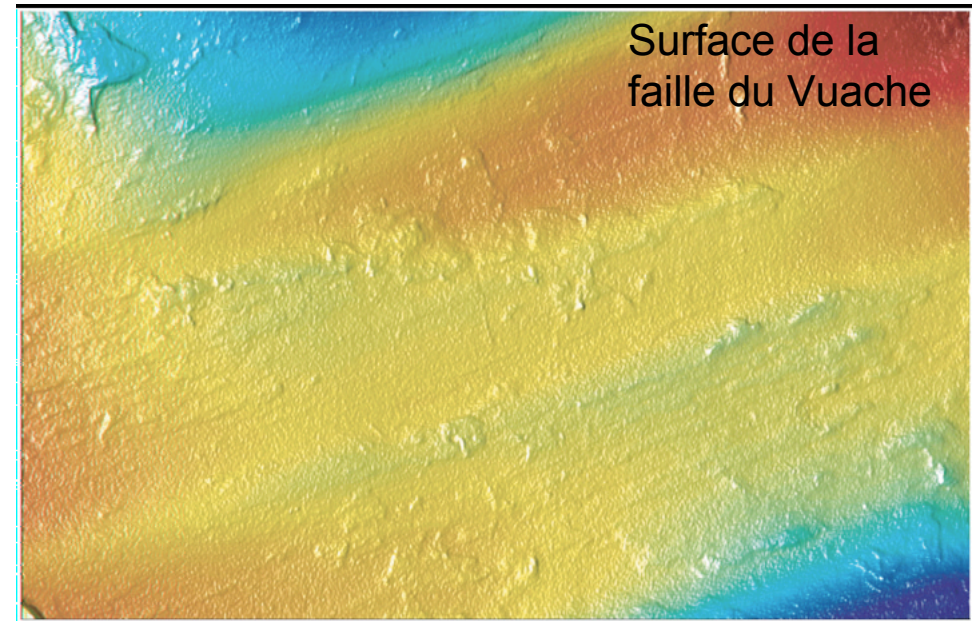
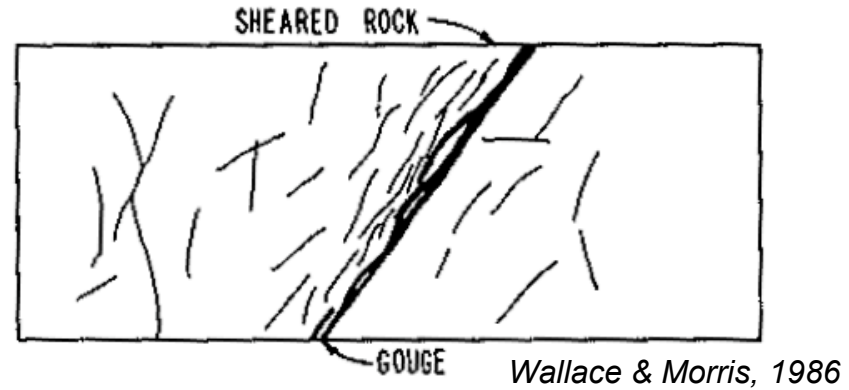
co-dirigée par Fabrice Cotton & Michel Campillo



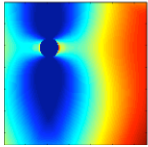


Introduction

1. Les failles : endommagement du volume et rugosité

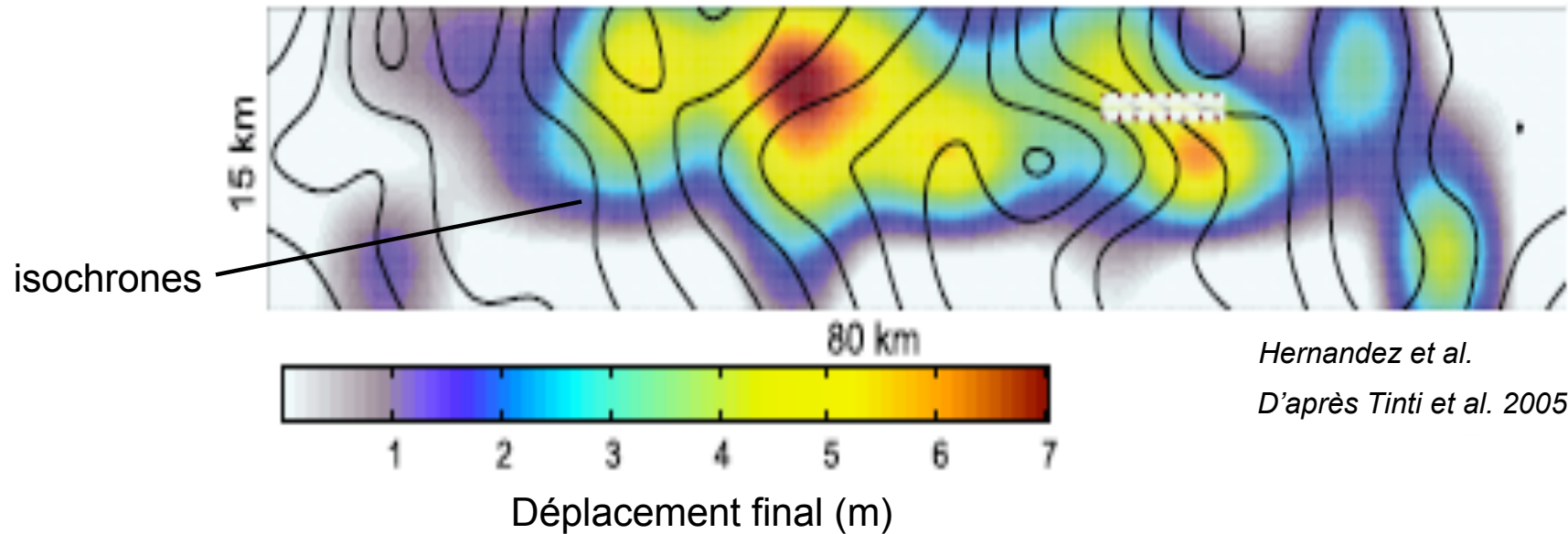


Renard et al., 2006



Introduction

2. L'hétérogénéité des tremblements de terre

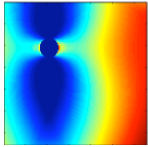


Hernandez et al.

D'après Tinti et al. 2005

L'imagerie de la rupture sismique révèle une forte hétérogénéité :

- du glissement sur la faille (aspérités / barrières)
- de vitesse de rupture (jusqu'à *supershear*)

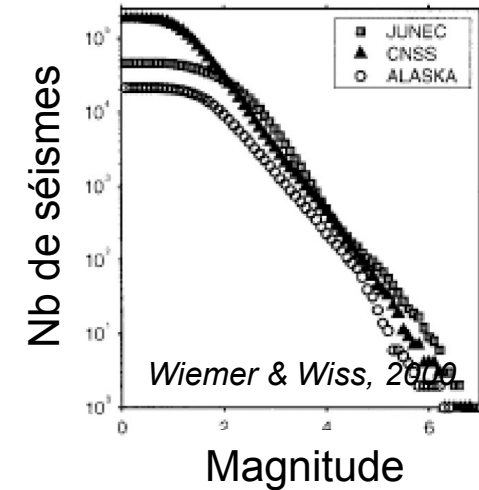
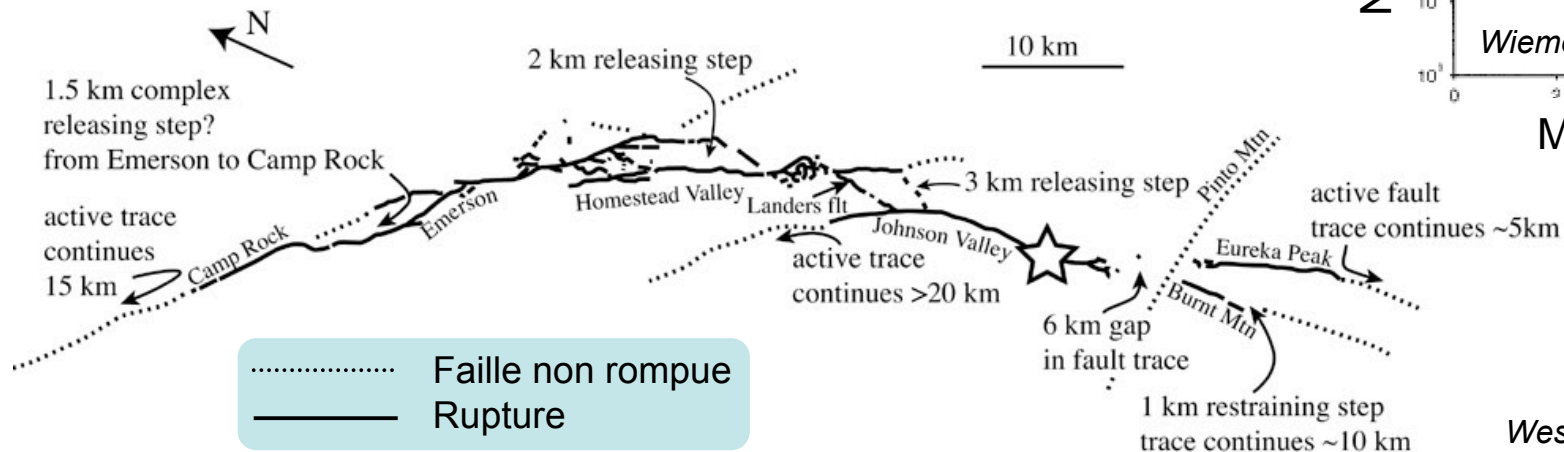


Introduction

Pour quelle(s) raison(s) un séisme s'arrête-t-il ?

Des séismes de toutes les tailles...

Qui s'arrêtent à divers endroits des failles :



Wesnousky, 2006

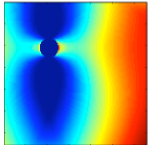
Qu'est ce qui gouverne l'arrêt des tremblements de terre ?

Quel est le rôle de l'endommagement du milieu autour des failles ?

Quel est le rôle de l'hétérogénéité spatiale ?

Quel est le rôle des barrières ?

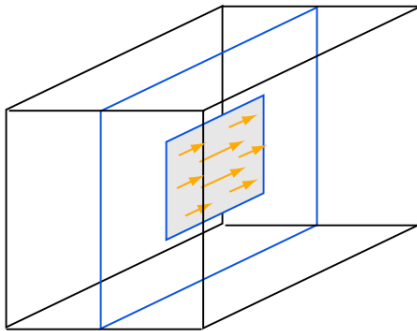
Quel est le rôle de la segmentation ?



Introduction

L'outil : un modèle de rupture dynamique

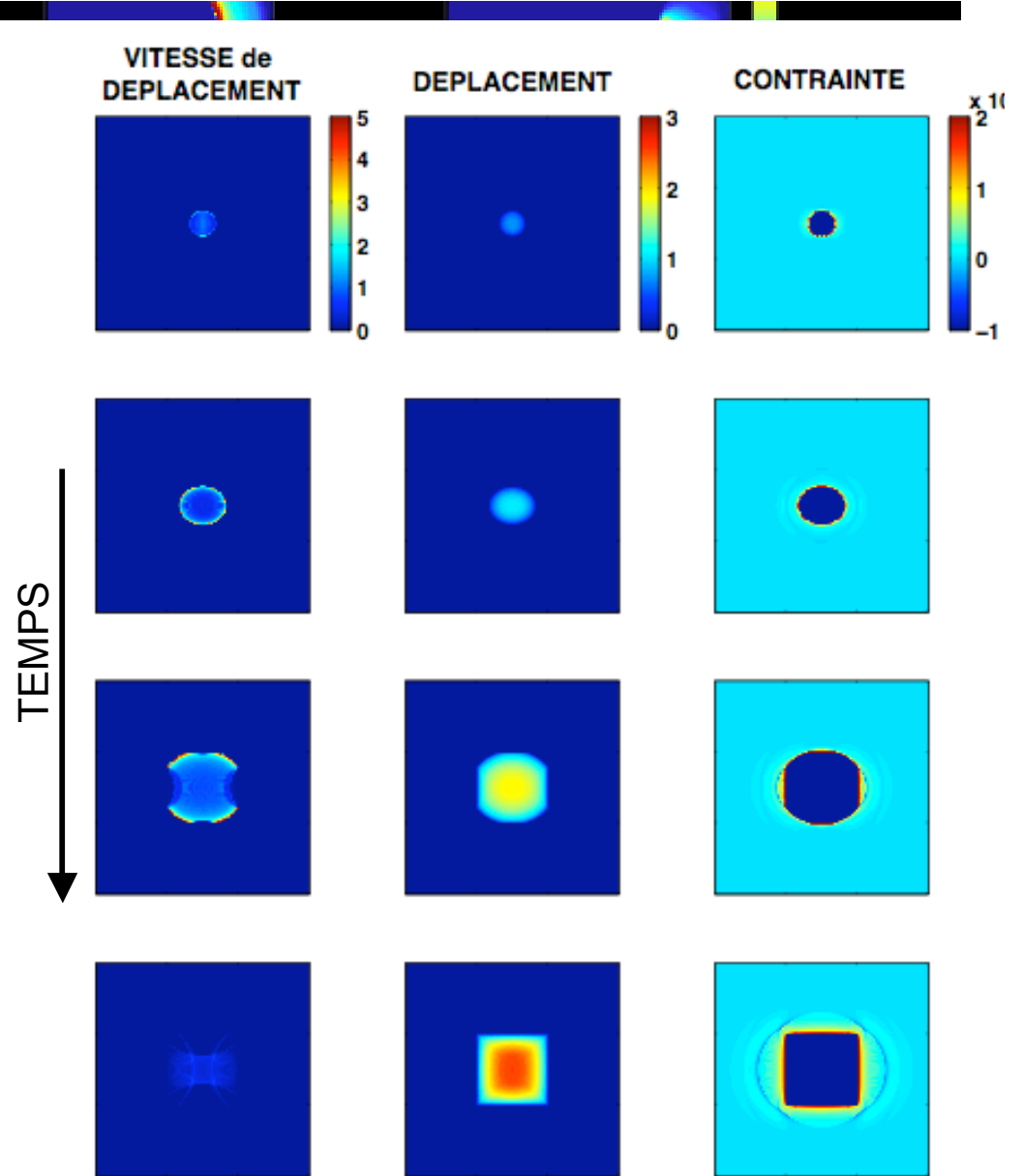
Simuler la propagation spontanée de la rupture sismique sur une faille :

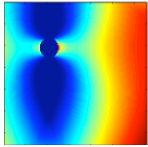


Champs calculés sur la faille :

- Variations de contraintes
- Vitesse de dislocation
- Dislocation

BUT : tenir compte des observations...





