

Déformation et Sismicité : du Laboratoire aux Failles Actives

Olivier Lengliné

E.O.S.T. - Strasbourg

8 Mars 2011

ANR SUPNAF

Avec :

Jean Schmittbuhl, Alain Steyer et Renaud Toussaint (*E.O.S.T - Strasbourg*)

Michel Bouchon (*L.G.I.T. Grenoble*)

Hayrullah Karabulut (*K.O.E.R.I. - Istanbul*)

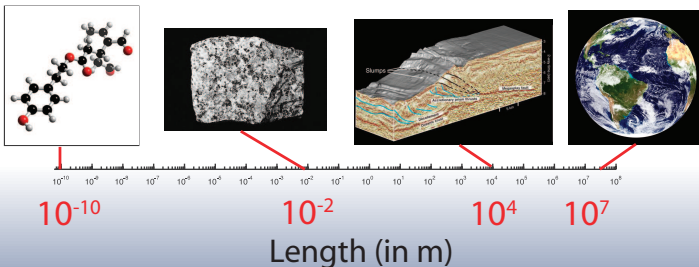
Knut Jørgen Måløy (*Physics Dept. - Oslo*)

Jean-Elkhoury et Jean-Paul Ampuero (*Caltech - Los Angeles*)

Introduction

Notion d'échelles

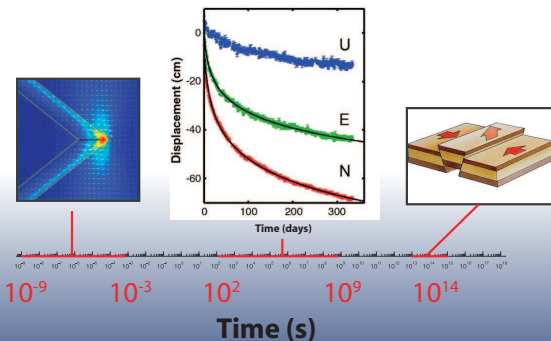
En espace : Interaction de différents processus sur plusieurs échelles de longueur.



Introduction

Notion d'échelles

En temps : Variabilité temporelle des mécanismes de la déformation crustale.

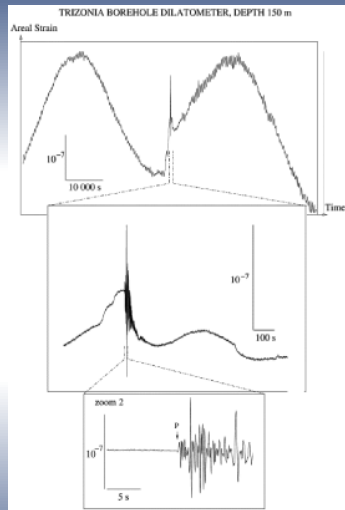


Introduction

Un exemple : Occurrence simultanée de deux types de déformation.

Transitoire de déformation dans golfe de Corinthe (Grèce).

Un glissement lent ($M_w \sim 5$) est observé en même temps qu'un microséisme ($M_w = 3.5$).



[Bernard et al. 2004]

Introduction

Problématique

Comprendre la relation entre le signal acoustique (microsismicité) et la déformation lente asismique.

Quelques glissements asismiques

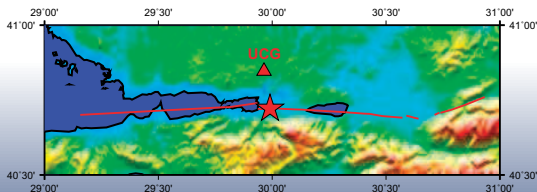
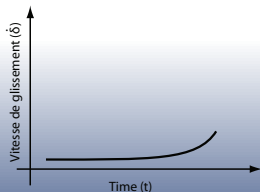
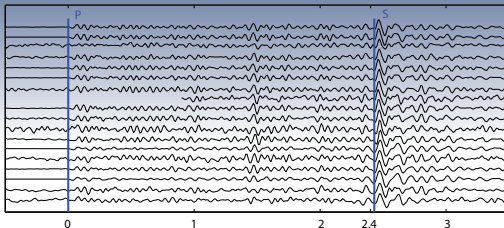
- 1 Phase de nucléation de tremblements de terre
- 2 Glissement postsisimique - afterslip
- 3 Séisme lent
- 4 Déformation des roches par fluage en laboratoire

Introduction

Glissements Lents

Phase de **nucléation** du séisme d'Izmit, $M_W = 7.6$, (1999).

Accélération du taux de microséisme dans la zone de l'hypocentre avant l'instabilité dynamique.



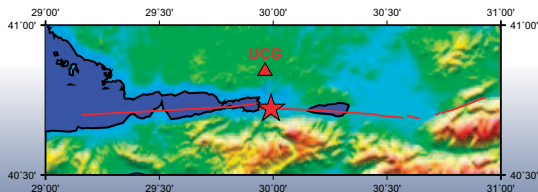
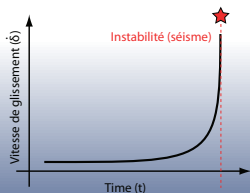
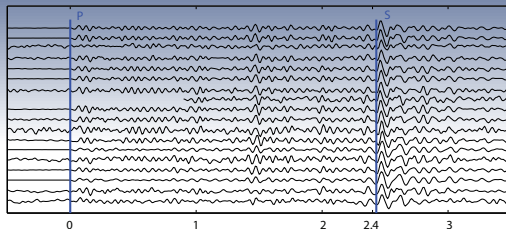
[Bouchon et al. 2011]

Introduction

Glissements Lents

Phase de **nucléation** du séisme d'Izmit, $M_W = 7.6$, (1999).

Accélération du taux de microséisme dans la zone de l'hypocentre avant l'instabilité dynamique.



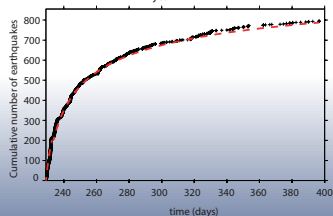
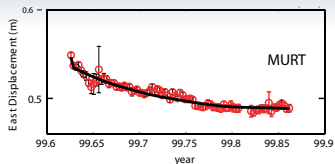
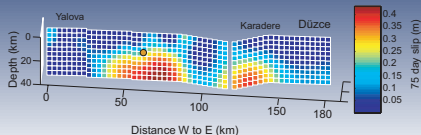
[Bouchon et al. 2011]

Introduction

Glissements Lents

Glissement **post-sismique** important suite au séisme d'Izmit.

