

Intégration de données dans la modélisation de failles:

Cas des données expérimentales de compaction par fluage



D.D. Fitzenz

IPGS, CNRS, Strasbourg - France

A. Jalobeanu

LSIIT, CNRS, Strasbourg - France

S.H. Hickman

USGS, Menlo Park, CA



Géophysique
Strasbourg



SC/EC



MARIE CURIE ACTIONS

Octobre 2006

Plan

- Qui suis-je, où vais-je, à quel étage ère-je?
- Mes modèles déterministes de faille grande échelle, et rôle des fluides, notamment pendant l'intersismique
- Intérêt de travailler sur l'intégration de données
- Expériences de fluage en laboratoire
 - La méthode d'analyse usuelle et ses limites
 - Notre inférence bayésienne : outil de planification et outil d'analyse de données expérimentales
- Intégration d'une loi de compaction probabiliste dans un modèle de rupture
- Projets en cours et Perspectives

Qui suis-je, où vais-je, à quel étage ère-je?

Delphine Fitzenz

Ingénieur EOPGS 1998, PhD ETH Zürich 2002, Post-doc USGS/Stanford 2002-2004

CDD CNRS-IRG (nov. 2005 - oct. 2008)

Equipes Physique des Roches et Tectonique active

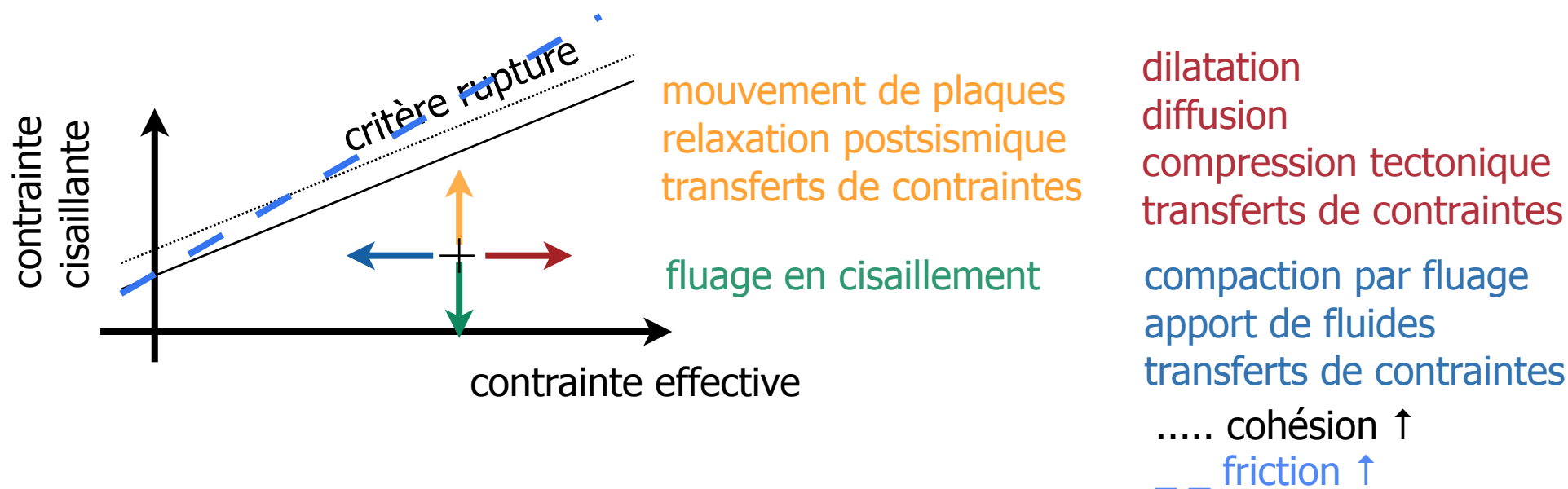
Bureau 207, 2ème étage

Mes thèmes de recherche :

- Rhéologie et résistance des failles; rôle des fluides
- Analyse quantitative de données expérimentales de déformation des roches
- Quantification et propagation des incertitudes
- Intégration de données dans des modèles directs de failles
- Aléa sismique