Plan de la soutenance de thèse

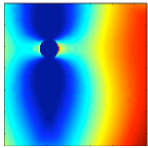
Introduction

I. Effet de l'endommagement du milieu entourant la faille sur la rupture

II. Effets d'une hétérogénéité spatiale sous forme de petites barrières

III. Effets de la segmentation : loi d'échelles et dynamique

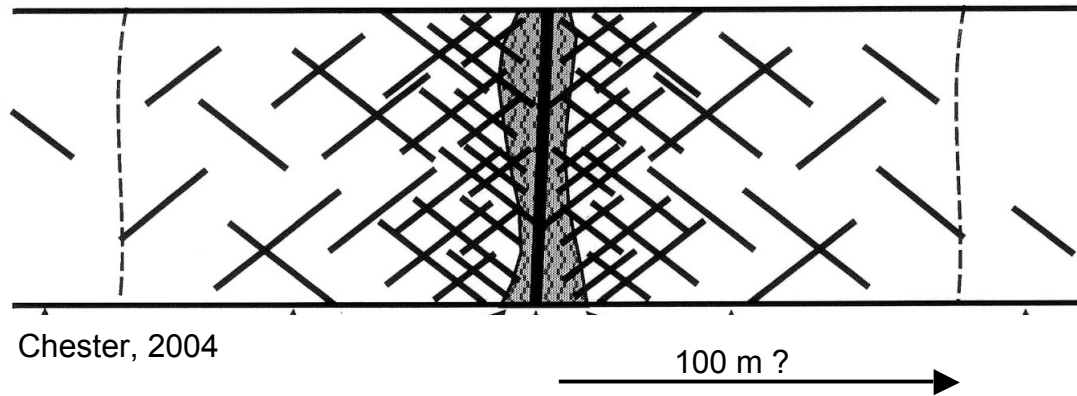
Conclusion et Perspectives



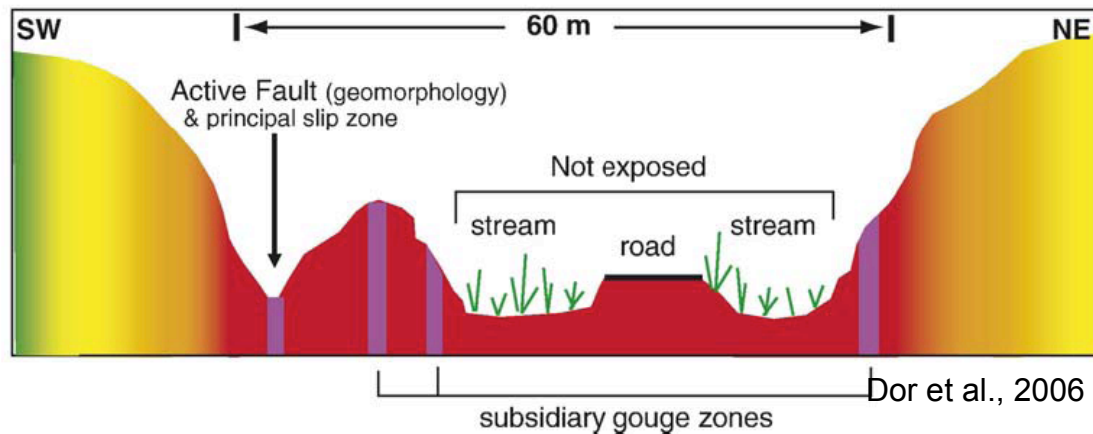
Endommagement du milieu entourant la faille



Fault Zone Structure



Chester, 2004

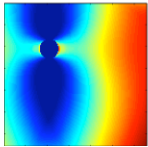


Zone de faille :
nombreuses fractures et
matériau endommagé.

Enormes variations de
contraintes dynamiques
lors du passage du front de
rupture.

Comment la rupture se
propage-t-elle dans un tel
milieu ?

← endommagement →

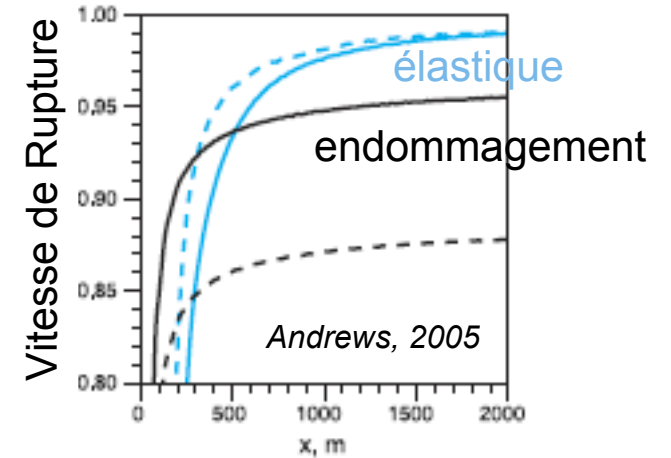


Endommagement du milieu entourant la faille

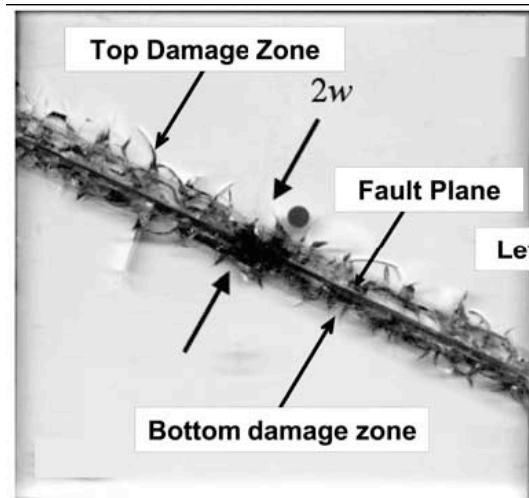


Études précédentes :
Effets sur la vitesse de propagation de la rupture

Travaux numériques
2D-plan :

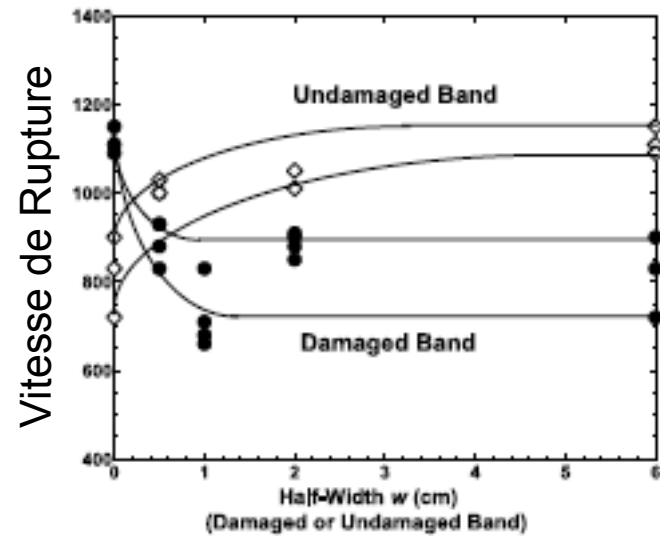


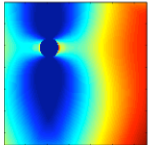
Travaux analogiques :



a

Biegel et al., 2006





Endommagement du milieu entourant la faille

Code de calcul



Code de rupture 3D/2D développé par Pascal Favreau

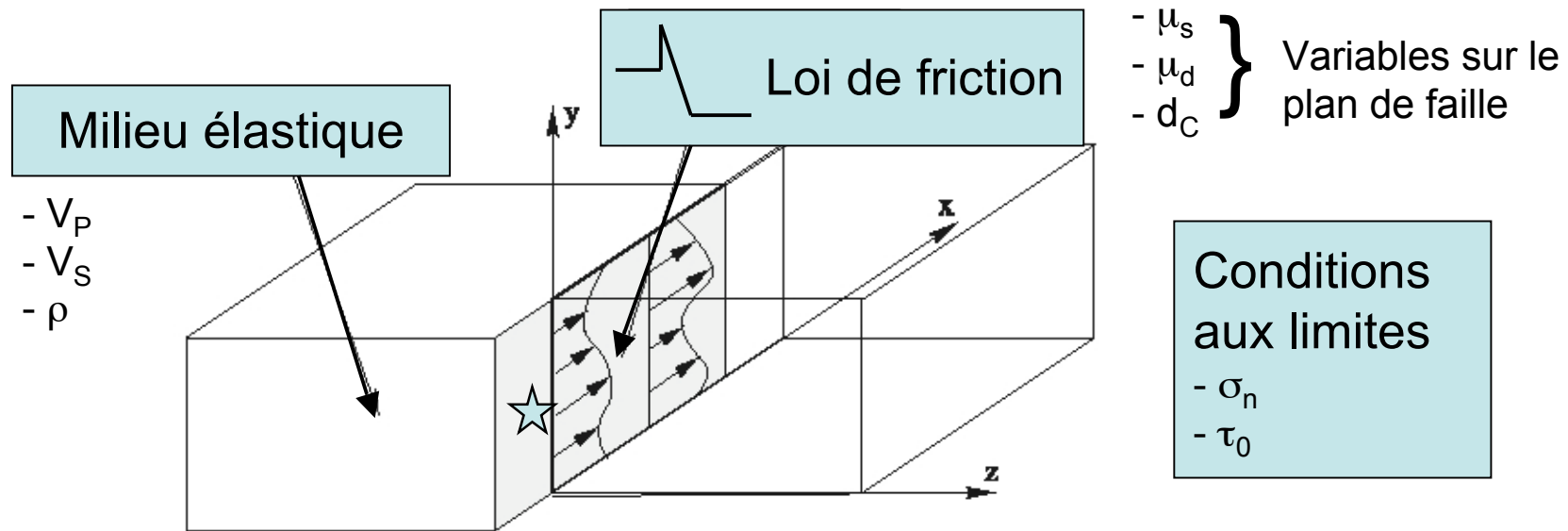
Résolution des équations de l'élastodynamique 3D

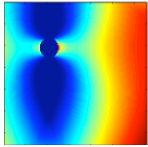
Loi de Hooke : $\tau_{ij} = \lambda u_{k,k} \delta_{ij} + \mu(u_{i,j} + u_{j,i})$

Loi de la dynamique : $\rho \ddot{u}_i = \tau_{ij,j} + f_i$

Schéma numérique en différences finies (ordre 4 en espace, ordre 2 en temps) : Grille décalée

Bords du modèles : absorbants (PML) et surface libre

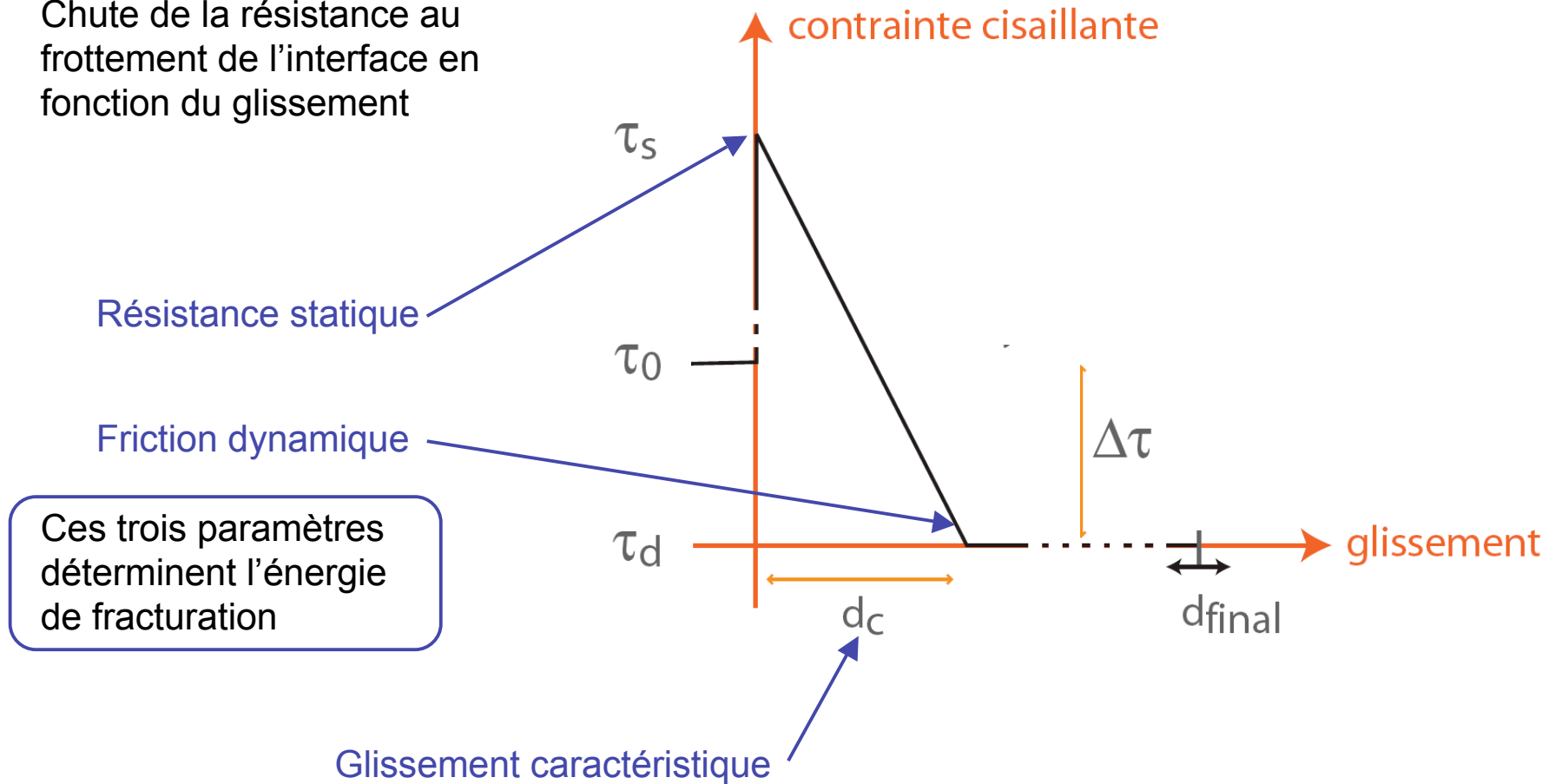


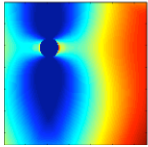


Endommagement du milieu entourant la faille

La loi de friction d'affaiblissement avec le glissement

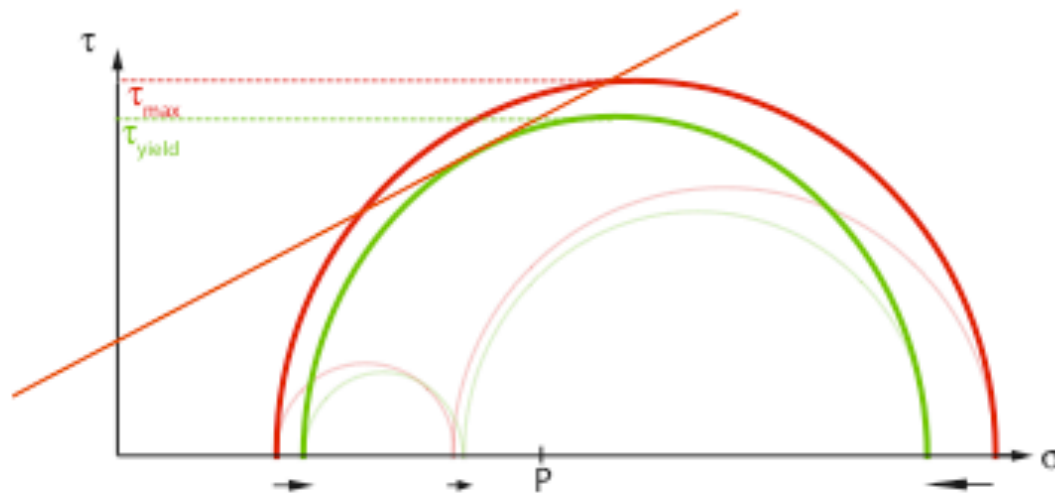
Chute de la résistance au frottement de l'interface en fonction du glissement





Endommagement du milieu entourant la faille

Limite élasto-plastique dans le milieu



L'endommagement se produit par fracturation.

On inclus un seuil de rupture dans le milieu : critère de Mohr-Coulomb.

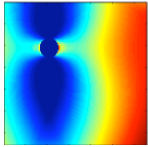
⇒ On limite le comportement élastique aux faibles valeurs de contraintes déviatoriques.