- Sur le plan de faille où s'est produit le glissement co-sismique
- Décroissance de la vitesse de glissement avec le temps
- Évolution comparable pour les répliques



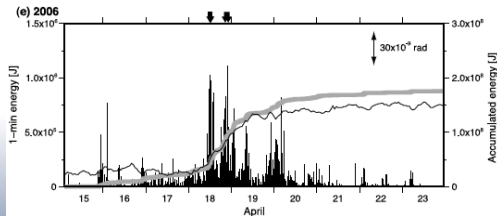
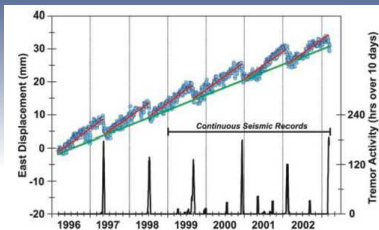
[Reilinger et al. 2000, Burgmann et al. 2002, Daniel et al. 2006]

Introduction

Glissements Lents

Séisme lent à la transition entre la zone de glissement stable et instable.

Forte corrélation entre le signal de déformation et le signal acoustique enregistré (**tremors**).



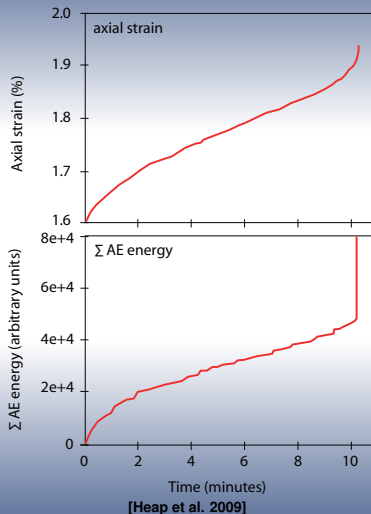
[Rogers and Dragert 2003, Maeda and Obara 2009]

Introduction

Glissements Lents

Déformation par **fluage** des échantillons de roches lors d'essais en laboratoire (compression tri-axiale).

Corrélation entre le taux de déformation et le taux d'énergie acoustique enregistré.



Introduction

Hétérogénéité du glissement

L'existence d'un signal acoustique témoigne de la présence de ruptures rapides (dynamiques) dans un milieu se déformant lentement à l'échelle macroscopique.

Introduction

Hétérogénéité du glissement

L'existence d'un signal acoustique témoigne de la présence de ruptures rapides (dynamiques) dans un milieu se déformant lentement à l'échelle macroscopique.

⇒ Nécessite hétérogénéité de la déformation à l'intérieur du système considéré.

Introduction

Hétérogénéité du glissement

L'existence d'un signal acoustique témoigne de la présence de ruptures rapides (dynamiques) dans un milieu se déformant lentement à l'échelle macroscopique.

⇒ Nécessite hétérogénéité de la déformation à l'intérieur du système considéré.

⇒ Implique que les observations macroscopiques sont le résultat de l'intégration de phénomènes se déroulant à petite échelle.

Introduction

Hétérogénéité du glissement

L'existence d'un signal acoustique témoigne de la présence de ruptures rapides (dynamiques) dans un milieu se déformant lentement à l'échelle macroscopique.

⇒ Nécessite hétérogénéité de la déformation à l'intérieur du système considéré.

⇒ Implique que les observations macroscopiques sont le résultat de l'intégration de phénomènes se déroulant à petite échelle.

⇒ Comment faire le lien entre les échelles ? Que nous apprennent les observations macroscopiques sur la mécanique se déroulant à une échelle microscopique ?

Introduction

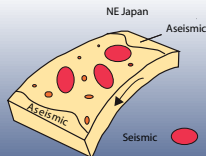
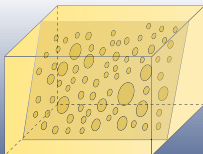
Hétérogénéité du glissement

L'existence d'un signal acoustique témoigne de la présence de ruptures rapides (dynamiques) dans un milieu se déformant lentement à l'échelle macroscopique.

⇒ Nécessite hétérogénéité de la déformation à l'intérieur du système considéré.

⇒ Implique que les observations macroscopiques sont le résultat de l'intégration de phénomènes se déroulant à petite échelle.

⇒ Comment faire le lien entre les échelles ? Que nous apprennent les observations macroscopiques sur la mécanique se déroulant à une échelle microscopique ?



Introduction

Hétérogénéité du glissement

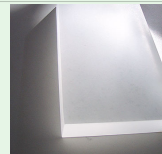
Difficulté de l'observation des processus de déformation à petite échelle à l'intérieure de la croûte.



Approche expérimentale

Avantage de l'approche expérimentale : observation directe de la déformation à différentes échelles.

Pouvoir intégrateur meilleur que par approche numérique (du quasistatique au dynamique).



Choix du matériau

PMMA (*Plexiglas*®)

Choix du matériau

PMMA (*Plexiglas*®)

1 Transparent

Choix du matériau

PMMA (*Plexiglas*®)

- 1 Transparent
- 2 Faible module de Young par rapport au verre (3 *GPa* contre 50 *GPa*)

Choix du matériau

PMMA (*Plexiglas*®)

- 1 Transparent
- 2 Faible module de Young par rapport au verre (3 *GPa* contre 50 *GPa*)
- 3 Énergie de surface également plus grande que le verre ($100 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ contre $\sim 1 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$)

Choix du matériau

PMMA (*Plexiglas*®)

- 1 Transparent
- 2 Faible module de Young par rapport au verre (3 *GPa* contre 50 *GPa*)
- 3 Énergie de surface également plus grande que le verre ($100 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ contre $\sim 1 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$)
- 4 Rhéologie dépendante du temps - déformation fragile et ductile

Choix du matériau

PMMA (*Plexiglas*®)

- 1 Transparent
- 2 Faible module de Young par rapport au verre (3 *GPa* contre 50 *GPa*)
- 3 Énergie de surface également plus grande que le verre ($100 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ contre $\sim 1 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$)
- 4 Rhéologie dépendente du temps - déformation fragile et ductile
- 5 Équivalence temps-température - étude de la nucléation

Choix du matériau

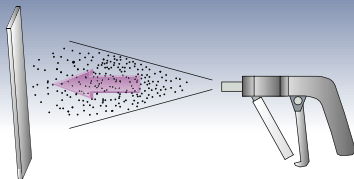
PMMA (*Plexiglas*®)

- 1 Transparent
- 2 Faible module de Young par rapport au verre (3 *GPa* contre 50 *GPa*)
- 3 Énergie de surface également plus grande que le verre ($100 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ contre $\sim 1 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$)
- 4 Rhéologie dépendente du temps - déformation fragile et ductile
- 5 Équivalence temps-température - étude de la nucléation
- 6 Faible zone d'endommagement - peu de pertes d'énergie due à la microplasticité, frottement

Création d'échantillons

Sablage

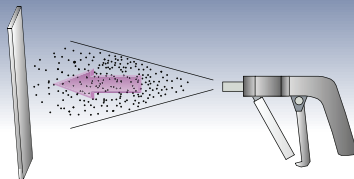
Projection de bille de verre, ($\phi = 180 - 300\mu m$) par air comprimé.