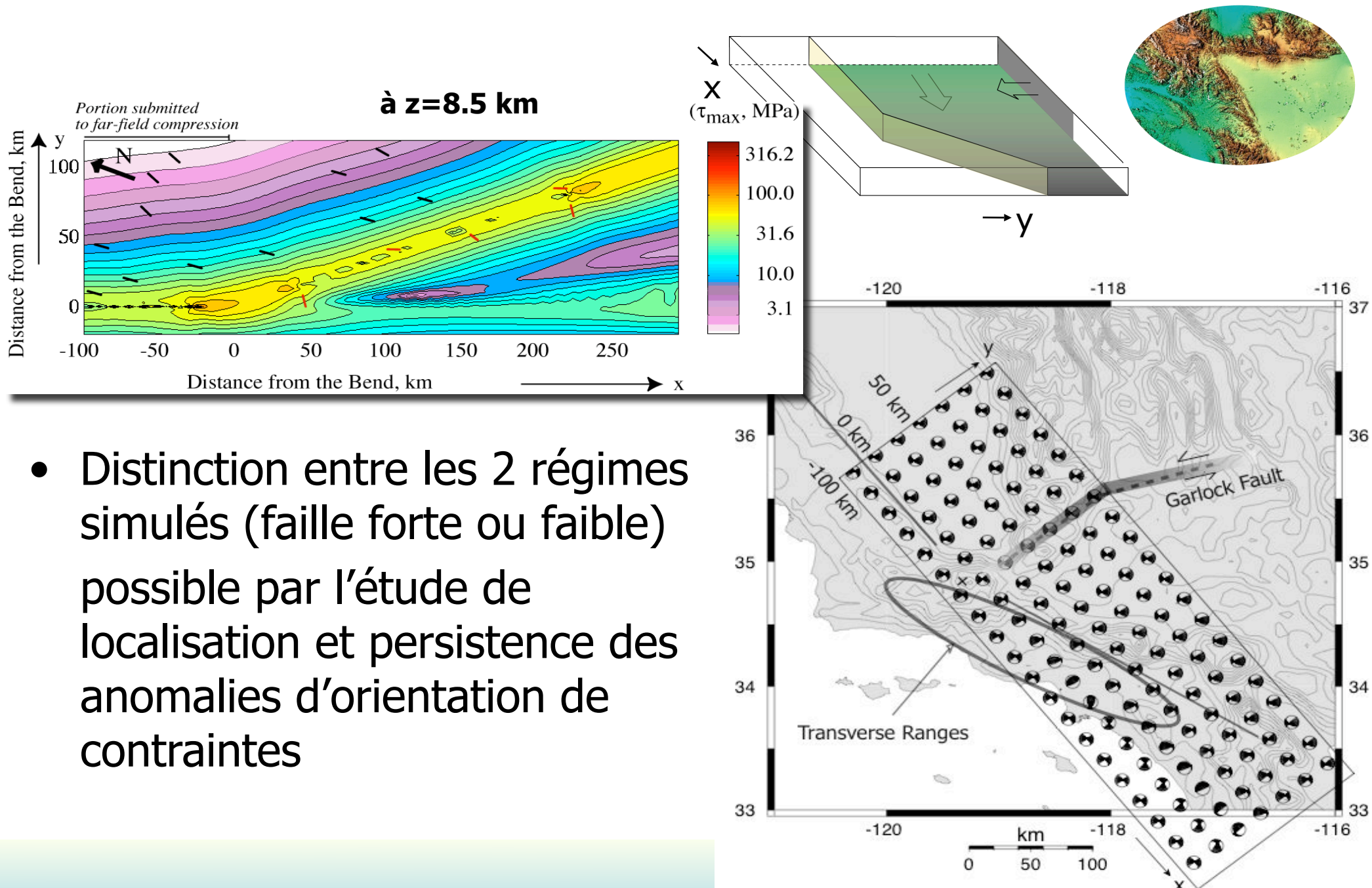
Simulations numériques de systèmes de failles

De l'importance de l'intersismique



- Transferts de contraintes
Interprétation difficile sans tenseur de contraintes,
pression fluide (poroélasticité,...), ...
- Mêler physique des roches et sismologie
pour modéliser l'évolution temporelle de systèmes de failles

Orientation des contraintes liée au profil de glissement



- Distinction entre les 2 régimes simulés (faille forte ou faible) possible par l'étude de localisation et persistance des anomalies d'orientation de contraintes

Intégration de données... bayésienne?