Le milieu devient plastique. Une partie de l'énergie radiée est ainsi dissipée dans les processus inélastiques

Démarche suivie :

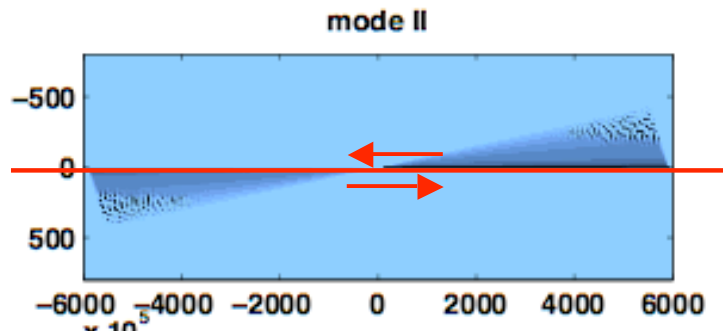
Calculs 2D : compréhension du phénomène + validation du modèle

Calculs 2D antiplan et calcul 3D : approche nouvelle

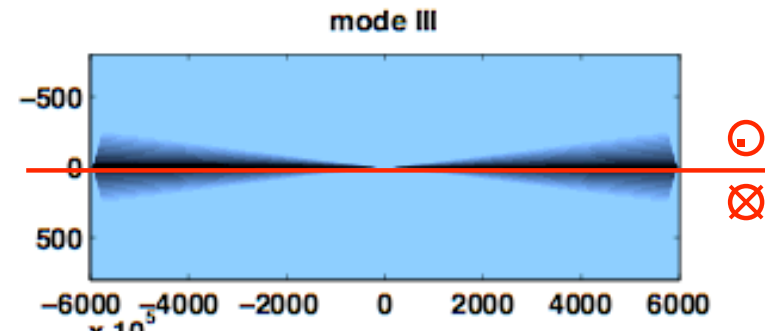


Endommagement du milieu entourant la faille

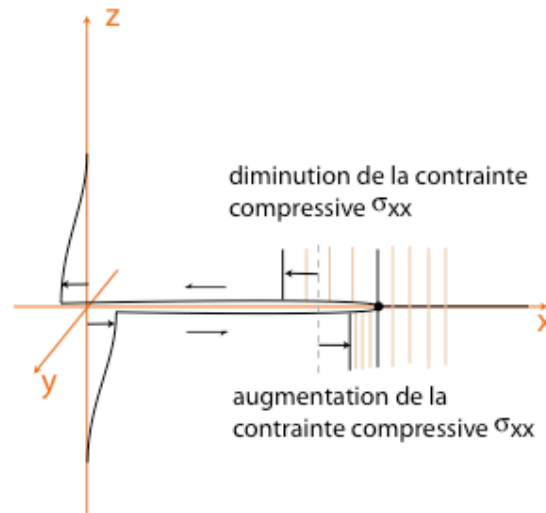
1. Une localisation différente selon le mode de rupture



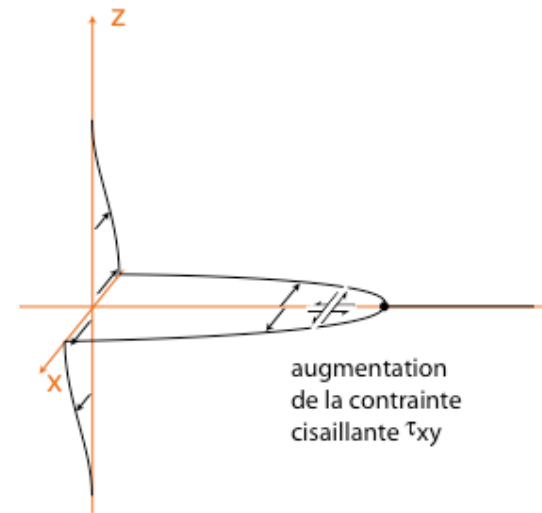
Asymétrie en 2D plan (mode II)



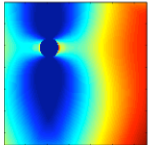
-- Symétrie en 2D anti-plan (mode III)



Mode II

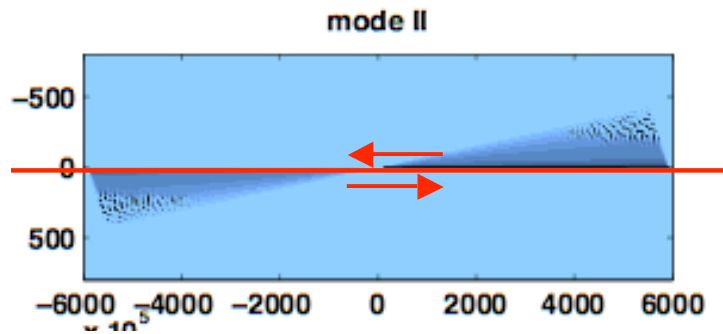


Mode III

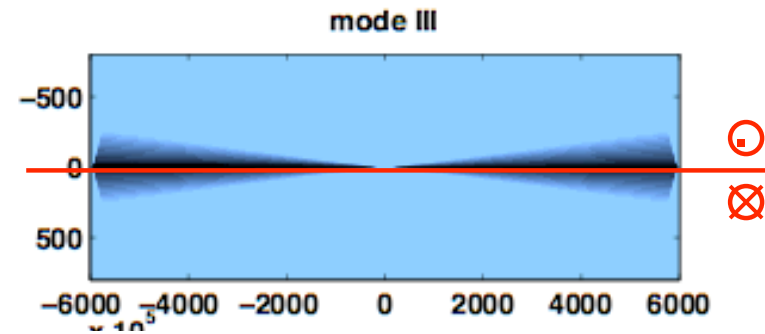


Endommagement du milieu entourant la faille

1. Une localisation différente selon le mode de rupture

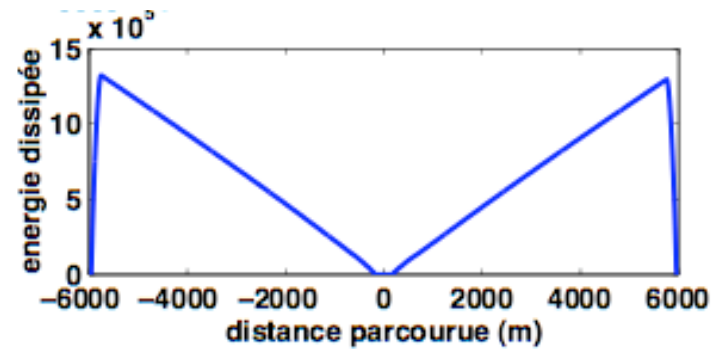
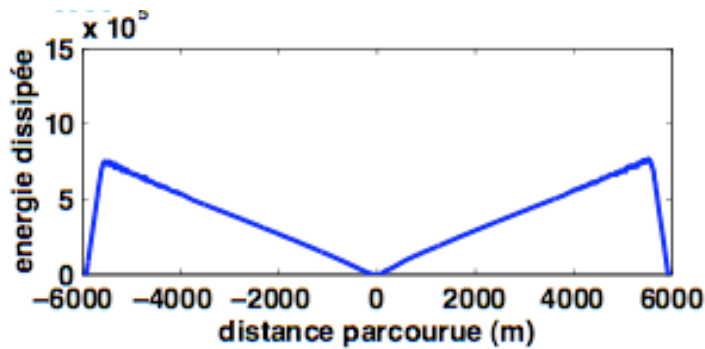


Asymétrie en 2D plan (mode II)

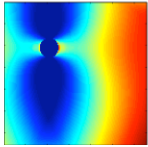


Symétrie en 2D anti-plan (mode III)

Quantité d'énergie dissipée du même ordre de grandeur :



Elle croit linéairement avec la taille de la rupture, de même que la largeur de la zone endommagée.

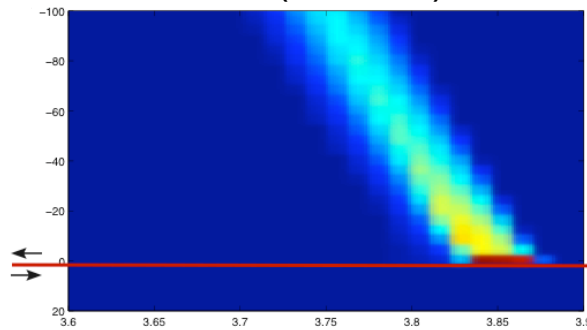


Endommagement du milieu entourant la faille

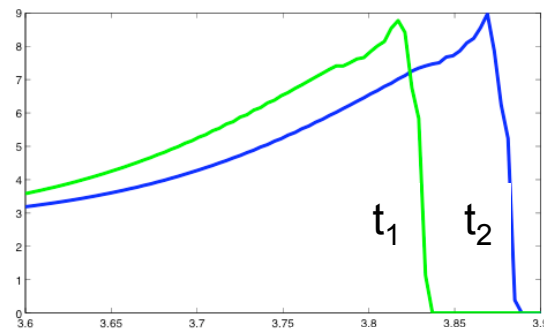
2. Quand l'endommagement se produit-il ?



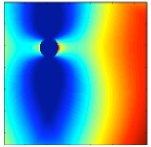
Localisation latérale de l'endommagement instantané (mode II)



Vitesse de glissement



La fracturation à l'extérieur se produit de façon synchrone de la phase d'affaiblissement en tête de rupture (forte variation des contraintes).



Endommagement du milieu entourant la faille

3. Effets cinématiques

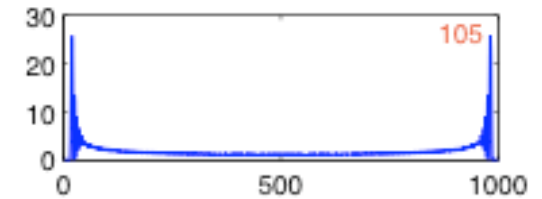
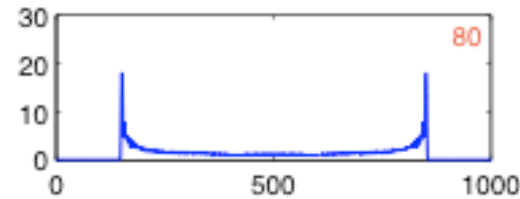
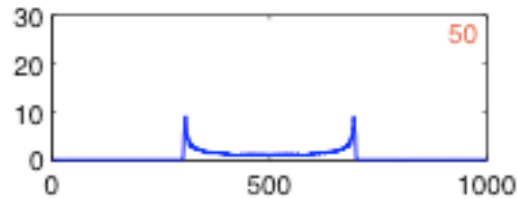


temps

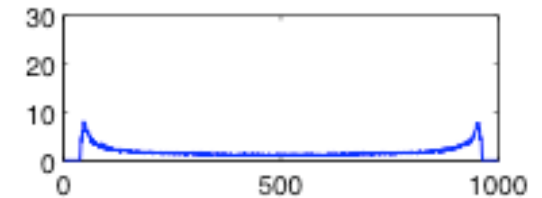
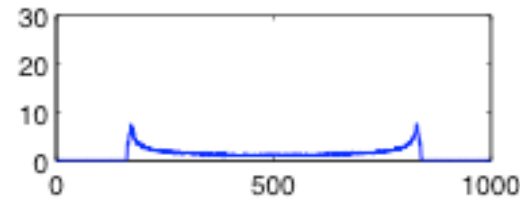
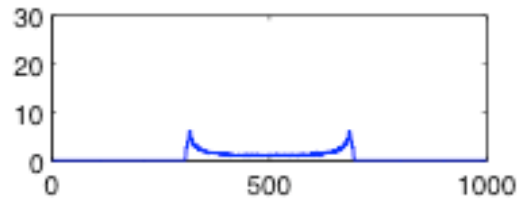
Vitesse de glissement sur la faille



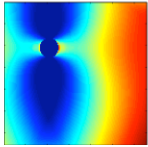
Élastique



Plastique

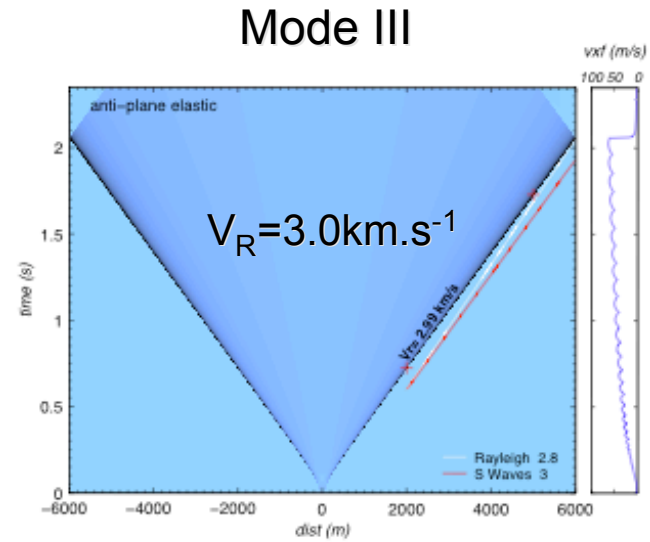
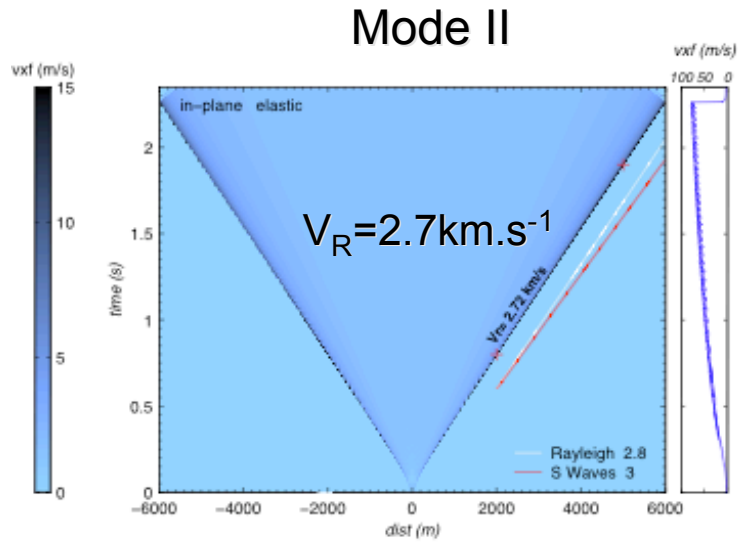


=> Saturation de la vitesse de glissement, en mode III comme en mode II

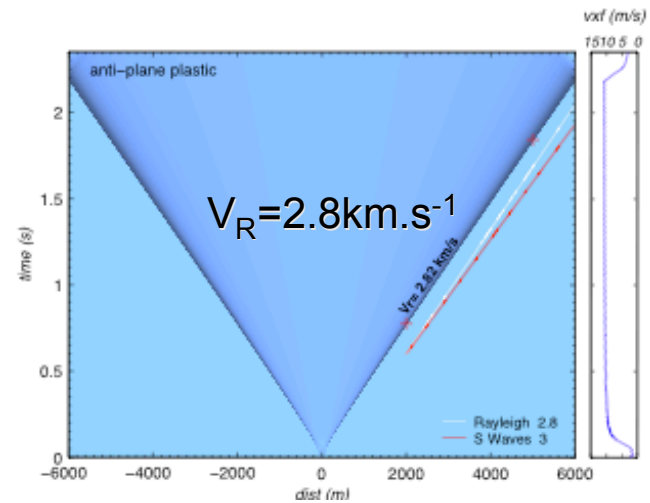
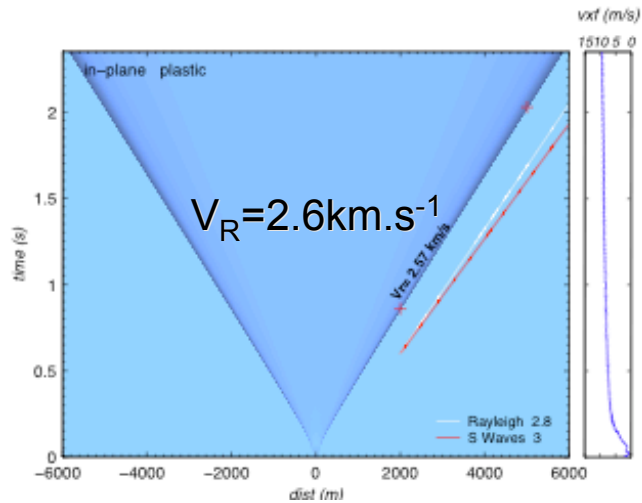
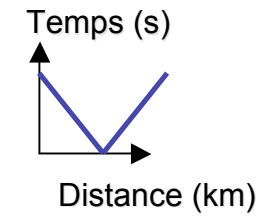