Création d'échantillons

Sablage

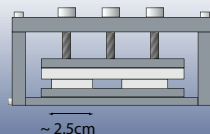
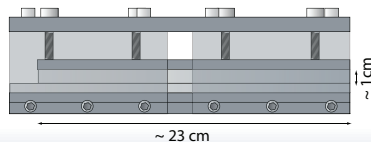
Projection de bille de verre, ($\phi = 180 - 300\mu m$) par air comprimé.



Soudure

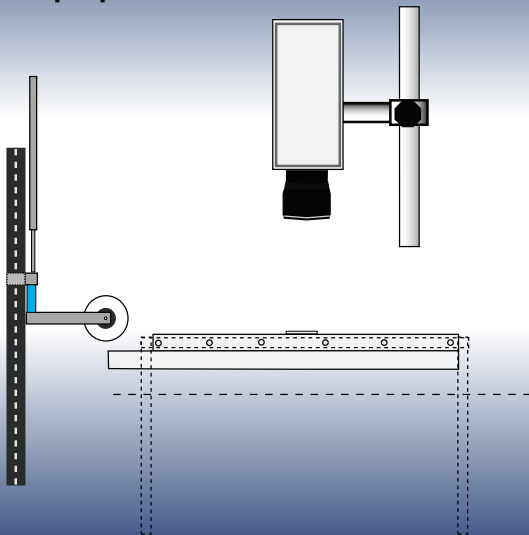
Contrainte normale et chauffage ($T = 190^{\circ}C$) pendant 45 minutes.

La transparence perdue lors du sablage réapparaît après soudure.