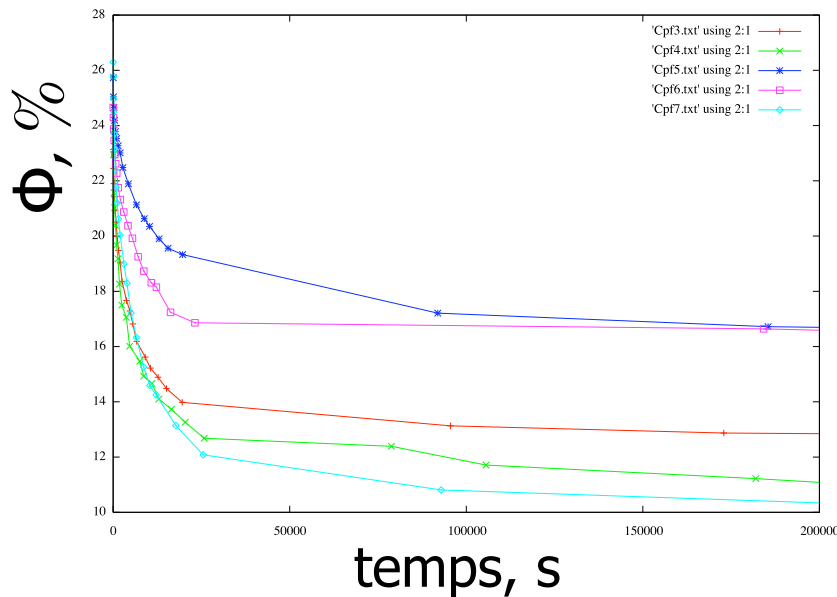
L'intégration de donnée devrait :

- tirer partie au mieux de nos connaissances quantitatives et qualitatives (a priori) sur les failles,
- refléter la nature aléatoire de toute mesure,
- propager ces incertitudes jusqu'aux résultats finaux,
- permettre par la sélection de modèles de réduire les erreurs liées au choix d'un modèle non adéquat,
- permettre de tester le type de complexité qu'on obtient quand on introduit de la variabilité dans les paramètres d'entrée.

Tous ces points sont nécessaires si on veut aller vers des méthodes d'évaluation de l'aléa sismique qui soient basées sur la physique des failles.

Cas des expériences de compaction par fluage

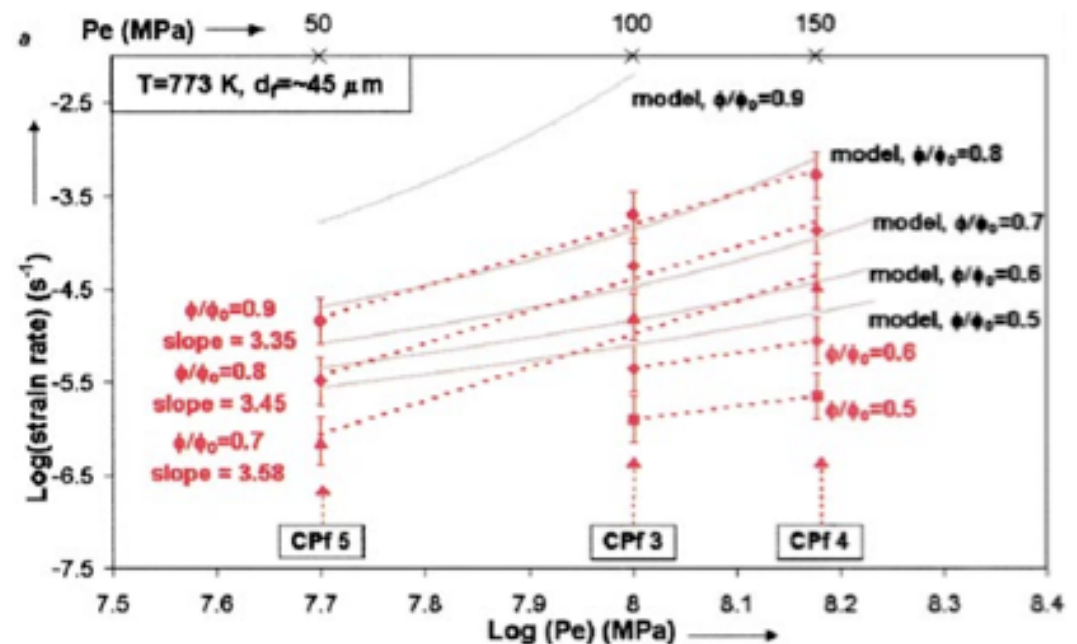
- But : fournir des lois de compaction quantitatives
- Type de données :



Niemeijer et al., EPSL 2002
 50-150 MPa, 400-600°C

★ Analyse usuelle :