Endommagement du milieu entourant la faille

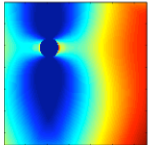
3. Effets cinématiques



Modèle élastique

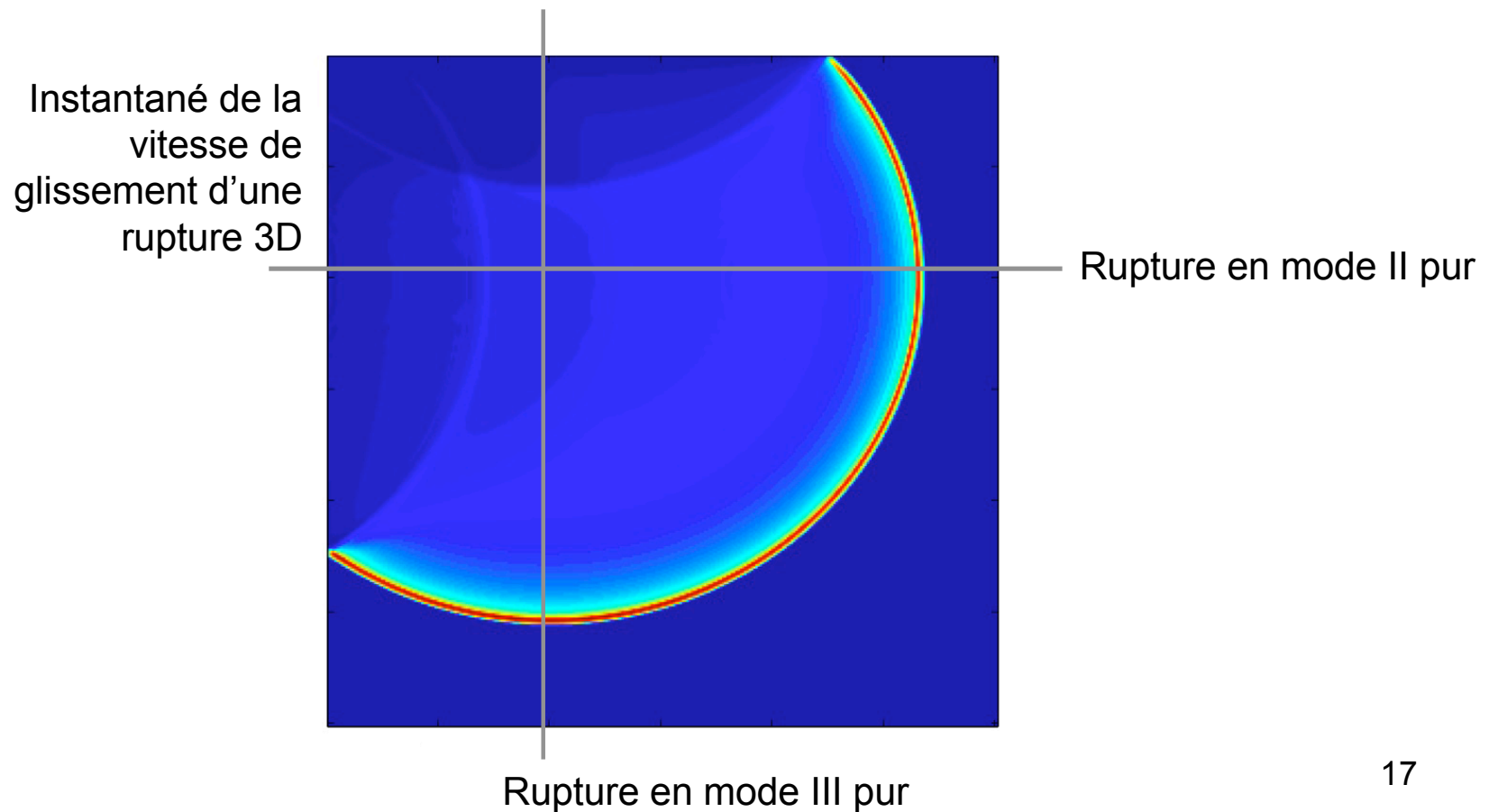


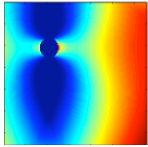
Modèle plastique



Endommagement du milieu entourant la faille Modèles 3D

Dans les cas 2D, une direction de l'espace est invariante.
Ils constituent la préparation à la mise en place de modèles 3D plus réalistes,
où la faille a une dimension spatiale finie.





Endommagement du milieu entourant la faille

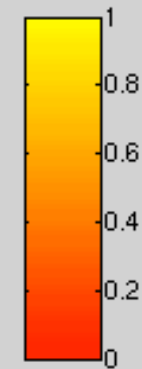
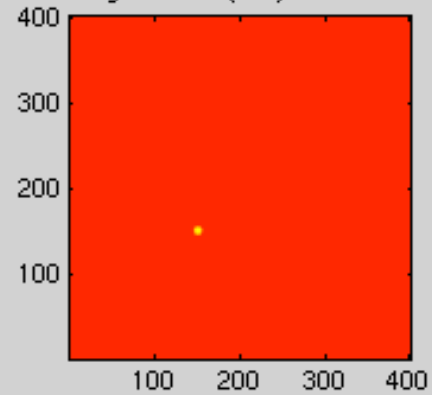
Modèles 3D : cinématique modifiée



Vitesse de glissement sur la faille

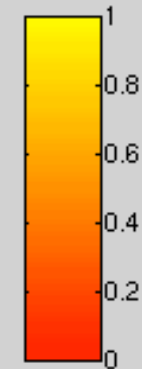
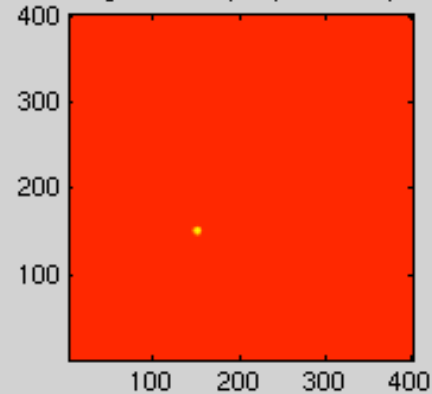
Elastique

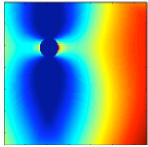
vitesse de glissement (m/s) - modele elastique



Plastique

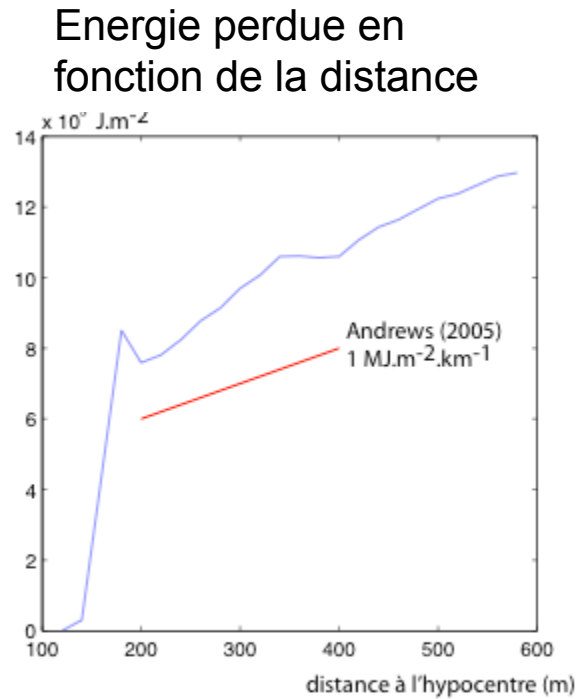
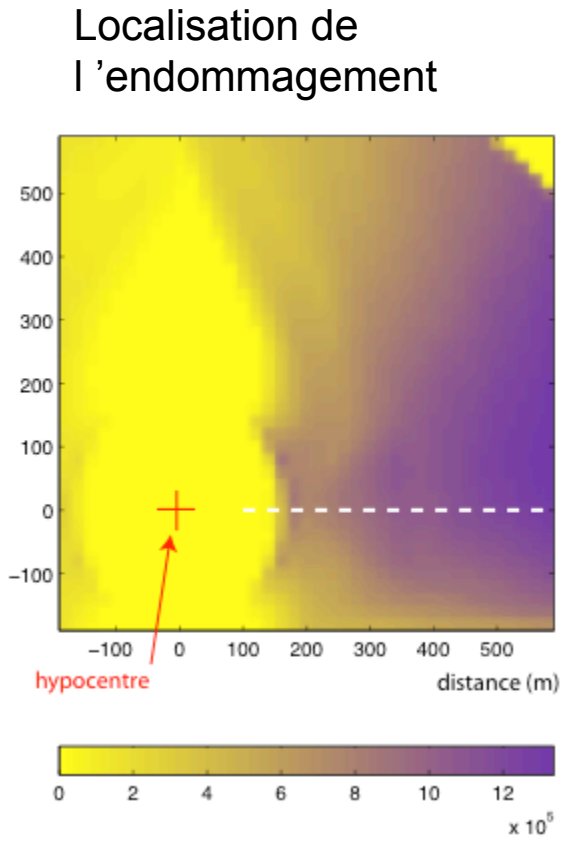
vitesse de glissement (m/s) - modele plastique



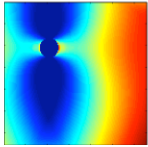


Endommagement du milieu entourant la faille

Modèles 3D : localisation anisotrope

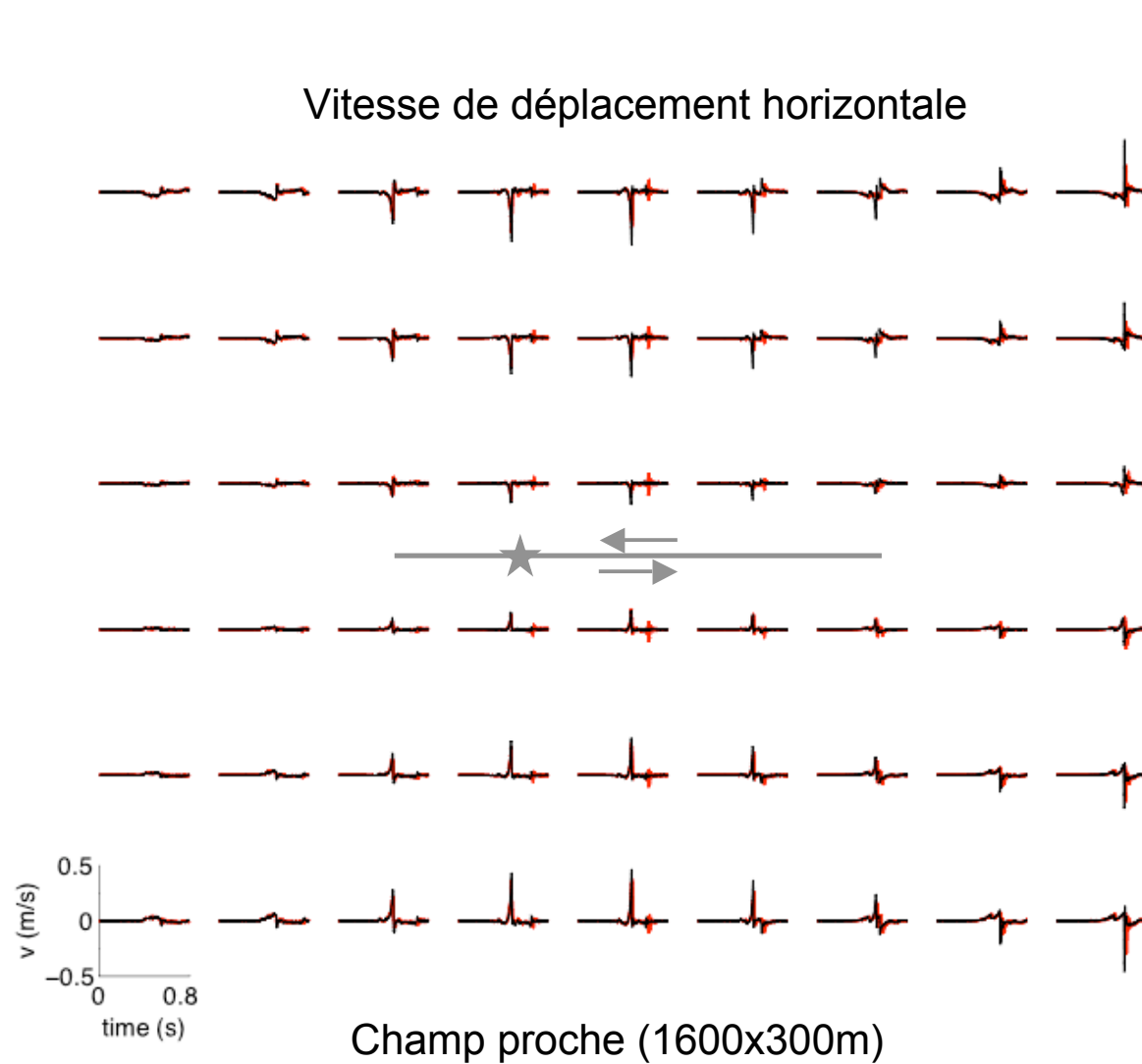


L'énergie dissipée augmente autant que dans le cas 2D, mais l'endommagement est préférentiellement réalisé en mode II

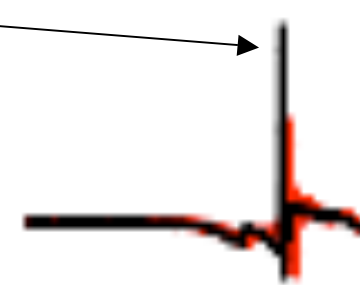


Endommagement du milieu entourant la faille

Modèles 3D : mouvement du sol réduit



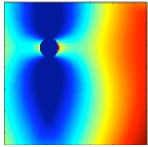
élastique
plastique



Réduction des pics de **vitesse** : jusqu'à 20% de moins dans le cas plastique à 25Hz.

Réduction des pics d'**accélération** : jusqu'à 30% de moins dans le cas plastique à 25Hz.

L'ampleur de la réduction observée dépend de la **fréquence** de filtrage.

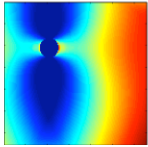


Endommagement du milieu entourant la faille Arrêt de la rupture ?



Pas d'arrêt spontané de la rupture lorsque la faille est lisse....

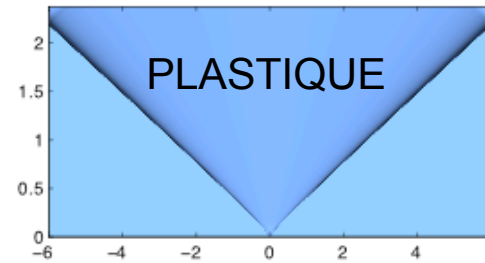
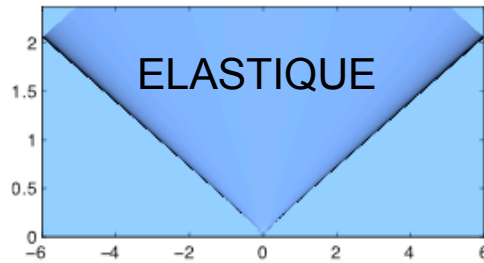
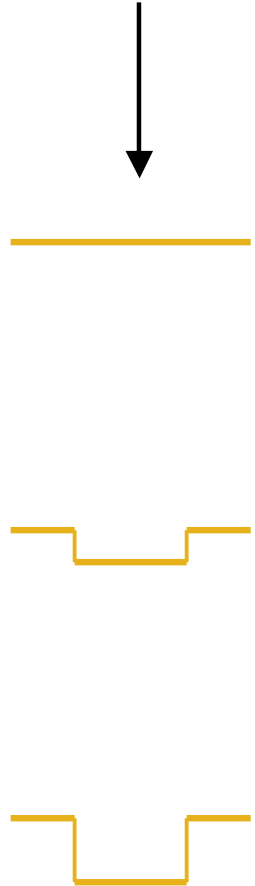
Que se passe-t-il lorsque les propriétés de friction de la faille varient spatialement en présence de l'endommagement ?...



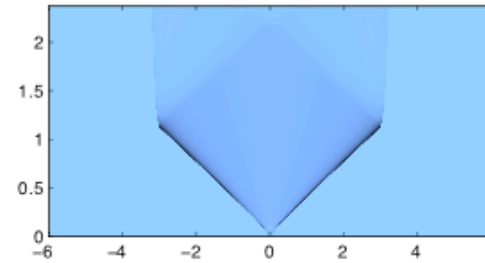
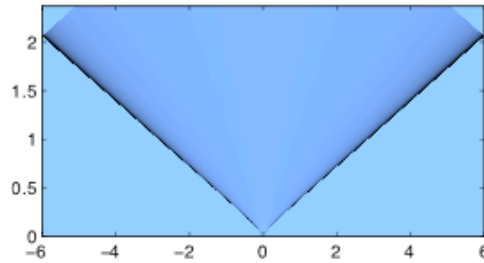
Endommagement du milieu entourant la faille

Franchissement des barrières

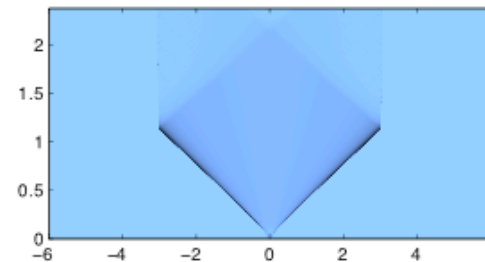
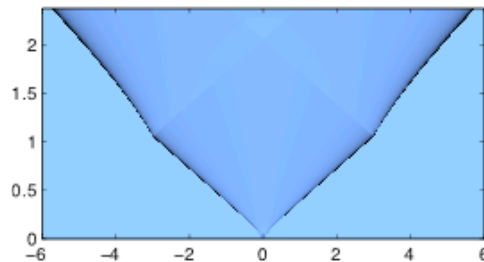
3 profils de résistance sur la faille



Temps (s)
Distance (km)

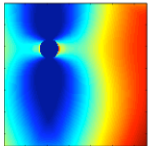


La plasticité du milieu rend les barrières beaucoup plus efficaces...