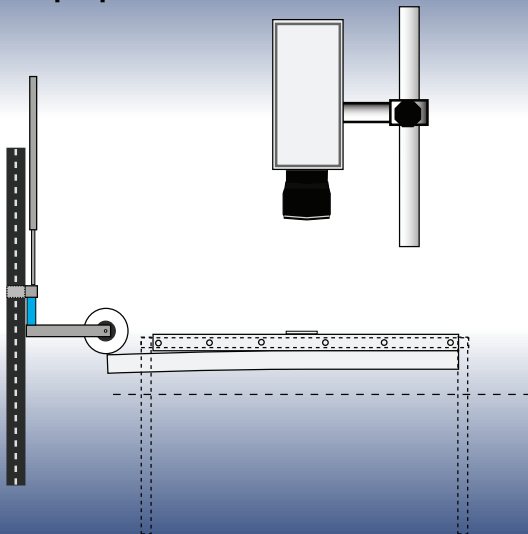
Dispositif expérimental

Optique



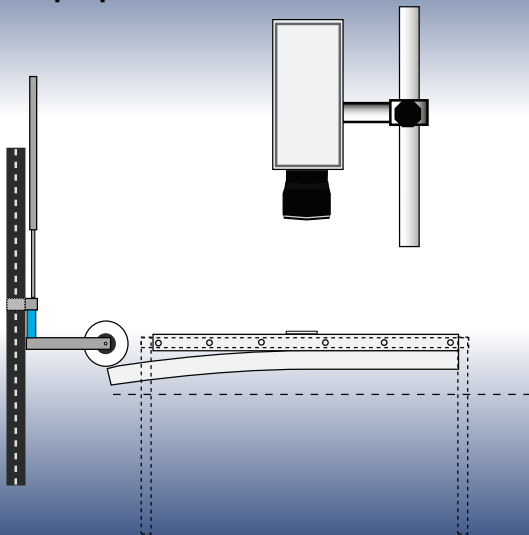
Dispositif expérimental

Optique



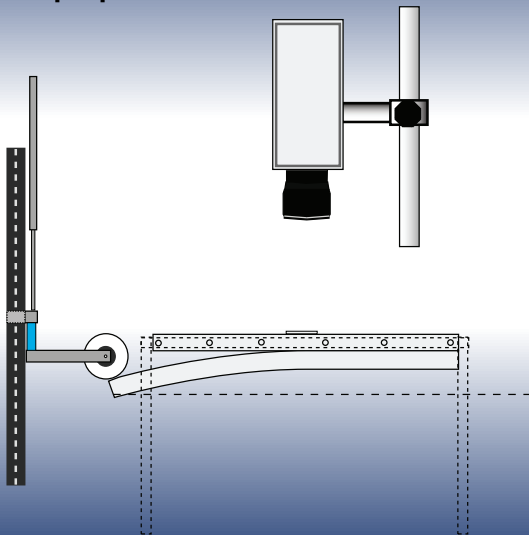
Dispositif expérimental

Optique



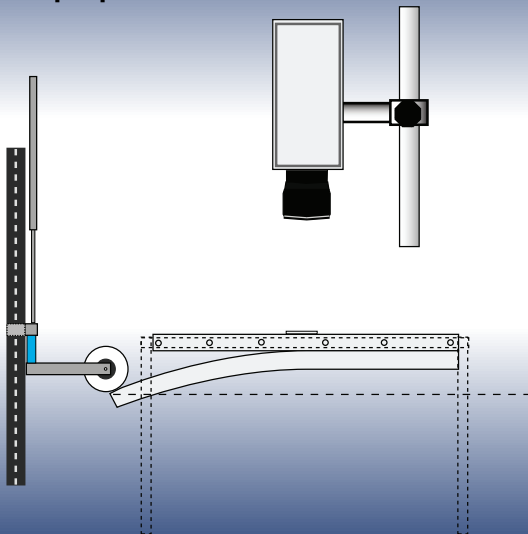
Dispositif expérimental

Optique



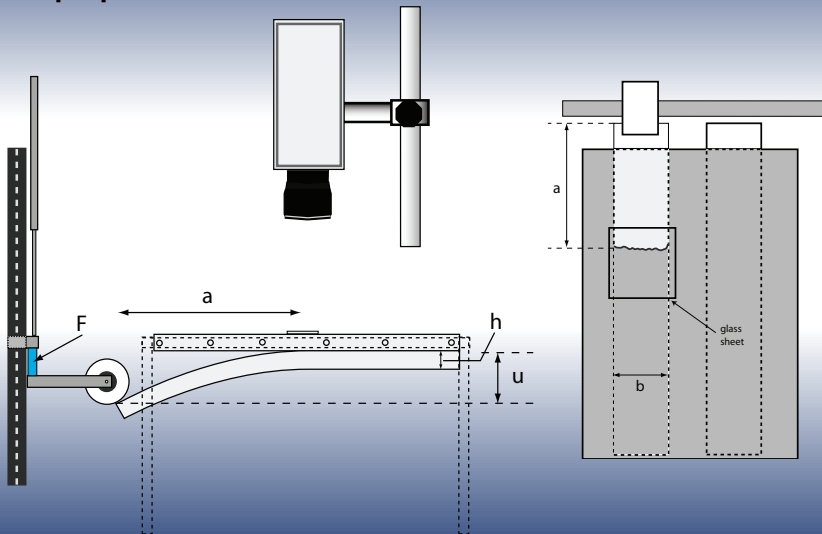
Dispositif expérimental

Optique



Dispositif expérimental

Optique

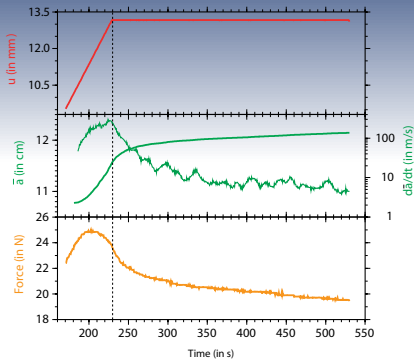


Évolution macroscopique

Une expérience typique

Évolution :

- de la force (F),
- du déplacement (u),
- de la position moyenne du front, $\bar{a}$.



Évolution macroscopique

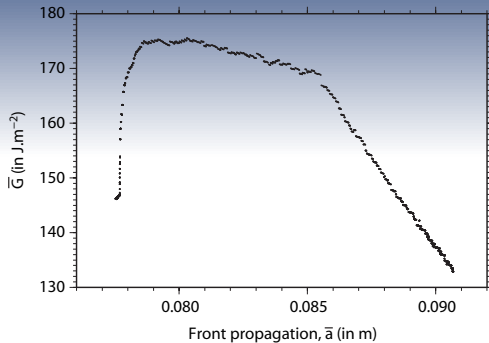
L'évolution des différents paramètres, en particulier, $\bar{a}(t)$ est lente, continue et régulière.

Évolution macroscopique

Estimation du taux moyen d'énergie libéré, $\bar{G}$

Milieu élastique + déflexion de poutre :

$$\bar{G} = \frac{3Fu}{2b\bar{a}}$$

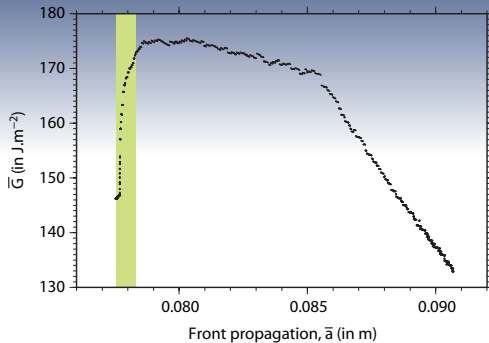


Évolution macroscopique

Estimation du taux moyen d'énergie libéré, $\bar{G}$

Milieu élastique + déflexion de poutre :

$$\bar{G} = \frac{3Fu}{2b\bar{a}}$$

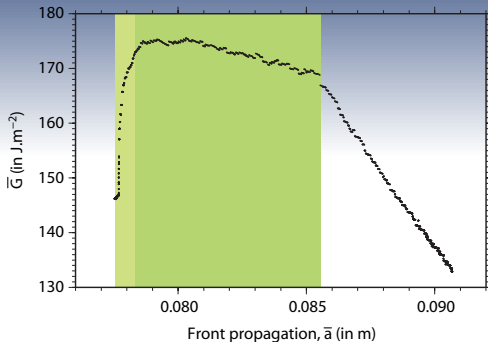


Évolution macroscopique

Estimation du taux moyen d'énergie libéré, $\bar{G}$

Milieu élastique + déflexion de poutre :

$$\bar{G} = \frac{3Fu}{2b\bar{a}}$$

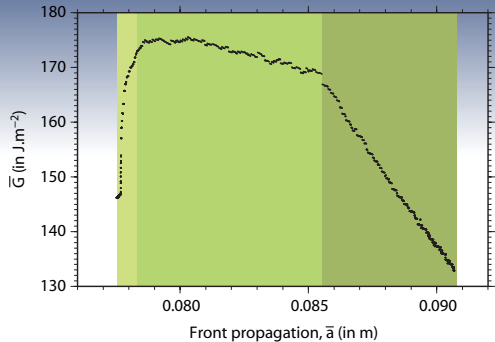


Évolution macroscopique

Estimation du taux moyen d'énergie libéré, $\bar{G}$

Milieu élastique + déflexion de poutre :

$$\bar{G} = \frac{3Fu}{2b\bar{a}}$$

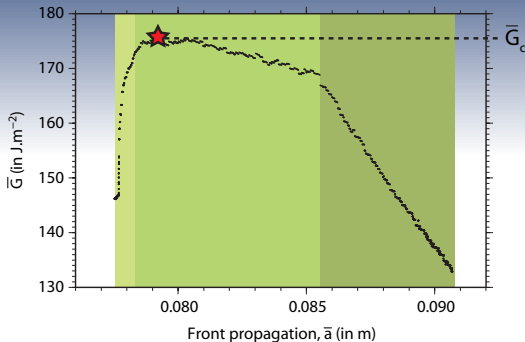


Évolution macroscopique

Estimation du taux moyen d'énergie libéré, $\bar{G}$

Milieu élastique + déflexion de poutre :

$$\bar{G} = \frac{3Fu}{2b\bar{a}}$$



Estimation de l'énergie de fracturation macroscopique, $\bar{G}_c$

Valeur maximale de $\bar{G}$.

Critère de Griffith, propagation quasistatique : $\bar{G}_c$.