- calculer la dérivée de la porosité
- transformer en vitesse de déformation $d\beta/dt$
- définir l'état de l'échantillon
- interpoler ou extrapoler $d\beta/dt$ aux mêmes états pour expériences à même température



Notre inférence bayésienne

- For fluid-assisted compaction processes

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \theta_0 \times \sigma_{\text{eff}}^{\theta_1} \times \exp(-\theta_2/(RT)) \times \exp(\theta_3 \varphi)$$

Stress
exponent

Apparent
activation
energy

- After integration

$$f(\varphi_0, t) = -\mu \log (t e^{-\lambda'/\mu} + e^{-\varphi_0/\mu})$$

- and reparametrization

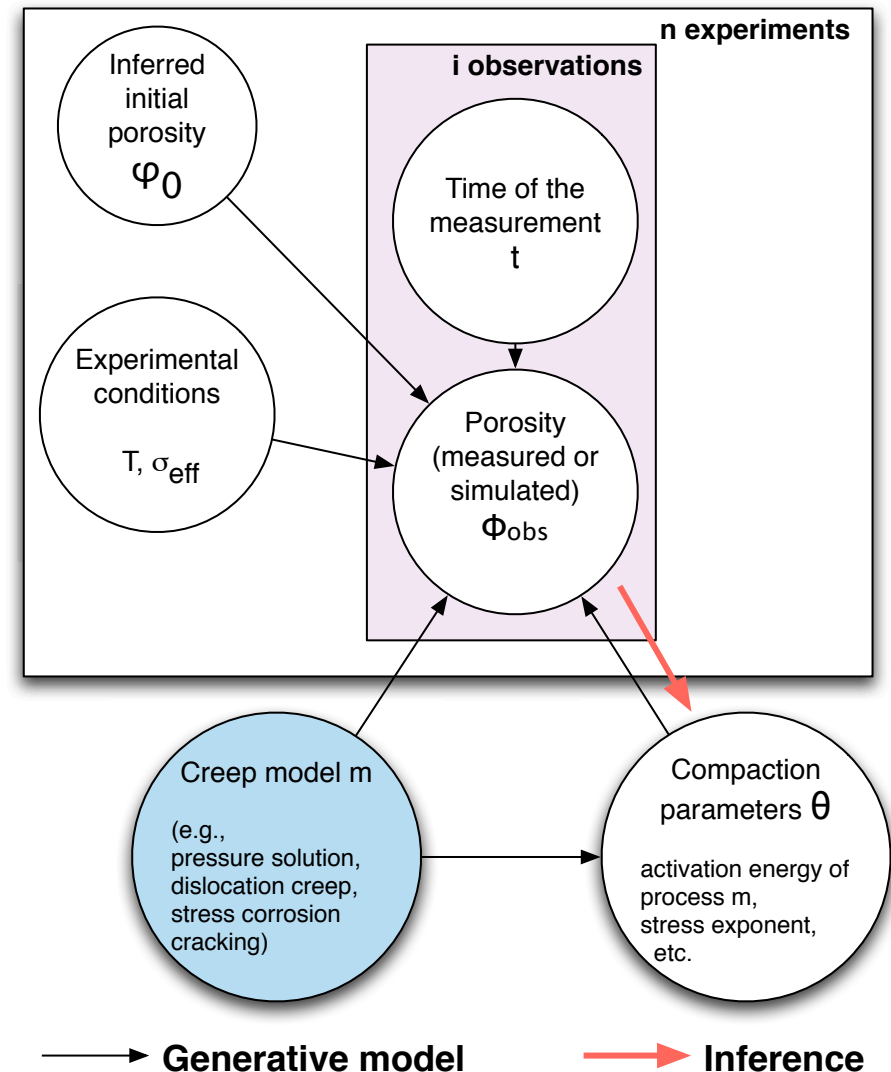
$$\Theta = F(\theta) = \{\log(-\theta_0)/\theta_3, \theta_1/\theta_3, \theta_2/\theta_3, 1/\theta_3\}$$
$$\lambda' = h(\Theta) = -\Theta_0 - k_1 \Theta_1 + k_2 \Theta_2 + \Theta_3 \log \Theta_3$$
$$\mu \equiv \Theta_3$$