L'énergie absorbée à l'extérieur du plan de faille diminue l'énergie de la rupture

Vitesse de glissement

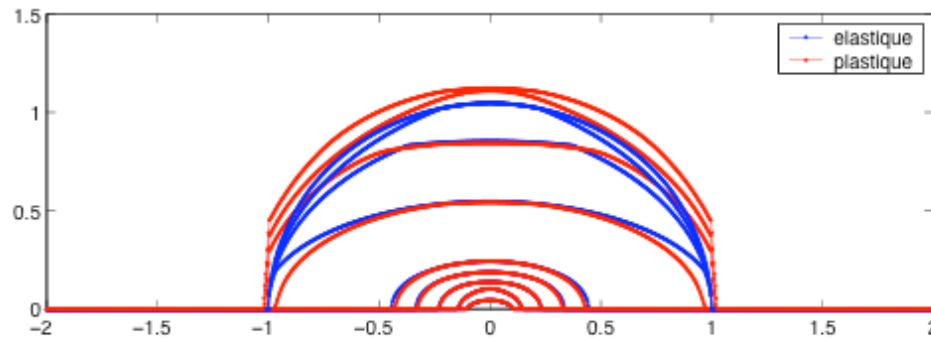


Endommagement du milieu entourant la faille

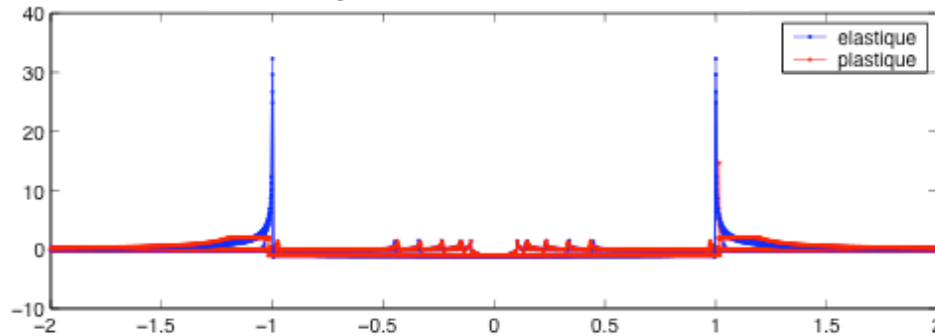
Glissement final



Glissement



Changement de contrainte

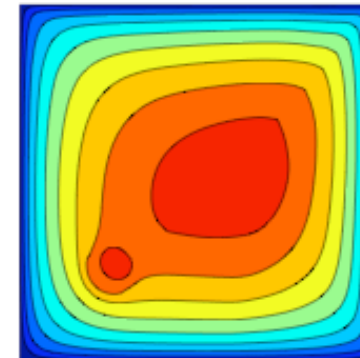


L'arrêt dans la barrière est progressif. =>
Effet sur la radiation

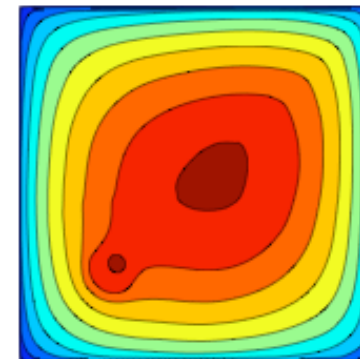
Le pic de contrainte résiduel produit
dans un milieu élastique est détruit.

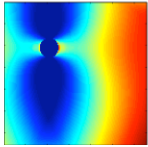
Glissement + grand dans le
cas plastique aussi en 3D

élastique



plastique





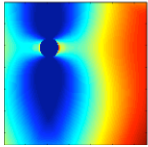
Endommagement du milieu entourant la faille

Conclusions



L'endommagement du milieu autour de la faille pendant la rupture :

- Modifie les caractéristiques cinématiques de la rupture (vitesse de rupture ↘ et vitesse de glissement maximum ↘)
- Réduit de l'amplitude du maximum de vitesse de déplacement et d'accélération du sol (aléa sismique)
- Facilite l'arrêt de la rupture sur une faille aux propriétés de résistance hétérogènes... ...Arrêt spontané ?



Plan de la soutenance de thèse

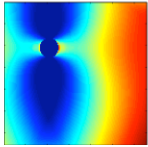
Introduction

I. Effet de l'endommagement du milieu entourant la faille sur la rupture

II. Effets d'une hétérogénéité spatiale sous forme de petites barrières

III. Effets de la segmentation : loi d'échelles et dynamique

Conclusion et Perspectives

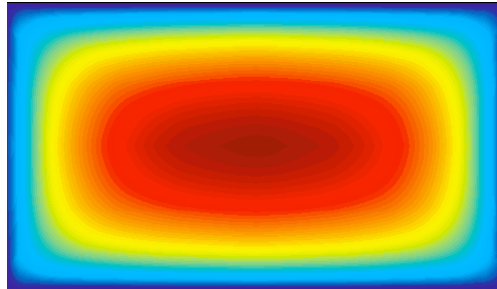


Rupture et hétérogénéité



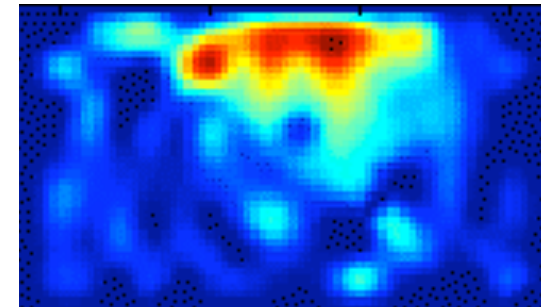
Distribution de glissement

Modèle homogène



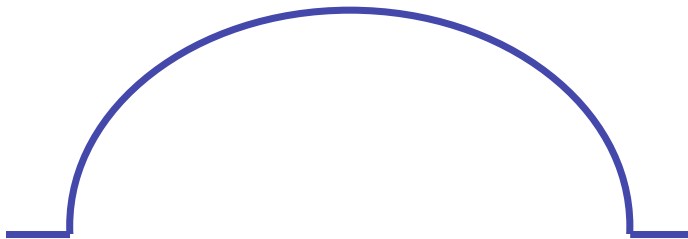
≠

Séisme

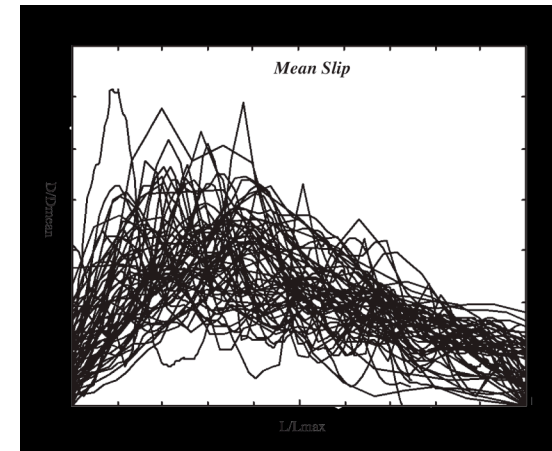


Semmane et al., 2005

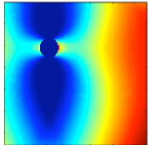
Profils de glissement



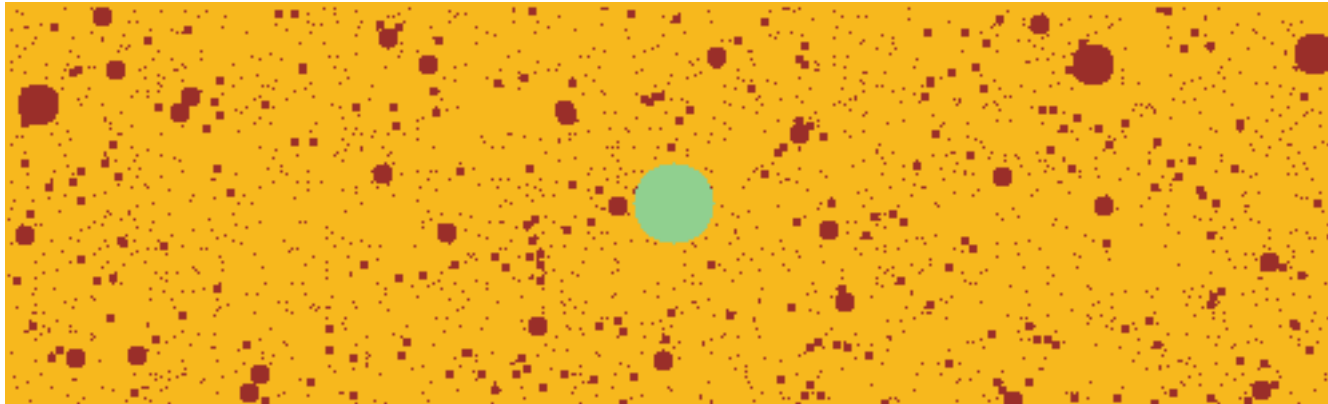
≠



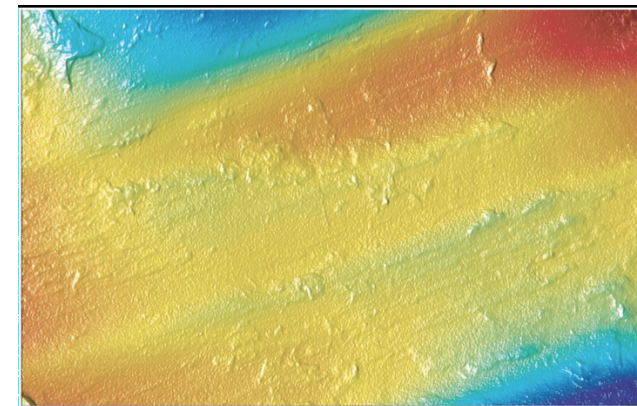
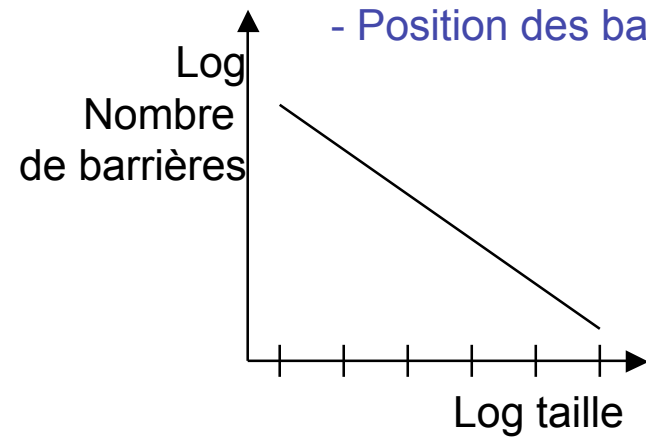
Manighetti et al., 2005



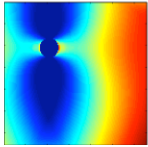
Rupture et hétérogénéité de barrières



- Points bloqués (résistance élevée) sur faille par ailleurs relativement lisse
- Distribution des barrières : loi puissance
- Position des barrières aléatoire



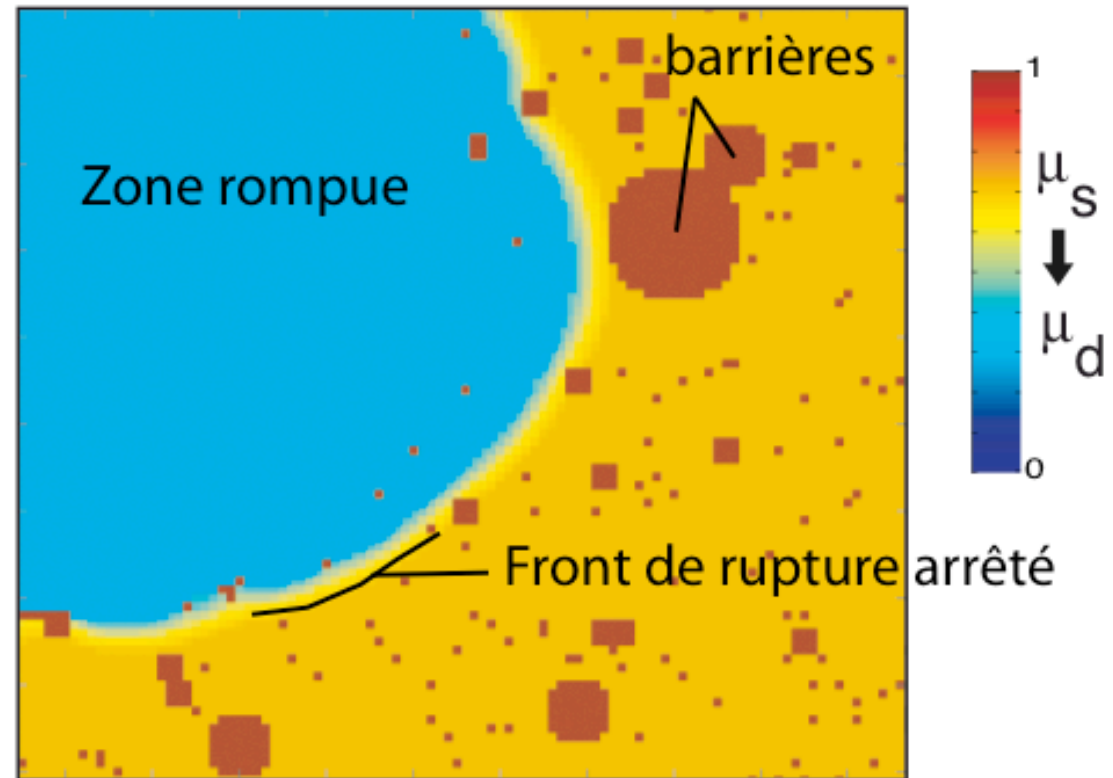
Renard et al., 2006

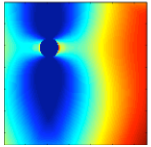


Rupture et hétérogénéité de barrières

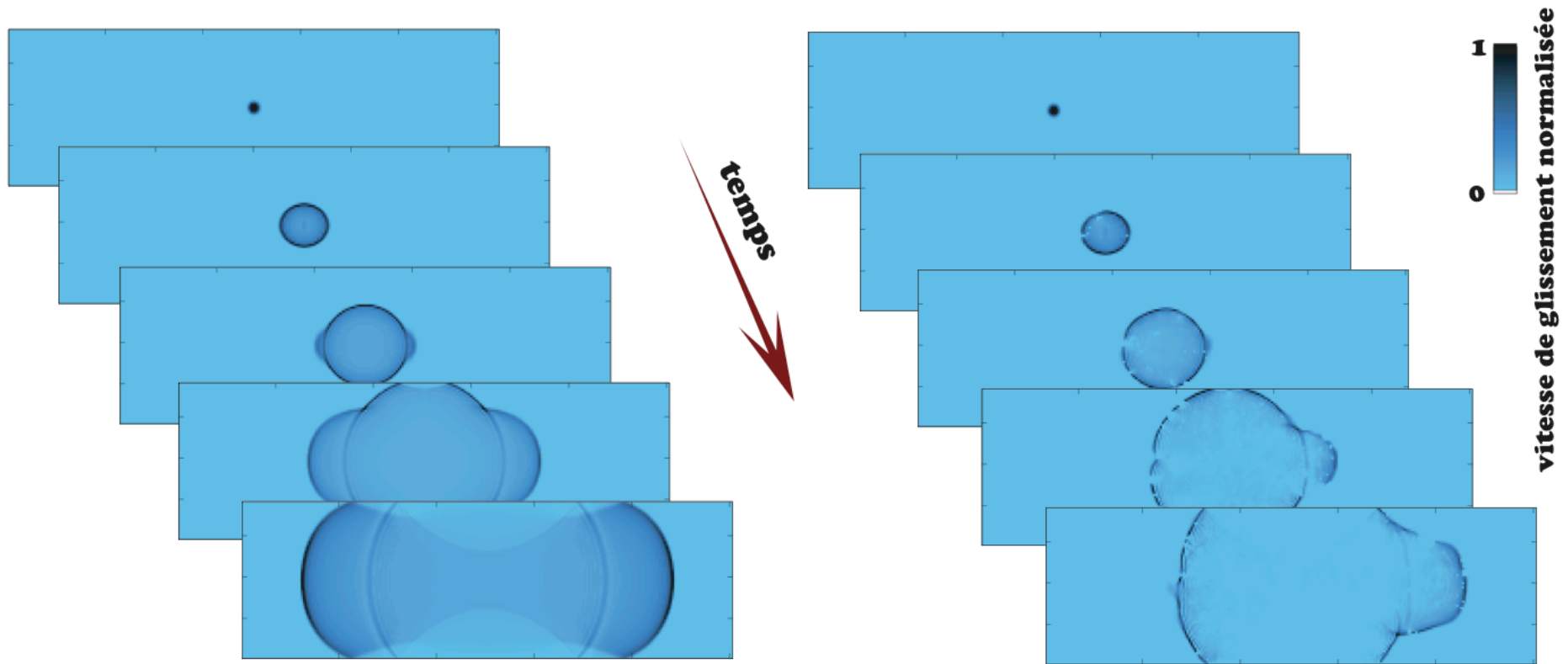


1ere conséquence :
arrêt spontané

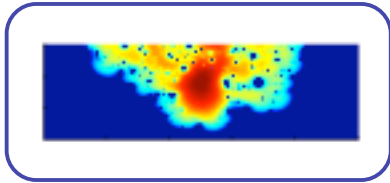




Rupture et hétérogénéité de barrières



2e conséquence : empêche une transition supershear ($V_R > V_S$)