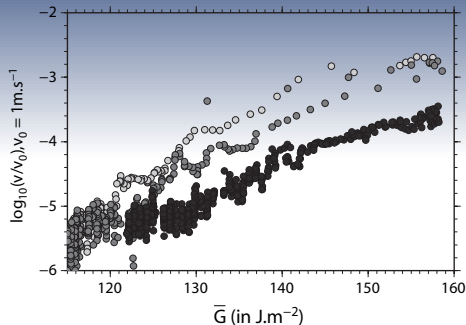
Évolution macroscopique

Relation vitesse vs. $\bar{G}$

Évolution de $\bar{G}$ avec la vitesse selon une loi d'Arrhenius :

$$v(\bar{G}) = v_0 \cdot \exp\left(\alpha^2 \frac{\bar{G} - E'}{RT}\right)$$

Processus avec seuil d'énergie, **activé thermiquement**.



Évolution macroscopique

Processus de fracturation gouverné par la rupture de liaisons atomiques, $\alpha \simeq 10^{-10} \text{m}$.

Évolution microscopique

Observation microscopique de la position du front

Contraste marque la transition entre la partie ouverte et non-ouverte.

Front de rupture plat au premier ordre ...



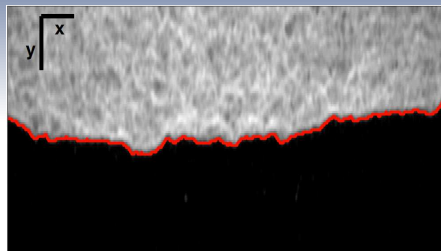
Évolution microscopique

Observation microscopique de la position du front

Contraste marque la transition entre la partie ouverte et non-ouverte.

Front de rupture plat au premier ordre ...

... mais irrégularités visibles à plus petite échelle ($1\text{px} \simeq 10\mu\text{m}$).



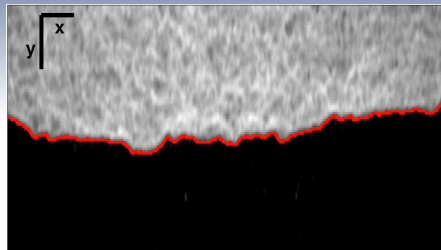
Évolution microscopique

Observation microscopique de la position du front

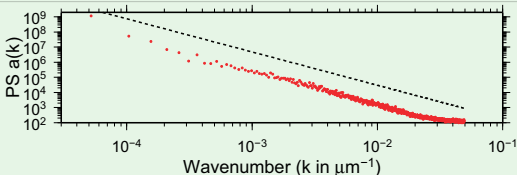
Contraste marque la transition entre la partie ouverte et non-ouverte.

Front de rupture plat au premier ordre ...

... mais irrégularités visibles à plus petite échelle ($1\text{px} \simeq 10\mu\text{m}$).



Rugosité du front de rupture à toutes les échelles



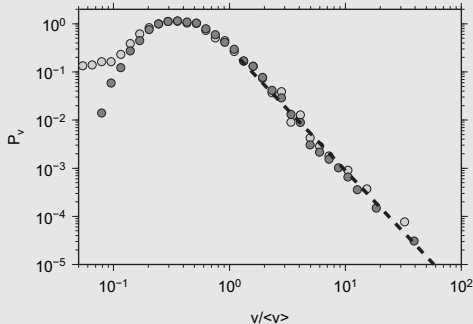
Évolution microscopique

Distribution des vitesses locales

Les vitesses locales sont distribuées sur une gamme très étendue.

Décroissance de la pdf des vitesses $v > \langle v \rangle$ selon une loi de puissance.

Pas de vitesse d'avancée caractéristique.



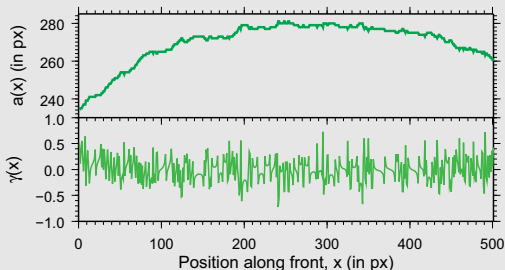
Évolution microscopique

Interactions élastiques

Modifications locales du taux d'énergie libéré du fait de la morphologie du front.

Par définition $\langle \gamma \rangle = 0$.

$$G(x, t) = \bar{G}(t) (1 + \gamma(x, t))$$

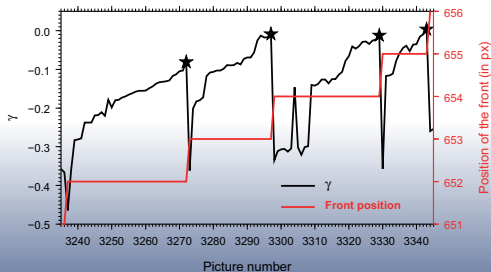
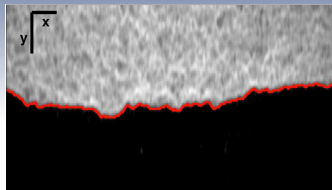


Évolution microscopique

G_c local

Une avancée locale **intermittente**.

- Augmentation de G lors des phases bloquées.
- Diminution rapide de G au moment de l'avancée locale du front.
- Définition de G_c à l'échelle microscopique, dernière valeur avant avancée du front.



Évolution microscopique

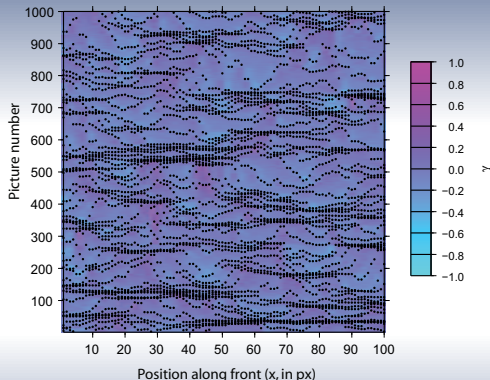
G_c local

Évolution à 2D

Une activité riche et complexe.

Cascade de déclenchements.

Une évolution similaire $\forall$ vitesse de déformation.



Implication

À un instant donné, la majorité des points sont à $G < G_c$.