Advantages of integrating

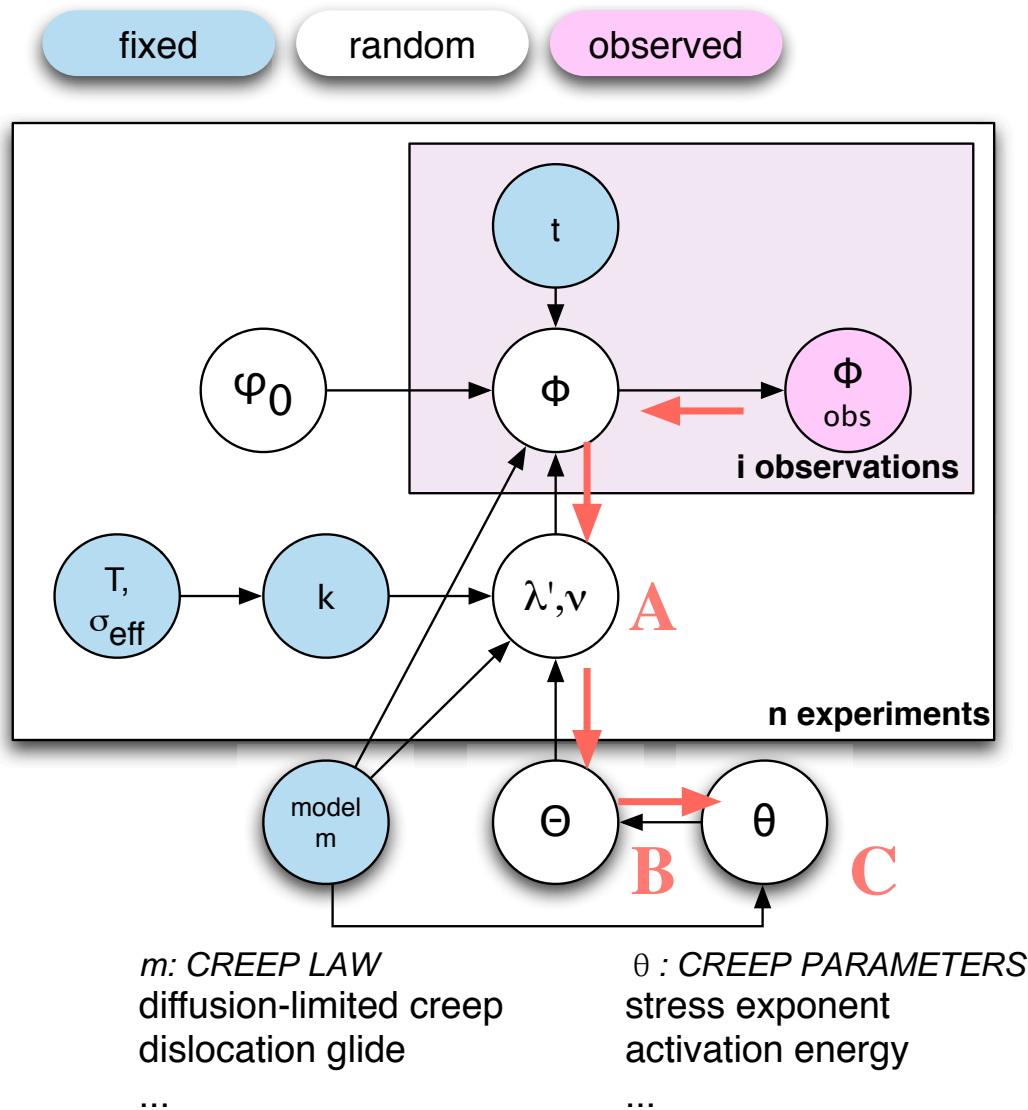
- no need to define the notion of state
- no need to compute strain or compaction rates
- we can **analyse all data simultaneously**

Modèle graphique

- Utile pour générer des données simulées
- Premier guide pour l'inférence
- Chaque noeud est une variable aléatoire
- Chaque flèche est un lien de causalité, une dépendance
- Mais les relations entre les variables sont trop complexes et non-linéaires
> reparamétrisation, et 2ème graphe

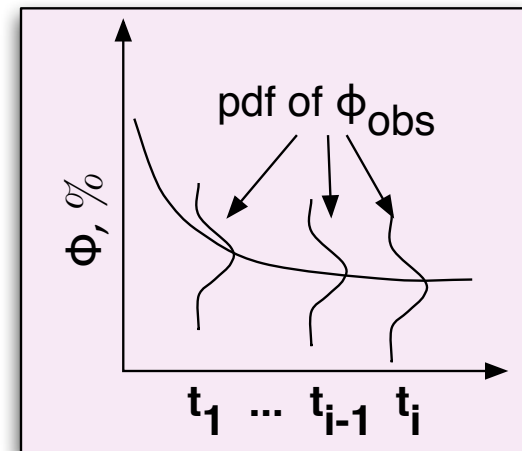


Modèle graphique



→ Generative model

Generate ϕ_{obs} for each experiment



↔ with $\Phi(t) = m(T, \sigma_{\text{eff}}, \theta, \phi_0, t)$

← Inference

Find the pdf of θ using all the ϕ_{obs} , assuming that m reflects the dominant process during all of the experiments.