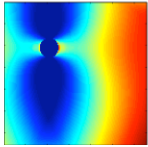


Rupture complexe :

- Pulses

- Redémarrages

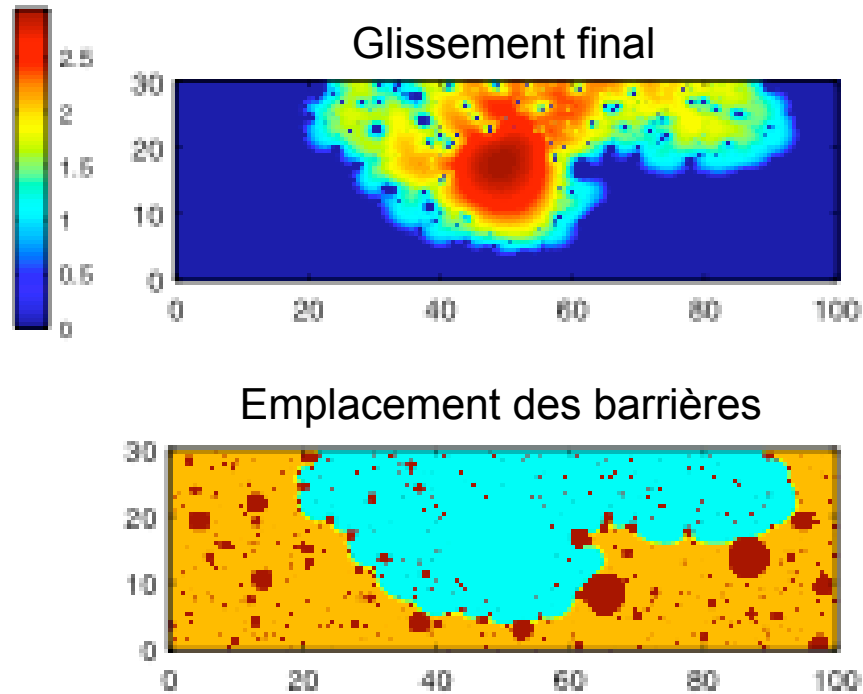




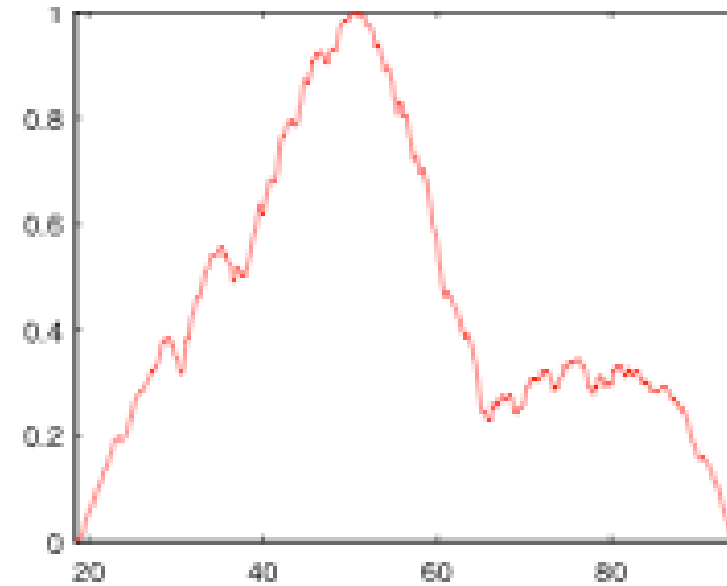
Rupture et hétérogénéité de barrières

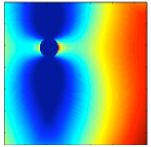


Profils de glissement linéaires,
comme dans les observations :



Profil de glissement moyen

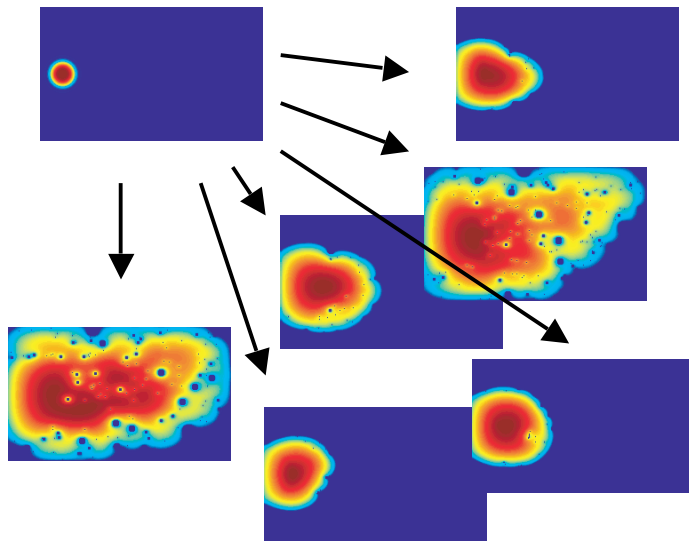




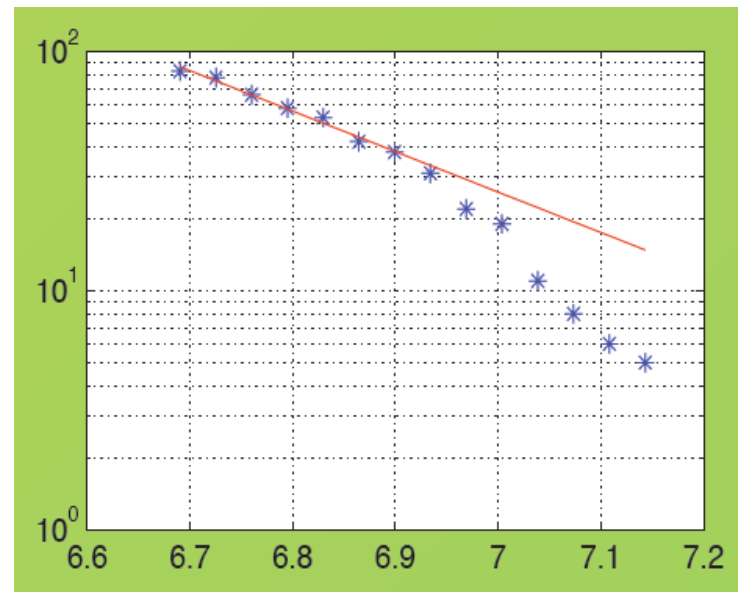
Rupture et hétérogénéité de barrières



Quand on tire au sort la localisation des barrières, on obtient des tailles de séismes très variées :



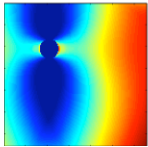
Nb de séismes



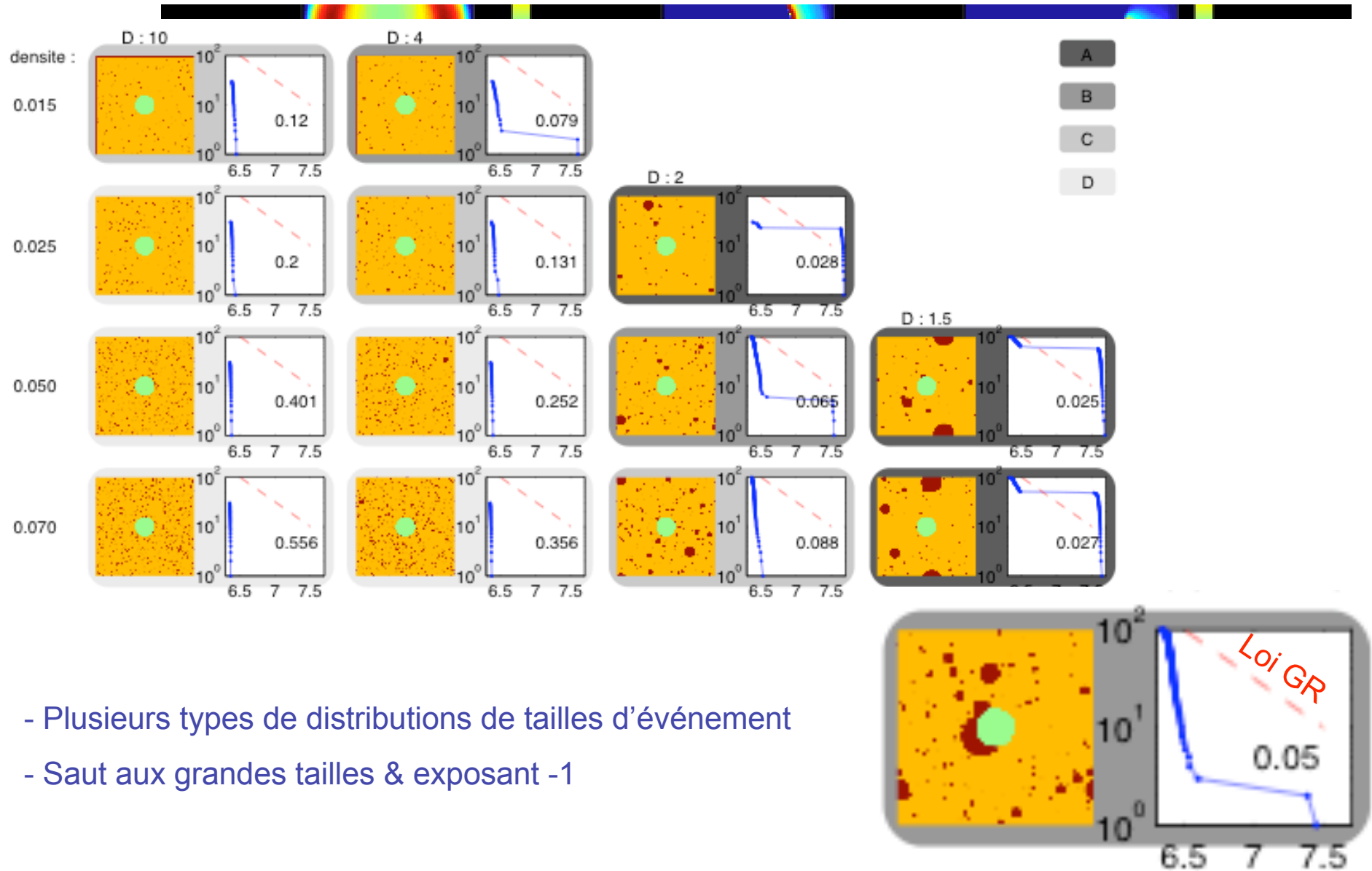
Taille (Mw)

Est-ce une loi puissance ?

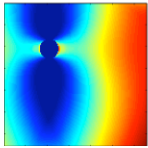
=> Étude paramétrique en fonction de la statistique des barrières



Rupture et hétérogénéité de barrières

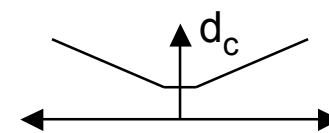
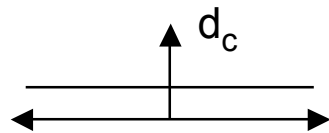
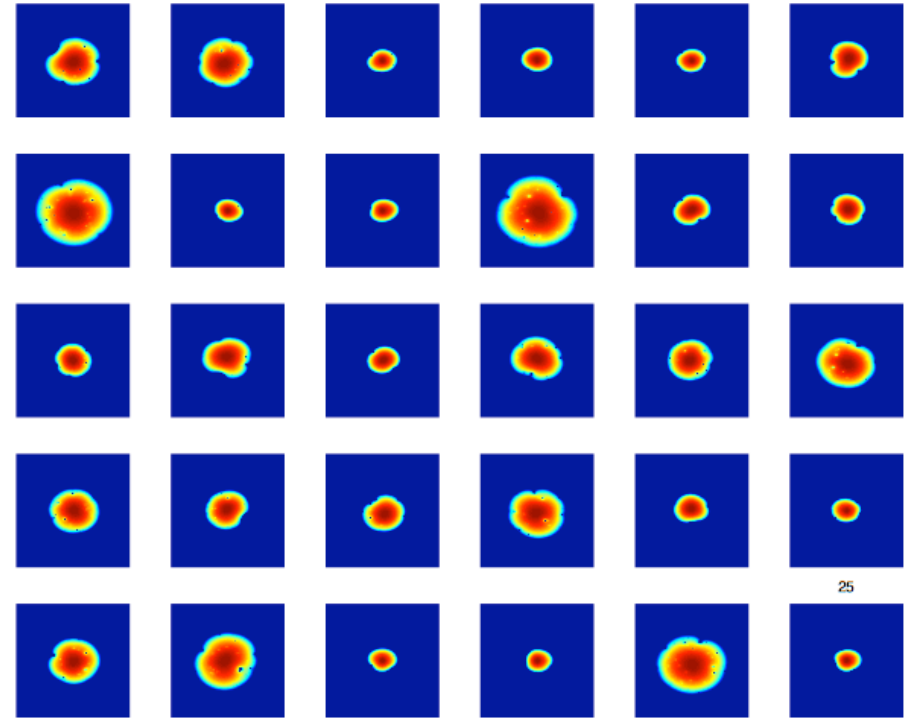
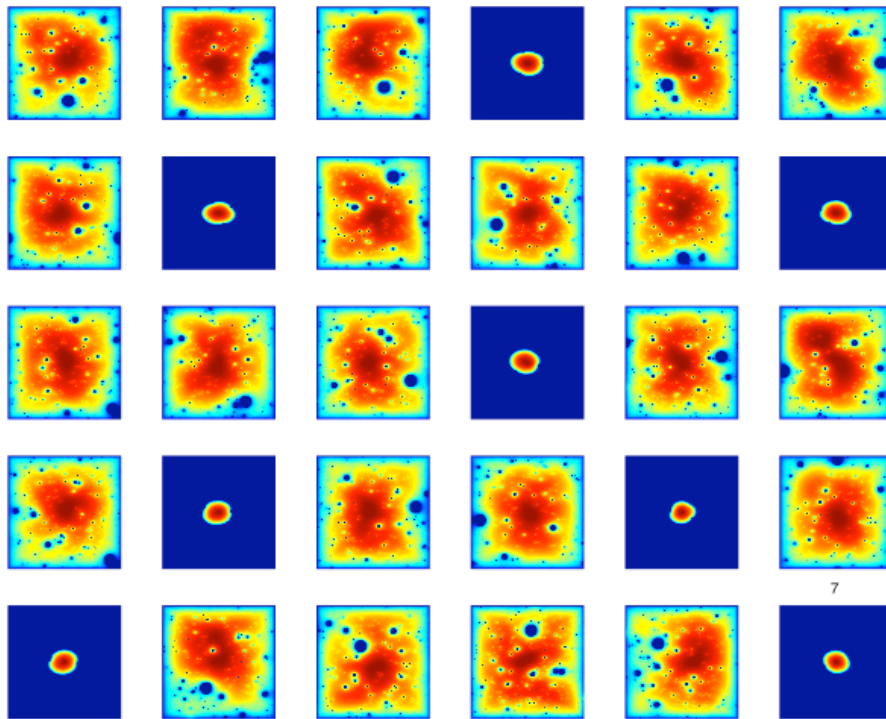