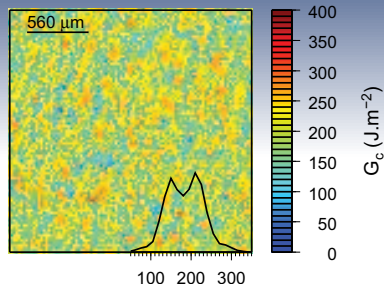
Évolution microscopique

Carte des valeurs locales de G_c

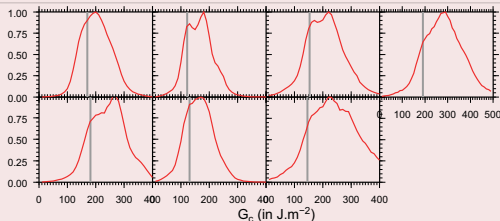
Distribution de G_c sur une vaste gamme :
 $18 - 395 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$.

Valeurs corrélées sur $\sim 80 \mu\text{m}$.

Similitudes avec la distribution de la morphologie de l'interface δz .



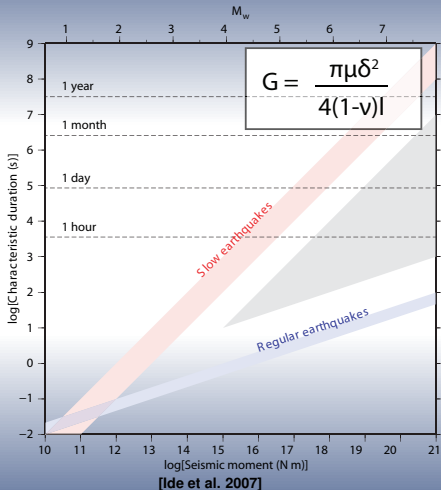
Comparaison micro/macro



Une description du *brittle-creep*

Comparaison micro/macro

- 1 La présence de défauts conduit à une grande distribution de vitesses locales bien que la vitesse moyenne soit stable.
- 2 Vitesse contrôlée par les concentrations locales de contraintes par la loi d'Arrhenius.
- 3 L'énergie de fracturation vue macroscopiquement est plus faible que l'énergie de fracturation microscopique.
- 4 La vitesse de déformation influence directement le G_c macro.
- 5 Un mécanisme pour les séismes lents



Signal acoustique

Transposition aux systèmes naturels

Comment relier les observations en laboratoire avec les observations de terrain ?

La signature acoustique permet de faire le lien entre les différentes échelles.

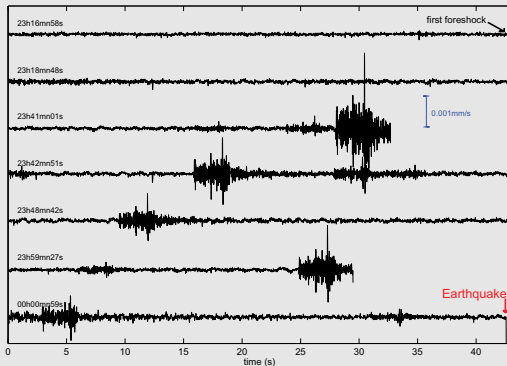
C'est l'**information accessible** dans les systèmes naturels.

Signature de déformations locales en profondeur.

Signal acoustique

Signal acoustique d'une déformation lente

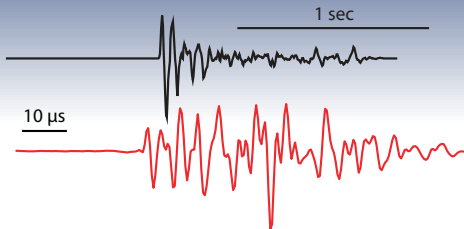
Le signal de la nucléation du séisme d'Izmit, creep localisé à la transition fragile/ductile, n'est enregistré que acoustiquement.



[Bouchon et al. 2011]

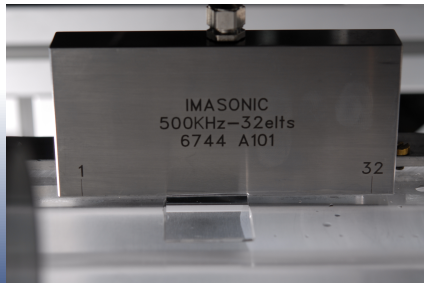
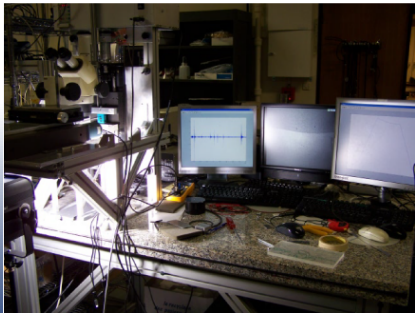
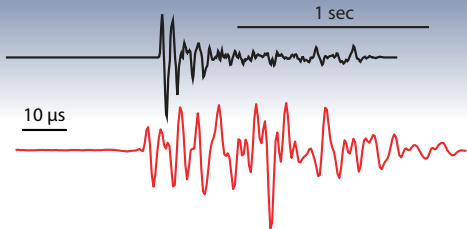
Signal acoustique

Comparaison AE - Signal Sismique



Signal acoustique

Comparaison AE - Signal Sismique

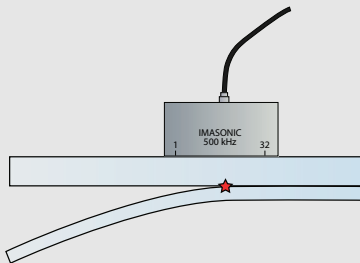


Dispositif expérimental

Acoustique

Système d'acquisition acoustique

- Centrale d'acquisition 64 voies à 5MHz sur ~ 1 minute.
- Capteurs piézoélectriques (2×32), fréquence de résonance 500 kHz.



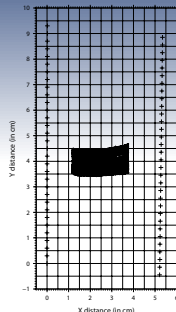
Émissions Acoustiques

Localisation - domaine

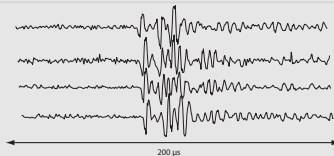
De nombreuses émissions acoustiques sont enregistrées lors de la propagation du front de fracture.

Témoins de l'avancée dynamique locale.

Positionnement en temps et en espace, lien avec la déformation vue optiquement.



Localisation - signaux



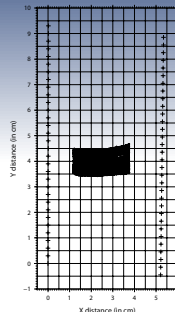
Émissions Acoustiques

Localisation - domaine

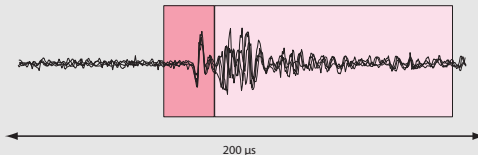
De nombreuses émissions acoustiques sont enregistrées lors de la propagation du front de fracture.