Les 3 étapes de l'inférence

A: For each experiment, infer λ' and ν

$$P(\varphi_0, \{\phi^i, \phi_{\text{obs}}^i\}, \lambda', \nu) = P(\varphi_0) \prod_i \underbrace{P(\phi_{\text{obs}}^i | \phi^i)}_{\text{Gaussian pdf}} \underbrace{P(\phi^i | \varphi^i, \lambda', \nu)}_{\text{Dirac}} \delta(f(\varphi_0, t^i, \lambda', \nu) - \phi^i)$$

Joint pdf
Prior pdf

B: Infer Θ from $\{\lambda'^n, \nu^n\}$

$$P(\Theta, \{\lambda'^n, \nu^n, \lambda'_{\text{obs}}^n, \nu_{\text{obs}}^n\}) = P(\Theta) \prod_n \underbrace{P(\lambda'^n, \nu^n | \Theta, m^n)}_{\text{Dirac}} \underbrace{P(\lambda'_{\text{obs}}^n, \nu_{\text{obs}}^n | \lambda'^n, \nu^n)}_{\text{Gaussian pdf}}$$

C: Revert from Θ to the creep parameters θ_i

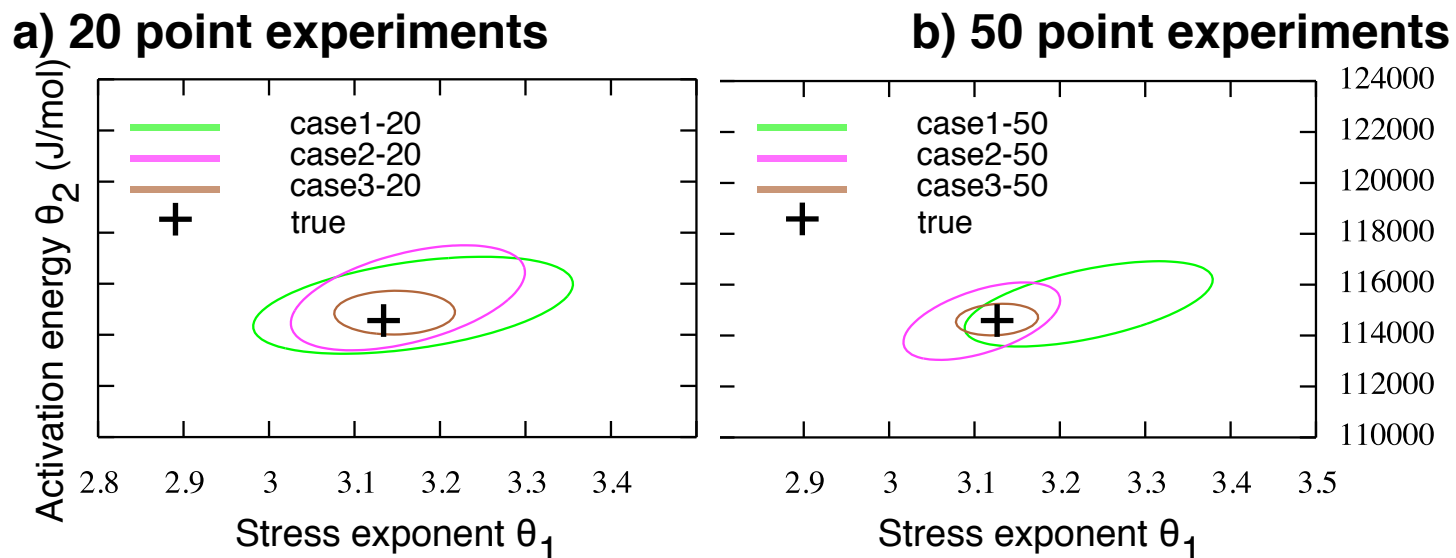
(Gaussian approx. of the posterior of θ)

$$P(\theta | \{\{\phi_{\text{obs}}^i, \varphi_{\text{obs}}^i\}^n\}) \simeq P(\theta | \{\lambda_{\text{obs}}^n, \nu_{\text{obs}}^n\}) \simeq G_{\theta}(F^{-1}(\hat{\Theta}), (J^T B J)^{-1})$$