- Plusieurs types de distributions de tailles d'événement
- Saut aux grandes tailles & exposant -1

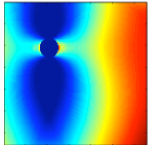


Rupture et hétérogénéité de barrières

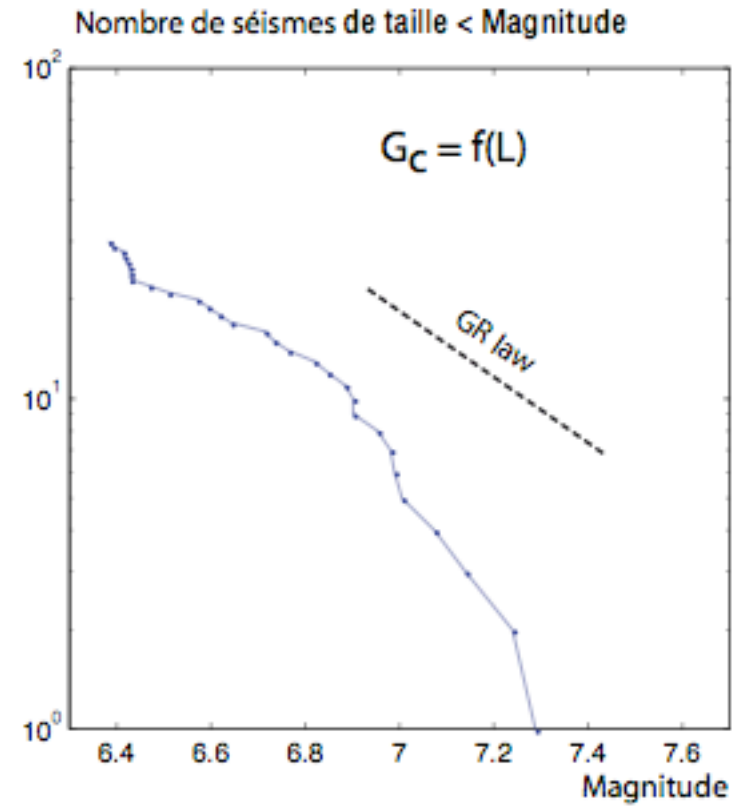
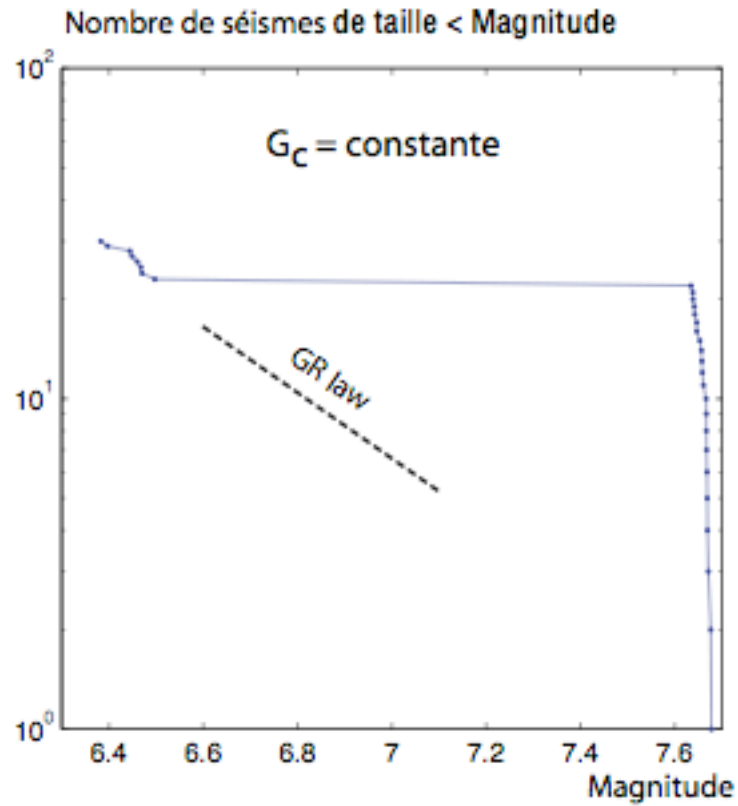
Augmenter la sensibilité aux barrières : l'endommagement ?

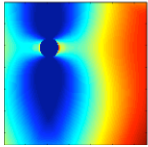


Suppression du saut aux grandes tailles par une augmentation linéaire de l'énergie de fracturation (comme endommagement ?) 34



Rupture et hétérogénéité de barrières



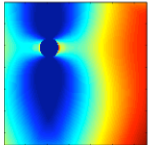


Rupture et hétérogénéité de barrières

Conclusions

En présence de petites barrières placées aléatoirement sur le plan de faille :

- On obtient des propriétés réalistes de profils de glissement, de propagation et de vitesse de rupture.
- L'arrêt de la rupture est spontané et imprévisible : diverses tailles sont obtenues pour une même statistique de barrières.
- On obtient une répartition en loi puissance régulière (Gutenberg-Richter?) si on rajoute une augmentation linéaire de l'énergie de fracturation (similaire à de l'endommagement).



Plan de la soutenance de thèse :

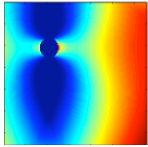
Introduction

I. Effet de l'endommagement du milieu entourant la faille sur la rupture

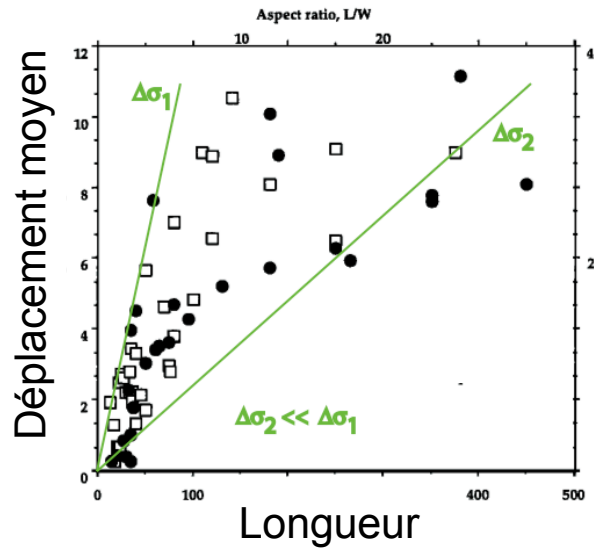
II. Effets d'une hétérogénéité spatiale sous forme de petites barrières

III. Effets de la segmentation : loi d'échelles et dynamique

Conclusion et Perspectives

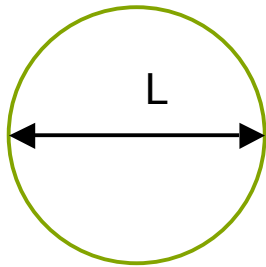


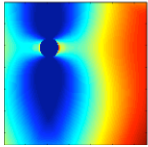
Loi d'échelle Déplacement / Longueur et dynamique



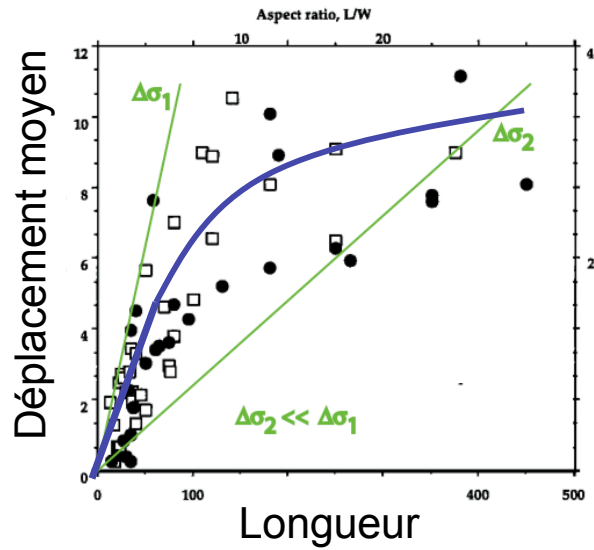
modifié d'après Shaw and Sholz (2001)

Modèle élastique 1D : $\Delta\sigma \sim \alpha D/L$





Loi d'échelle Déplacement / Longueur et dynamique

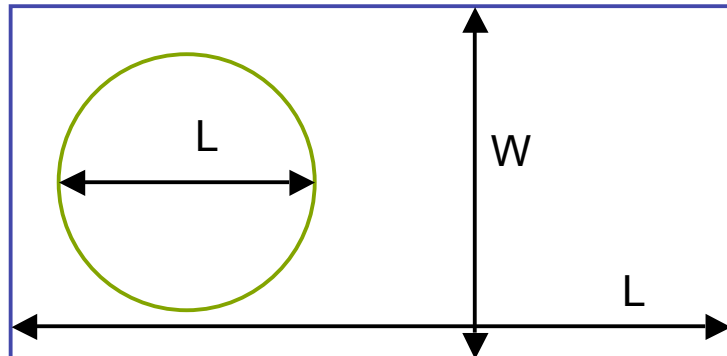


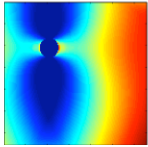
modifié d'après Shaw and Scholz (2001)

Modèle élastique 1D : $\Delta\sigma \sim \alpha D/L$

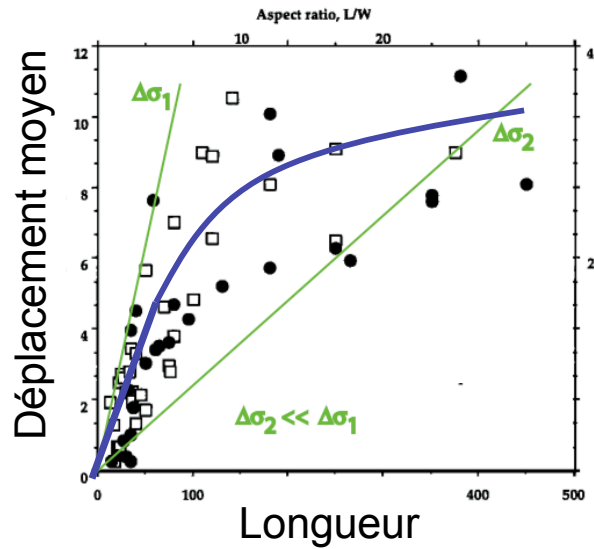
Formalisme de la saturation (Shaw & Scholz, 2001) :

$$\bar{D} = \frac{\alpha}{1/W + 1/L}, \text{ avec } \alpha = C \frac{\Delta\tau}{\mu}$$

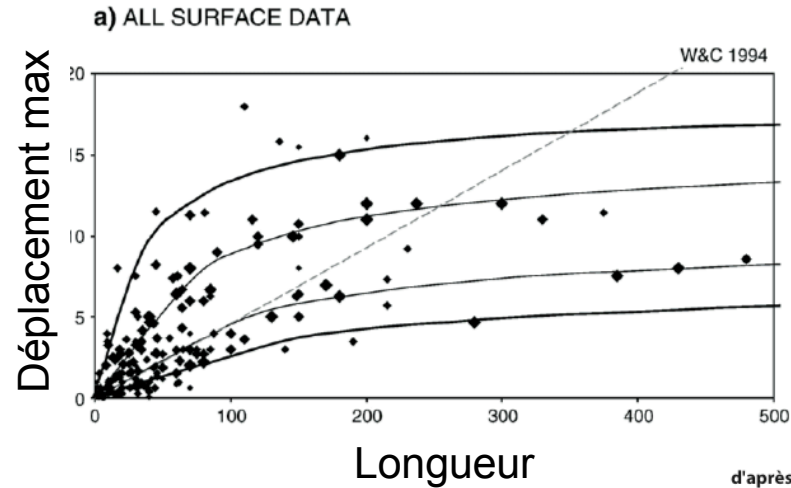




Loi d'échelle Déplacement / Longueur et dynamique

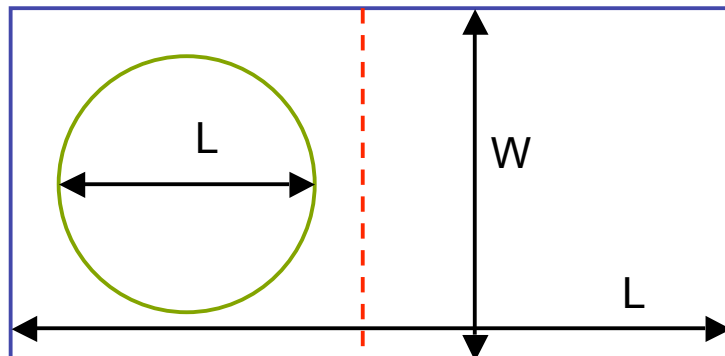


modifié d'après Shaw and Scholz (2001)



d'après Manighetti et al. (2007)

Modèle élastique 1D : $\Delta\sigma \sim \alpha D/L$

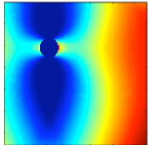


Formalisme de la saturation (Shaw & Scholz, 2001) :

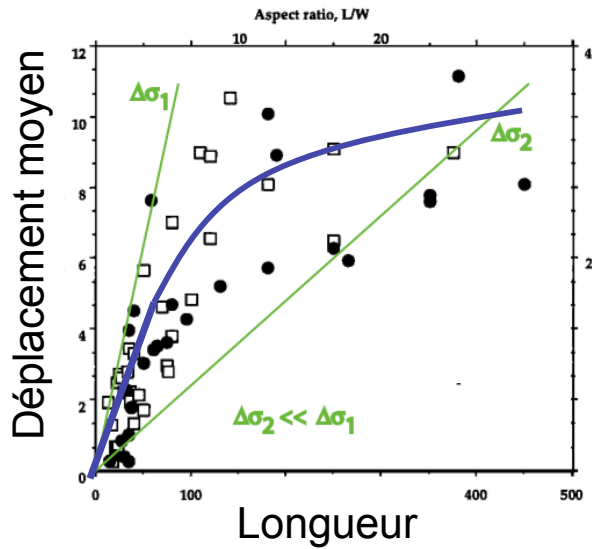
$$\bar{D} = \frac{\alpha}{1/W + 1/L}, \text{ avec } \alpha = C \frac{\Delta\tau}{\mu}$$

Segmentation (Manighetti et al., 2007) :

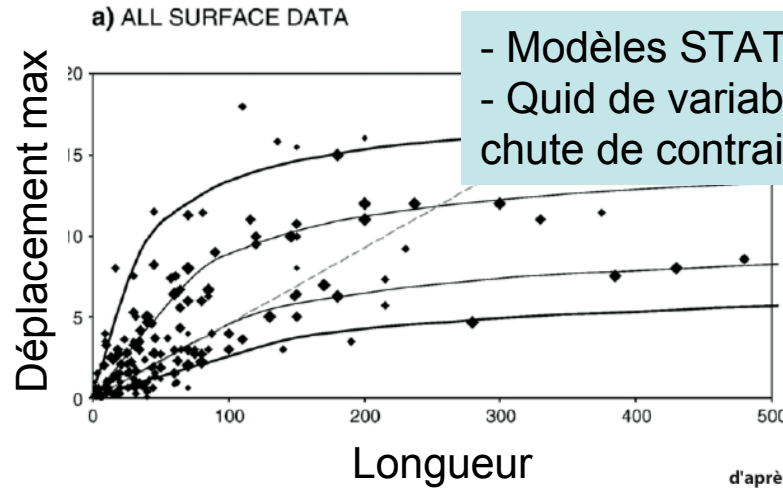
$$D = \frac{\alpha}{n} \frac{1}{\frac{1}{nW} + \frac{1}{L}}$$