Témoins de l'avancée dynamique locale.

Positionnement en temps et en espace, lien avec la déformation vue optiquement.



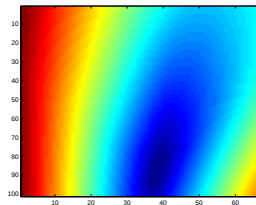
Localisation - signaux



Émissions Acoustiques

Localisation - beamforming

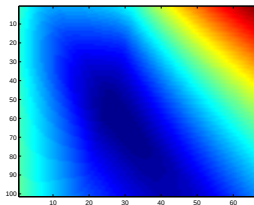
Recherche de la position qui rend l'arrivée cohérente sur l'ensemble des capteurs (Grille de $2 \times 3 \text{ cm}$).



Émissions Acoustiques

Localisation - beamforming

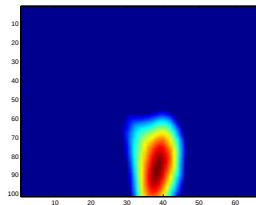
Recherche de la position qui rend l'arrivée cohérente sur l'ensemble des capteurs (Grille de $2 \times 3 \text{ cm}$).



Émissions Acoustiques

Localisation - beamforming

Recherche de la position qui rend l'arrivée cohérente sur l'ensemble des capteurs (Grille de $2 \times 3 \text{ cm}$).



Émissions Acoustiques

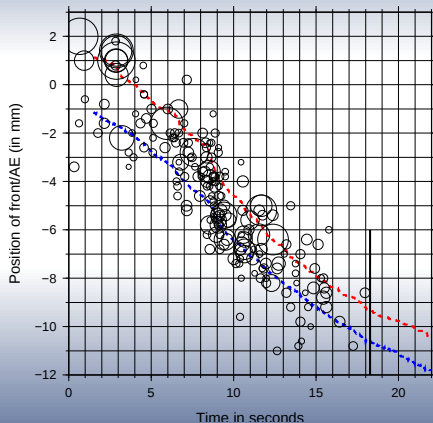
Localisation - beamforming

Recherche de la position qui rend l'arrivée cohérente sur l'ensemble des capteurs (Grille de $2 \times 3 \text{ cm}$).

Localisation - résultats

Émissions acoustiques localisées sur le front de fracture.

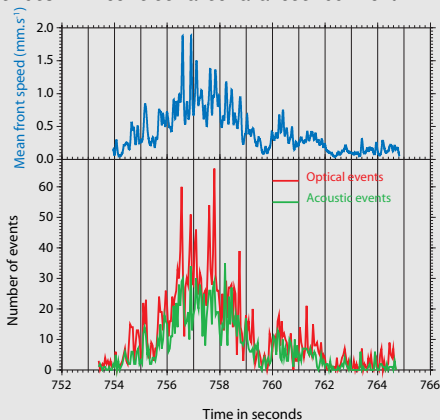
Corrélation entre évolution du front et évolution des AEs.



Émissions Acoustiques

Évolution temporelle

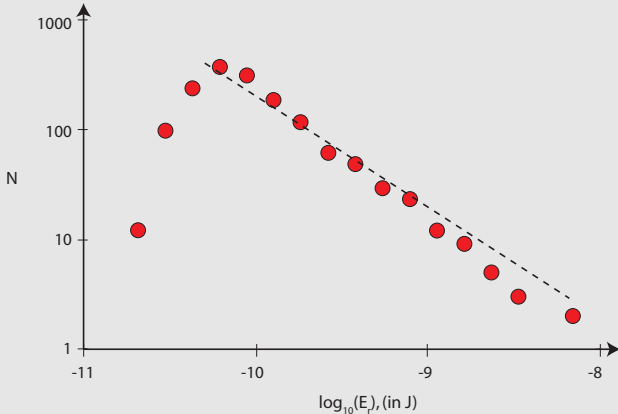
Évolution temporelle des AE corrélée avec avancée du front $\simeq$ déformation locale.



Émissions Acoustiques

Énergie

La distribution de l'énergie radiée par les AE suit une loi puissance (similaire à une loi de GR).



Émissions Acoustiques

Signal acoustique

- Le signal acoustique corrèle fortement avec le signal de déformation observé optiquement (en temps et en espace).
- Similarités (du moins qualitatives) entre le signal acoustique enregistré et le signal acoustique émis lors des glissements lents.
- Suggère un modèle d'aspérités incorporées dans une région qui se déforme asismiquement (fluage).
- Étude du signal acoustique dans les zones de failles pour étudier les comparaisons avec les résultats expérimentaux

Lien vers les séismes

Analogie entre les modes de rupture

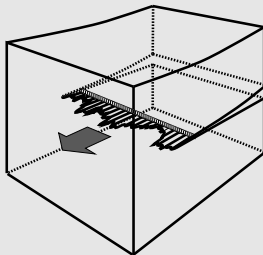
Une identification simple du fait de noyaux élastodynamiques similaires

$$\delta(x, t) \longleftrightarrow a(x, t)$$

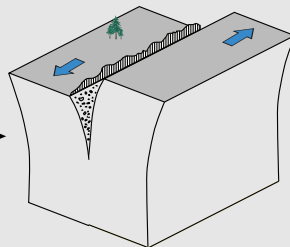
$$\tau(x, t) \longleftrightarrow G(x, t)$$

$$\tau_c(x, t) \longleftrightarrow G_c(x, t)$$

Mode I



Mode III



Zone d'étude

Réseau CINNET

Réseau de sismomètres "courtes-périodes", 3 composantes, enregistrement continu à 100Hz.

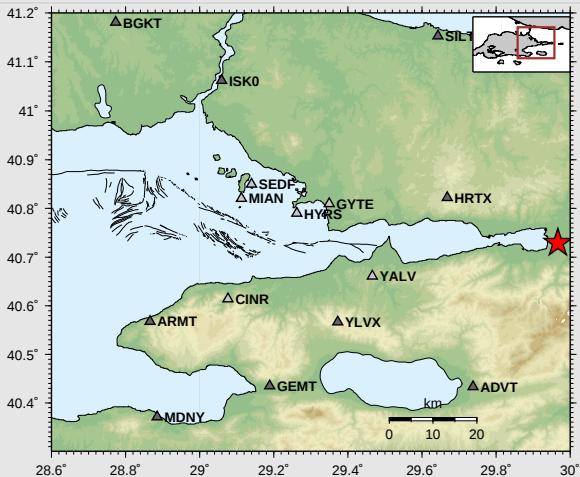
Localisé à la terminaison ouest de la rupture du séisme de 1999.