Hierarchical inference

Outil de planification

- Simulated experimental conditions
 - Setting (1): 6 experiments, T within $[300,420]$ °K, σ_{eff} within $[15,105]$ MPa;
 - Setting (2): 12 experiments, same range of T and σ_{eff} as (1);
 - Setting (3): 12 experiments, T within $[300,720]$ °K, σ_{eff} within $[15,200]$ MPa
- Creep law from Rutter and Wanten, 2001
- Variable time intervals between 2 consecutive data points so that porosity changes are constant
- Gaussian noise added to simulate the acquisition process



Outil de planification

- More data, less uncertainties
 - More experiments, less uncertainties
 - **Larger T and σ_{eff} range, less correlation**
- (better constrained constitutive parameters)**

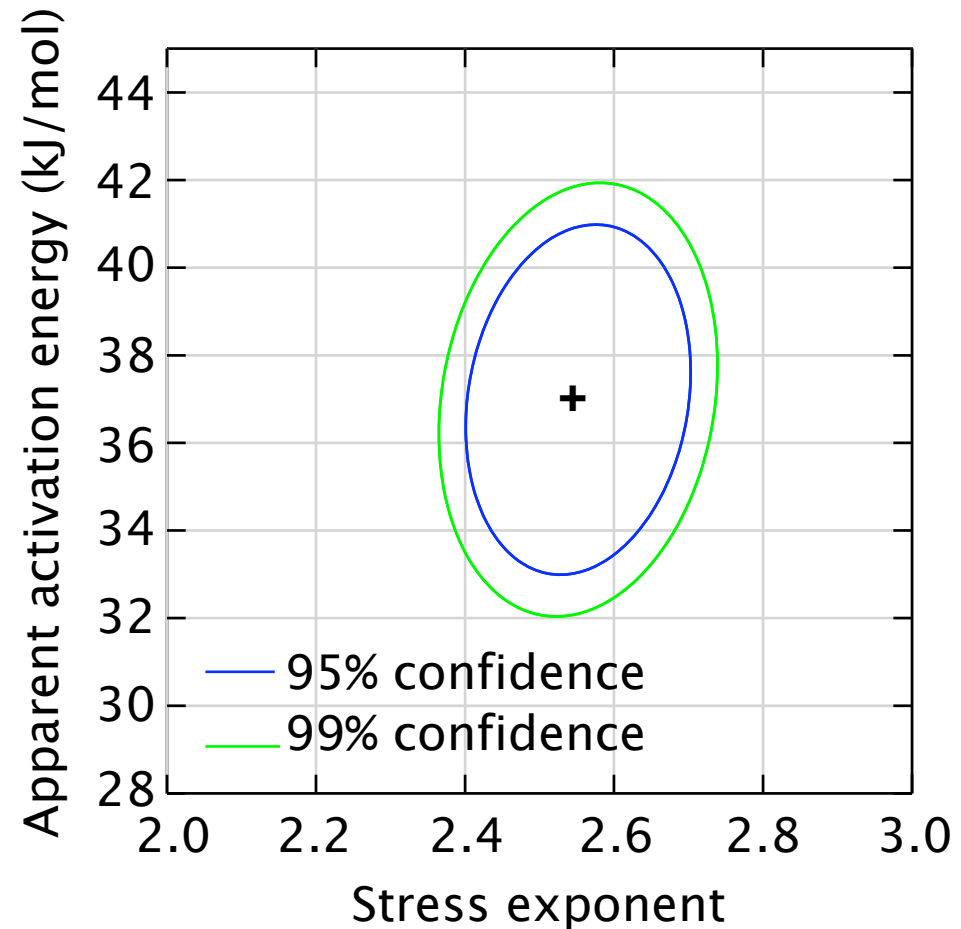
Outil d'analyse de données réelles

Niemeijer et al., EPSL 2002
50-150 MPa, 400-600°

Global data set: 88 points

$\theta_j = \{6.40 \cdot 10^{-11}; 2.55; 37 \text{ kJ/mol}; 0.53\}$,
with std. dev. of $3.0 \cdot 10^{-11}$, $6.2 \cdot 10^{-2}$, $1.6 \cdot 10^3$, and $9.4 \cdot 10^{-3}$ resp.