Loi d'échelle Déplacement / Longueur et dynamique

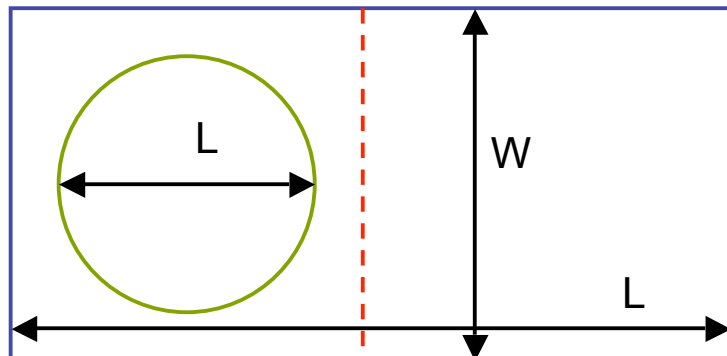


modifié d'après Shaw and Scholz (2001)



d'après Manighetti et al. (2007)

Modèle élastique 1D : $\Delta\sigma \sim \alpha D/L$

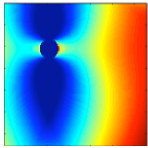


Formalisme de la saturation (Shaw & Scholz, 2001) :

$$\bar{D} = \frac{\alpha}{1/W + 1/L}, \text{ avec } \alpha = C \frac{\Delta\tau}{\mu}$$

Segmentation (Manighetti et al., 2007) :

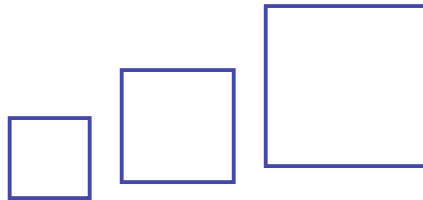
$$D = \frac{\alpha}{n} \frac{1}{\frac{1}{nW} + \frac{1}{L}}$$



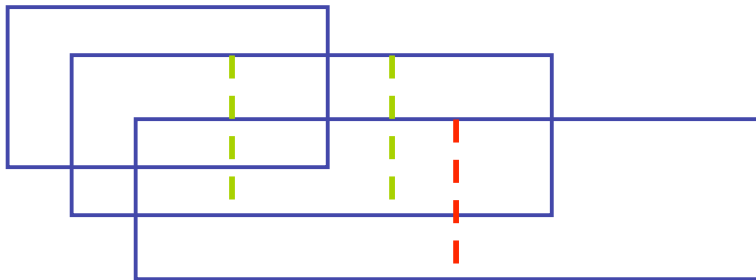
Loi d'échelle Déplacement / Longueur et dynamique

Géométries testées :

- $L < W_{sat}$: $L=W$



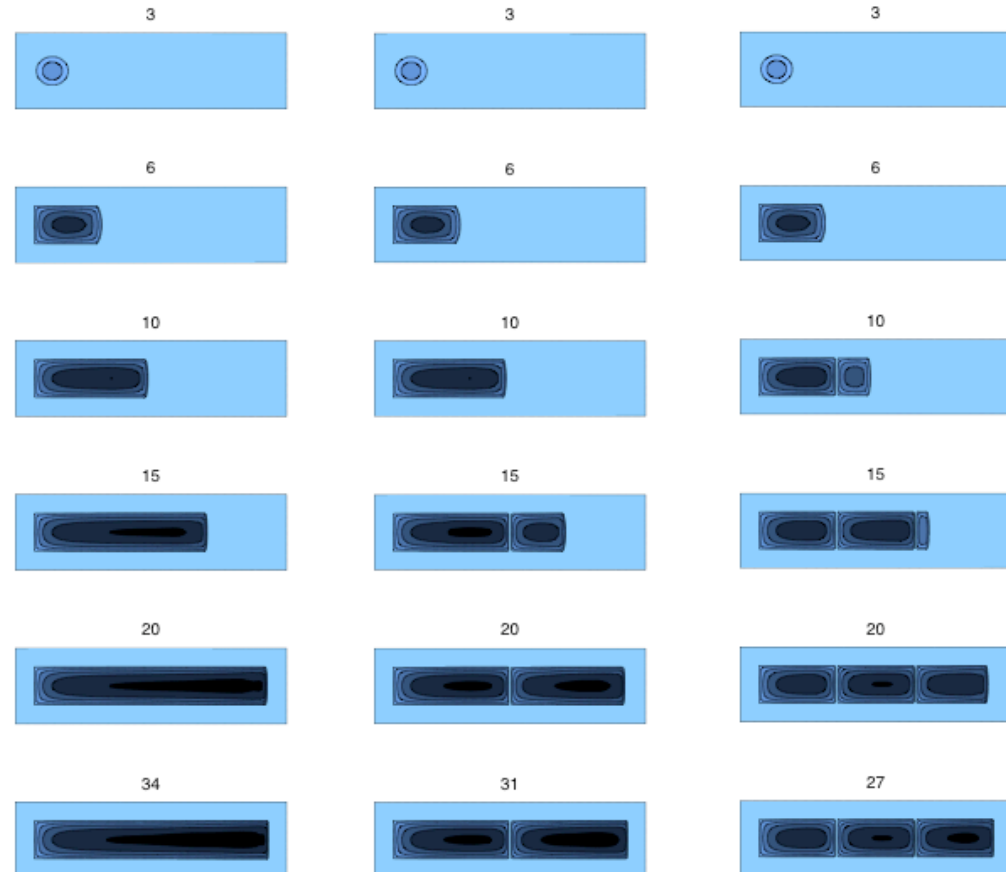
- $L > W_{sat}$: $L > W$

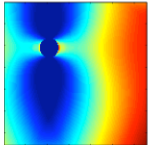


- Hypocentre désaxé ou centré

- Segments : 1, 2 ou 3

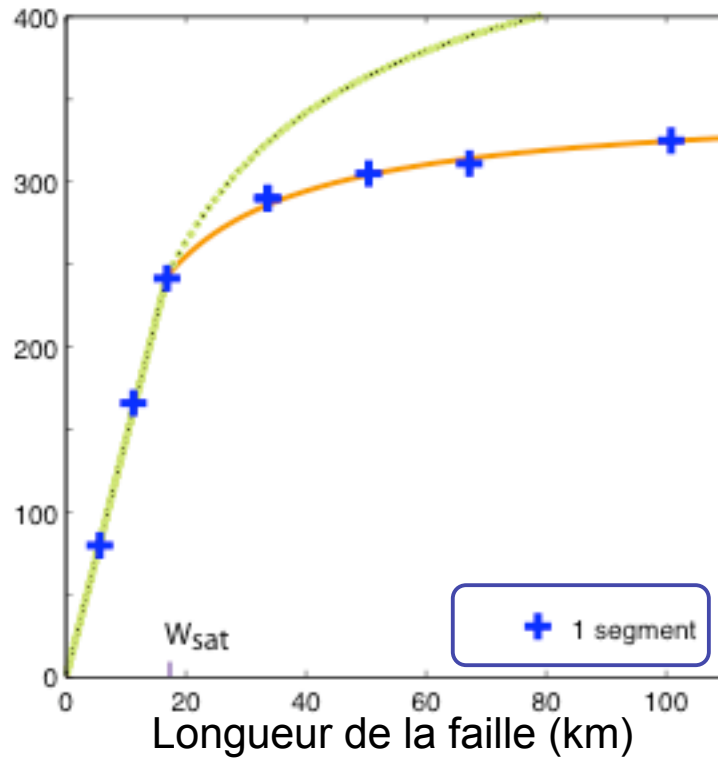
Histoire du glissement : $L=6W$





Loi d'échelle Déplacement / Longueur et dynamique

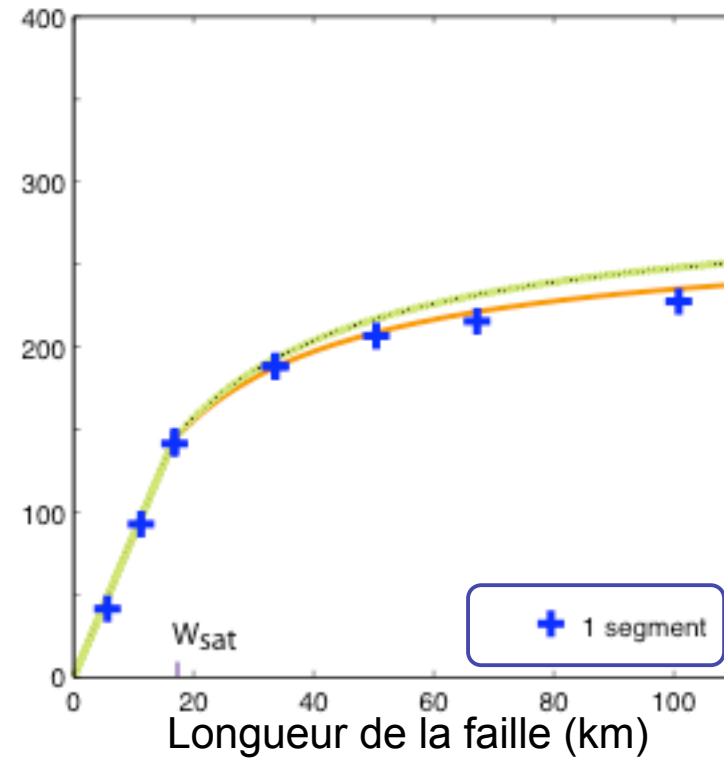
Glissement maximum (cm)



— loi SS01/M07 : $\alpha_{\max} 1 / (1/L + 1/W)$

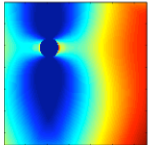
— $\alpha_{\max} 1,65 / (1/L + 2,3/W)$

Glissement moyen (cm)



— loi SS01/M07 : $\alpha_{\text{moy}} 1 / (1/L + 1/W)$

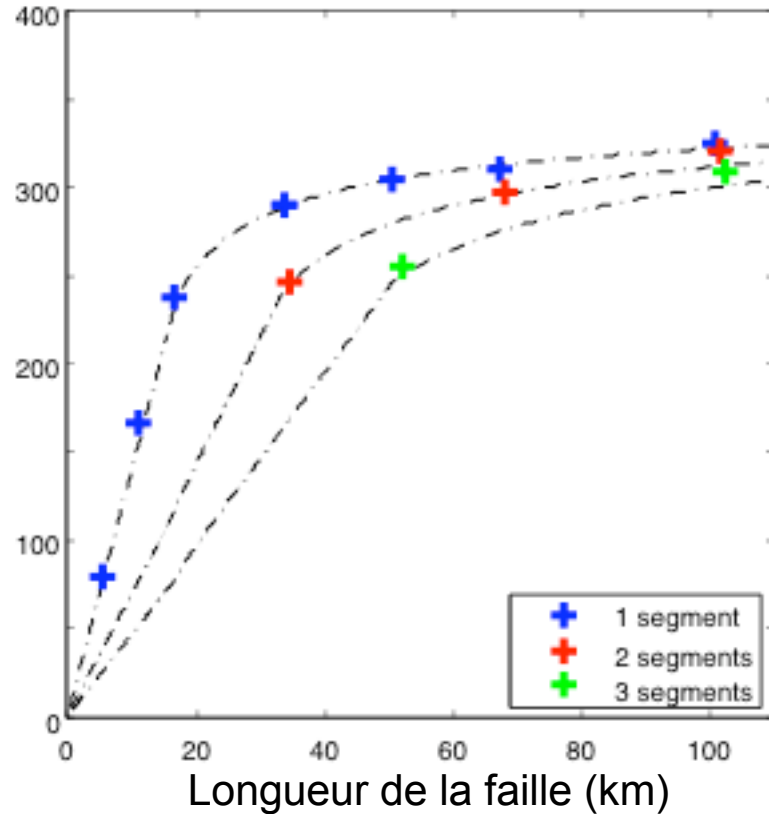
— $\alpha_{\text{moy}} 1,07 / (1/L + 1,15/W)$



Loi d'échelle Déplacement / Longueur et dynamique

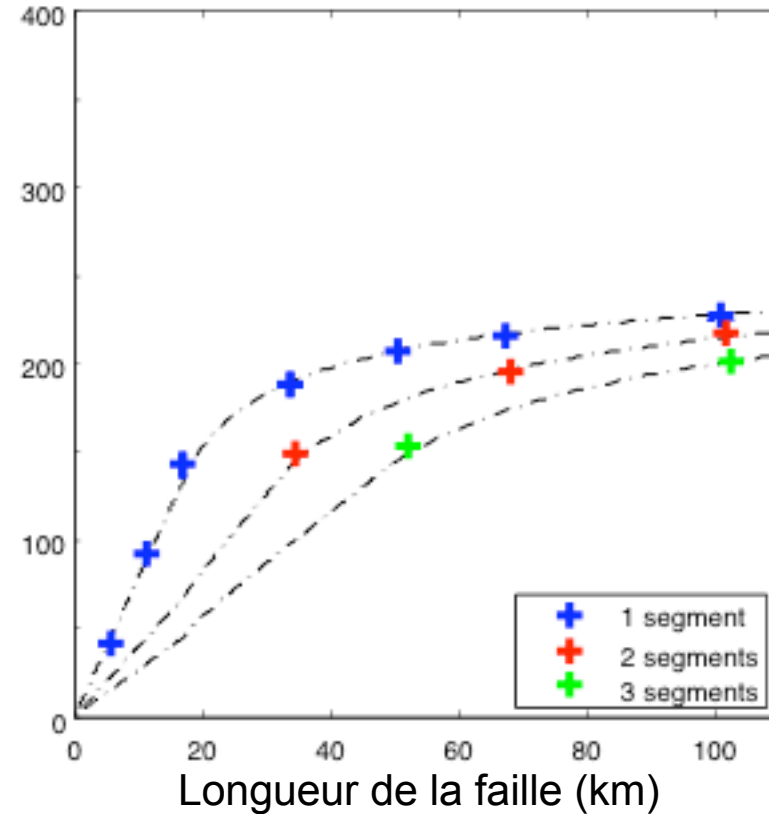


Glissement maximum (cm)

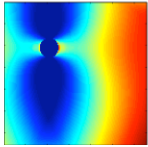


--- $\alpha_{\max} 1,5 / (1 / (2L - W) + 3 / W) + cte \sqrt{L - W}$

Glissement moyen (cm)



--- $\alpha_{\text{moy}} 1,25 / (1 / (2L - W) + 1,5 / W) + cte \sqrt{L - W}$



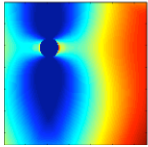
Loi d'échelle Déplacement / Longueur et dynamique

Conclusions

- Le modèle statique de saturation de la largeur des failles explique bien les résultats obtenus avec le modèle dynamique.

Il est nécessaire de tenir compte de la dynamique pour ajuster finement les résultats des modèles - une part de la variabilité réside dans la dynamique.

-On valide la dépendance de la loi d'échelle avec le nombre de segments. Une part de la variabilité des données peut aussi provenir de la taille de segments...



Conclusions générales

Qu'est ce qui gouverne l'arrêt des tremblement de terre ?

Quel est le rôle de l'endommagement du milieu autour des failles ? Quel est le rôle de l'hétérogénéité spatiale ? Des barrières ? De la segmentation ?

- **L'endommagement dynamique** implique

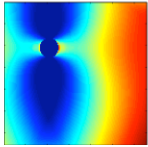
- une modification de la cinématique de la rupture (baisse de la vitesse de rupture, saturation de la vitesse de glissement)
- une réduction de l'amplitude des ondes émises par la rupture sismique
- une sensibilité accrue aux variations de résistance sur la faille, facilitant l'arrêt de la propagation de la rupture

- **Les petites barrières**

- dissipent l'énergie du tremblement de terre, induisent des ruptures complexes et permettent d'obtenir des profils de glissement proches de ceux observés pour les séismes
- peuvent arrêter spontanément la rupture au milieu d'un segment, provoquant des séismes de toutes tailles sur un même segment. Particulièrement lorsqu'elles sont associées à une augmentation régulière de l'énergie de fracturation avec la taille de la rupture, comme induit par la plasticité.

- **La segmentation des failles (barrières du 1er ordre)**

- contrôle la quantité de glissement sur la faille lors d'un séisme, mais la dynamique compte.



Perspectives



Rôle de l'épaisseur de la zone endommagée sur l'efficacité du processus de dissipation ? Est-ce qu'une zone plastique d'épaisseur limitée possède la même influence sur la rupture ?

Modèle plastique 3D sur un cas plus réaliste en terme de taille de séisme pour quantifier l'impact sur les mouvements du sol.

Couplage hétérogénéité / plasticité dans la perspective de caractériser le niveau d'hétérogénéité nécessaire pour arrêter la rupture dans ce cas (plus besoin de barrières incassables ?)

Comportement de la rupture plastique face à une zone déchargée ?