Proximité d'un segment de faille à haut risque.

Une zone d'étude à l'activité importante et avec une diversité de phénomènes (essaims de sismicité, LFE, segment *supershear*, ...).

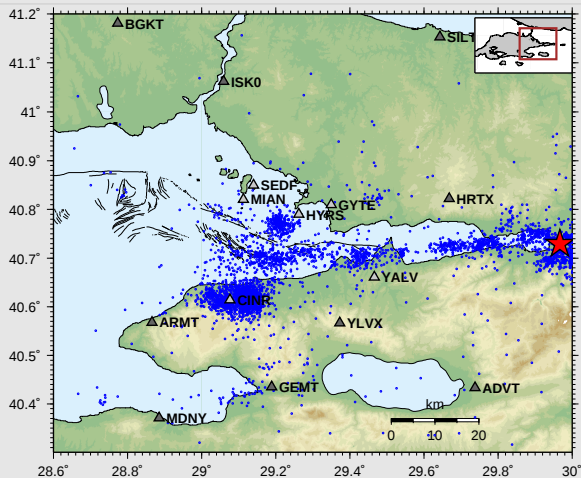
⇒ Un endroit propice pour étudier la mécanique de la déformation crustale à travers la microsismicité.

Réseau CINNET



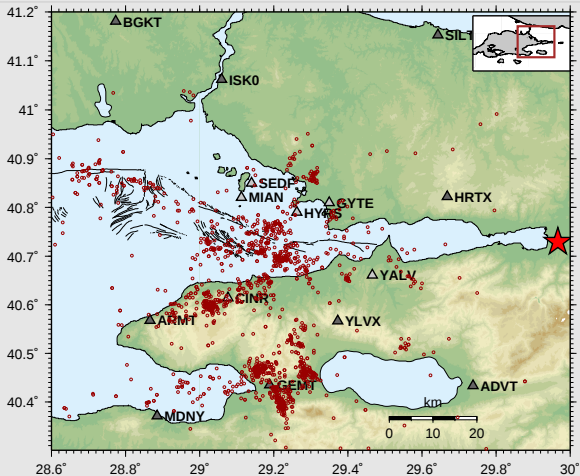
Carte des stations

Réseau CINNET



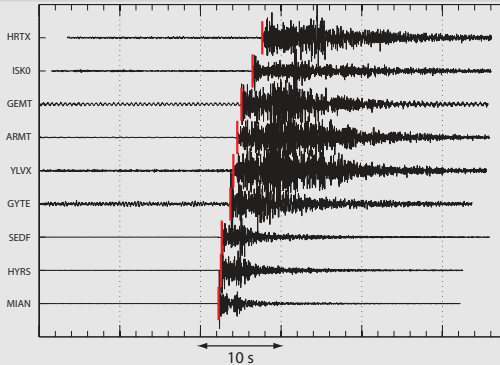
Répliques du séisme d'Izmit

Réseau CINNET



Activité pour la période 2009-2010

Séisme dans le bassin de Cinarcik



- Développement de méthodes d'analyse fines et automatiques de la microsismicité (détection, localisation ...)
- Étude des mécanismes de déclenchement.
- Relation avec les propriétés de la source (chute de contrainte) et les propriétés du milieu.

Conclusions-Perspectives

Point 1

La présence de défauts est un point important à prendre en compte. Ce n'est pas juste du bruit qui se superpose à un signal modélisé dans un milieu homogène.

Conclusions-Perspectives

Point 1

La présence de défauts est un point important à prendre en compte. Ce n'est pas juste du bruit qui se superpose à un signal modélisé dans un milieu homogène.

Point 2

L'évolution de la déformation dans les milieux hétérogènes à faible vitesse de déformation (macroscopiquement) obéit à une loi d'Arrhenius (conséquence pour l'énergie de fracturation).

Conclusions-Perspectives

Point 1

La présence de défauts est un point important à prendre en compte. Ce n'est pas juste du bruit qui se superpose à un signal modélisé dans un milieu homogène.

Point 2

L'évolution de la déformation dans les milieux hétérogènes à faible vitesse de déformation (macroscopiquement) obéit à une loi d'Arrhenius (conséquence pour l'énergie de fracturation).

Point 3

Les émissions acoustiques enregistrées sont des marqueurs de la déformation locale. Leur organisation spatio-temporelle ainsi que leur caractéristiques (propriétés de la source) peuvent renseigner sur le processus de déformation en cours.

Conclusions-Perspectives

Point 1

La présence de défauts est un point important à prendre en compte. Ce n'est pas juste du bruit qui se superpose à un signal modélisé dans un milieu homogène.

Point 2

L'évolution de la déformation dans les milieux hétérogènes à faible vitesse de déformation (macroscopiquement) obéit à une loi d'Arrhenius (conséquence pour l'énergie de fracturation).

Point 3

Les émissions acoustiques enregistrées sont des marqueurs de la déformation locale. Leur organisation spatio-temporelle ainsi que leur caractéristiques (propriétés de la source) peuvent renseigner sur le processus de déformation en cours.

Point 4

La mesure de déformations locales en profondeur dans la croûte sont difficiles à obtenir. La signature microsismique peut être utilisée en analogie avec les AE pour remonter à la mécanique de la déformation crustale.

Conclusions-Perspectives

Point 1

La présence de défauts est un point important à prendre en compte. Ce n'est pas juste du bruit qui se superpose à un signal modélisé dans un milieu homogène.

Point 2

L'évolution de la déformation dans les milieux hétérogènes à faible vitesse de déformation (macroscopiquement) obéit à une loi d'Arrhenius (conséquence pour l'énergie de fracturation).

Point 3

Les émissions acoustiques enregistrées sont des marqueurs de la déformation locale. Leur organisation spatio-temporelle ainsi que leur caractéristiques (propriétés de la source) peuvent renseigner sur le processus de déformation en cours.

Point 4

La mesure de déformations locales en profondeur dans la croûte sont difficiles à obtenir. La signature microsismique peut être utilisée en analogie avec les AE pour remonter à la mécanique de la déformation crustale.

Point 5

Modélisation & expérimentation directement en mode de cisaillement pour se rapprocher des conditions naturelles.