- Grande précision
- Faible corrélation
- Mais des valeurs beaucoup trop faibles!!

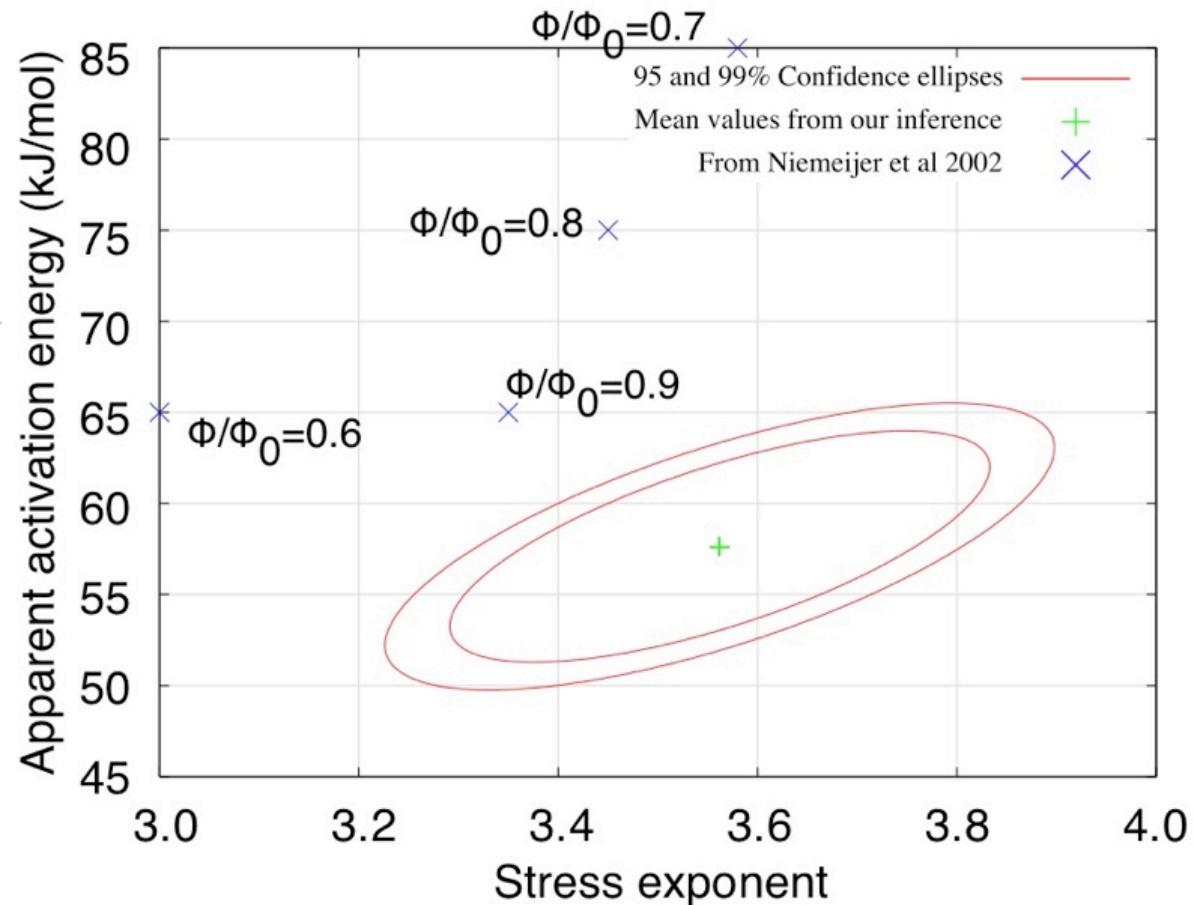


Choisir un sous-ensemble de données pour mieux identifier les processus dominants

θ_0	θ_1	θ_2 (kJ/mol)	θ_3
4.20e-13	3.56	57.63	0.72
5.59e-26	-2.35e-14	-2.19e-10	-3.02e-15
-	1.22e-02	1.98e+02	1.58e-03
-	-	6.72e+06	3.44e+01
-	-	-	2.74e-04

Matrice de covariance

Subset $\Phi/\Phi_0 \in [0.5, 0.8]$: 53 points
 $\theta_j = \{4.2 \cdot 10^{-13}; 3.56; 57.6 \text{ kJ/mol}; 0.71\}$,
 with std. dev. of $2.3 \cdot 10^{-13}$, 0.11, 2.6 kJ/mol,
 and 0.016 resp.

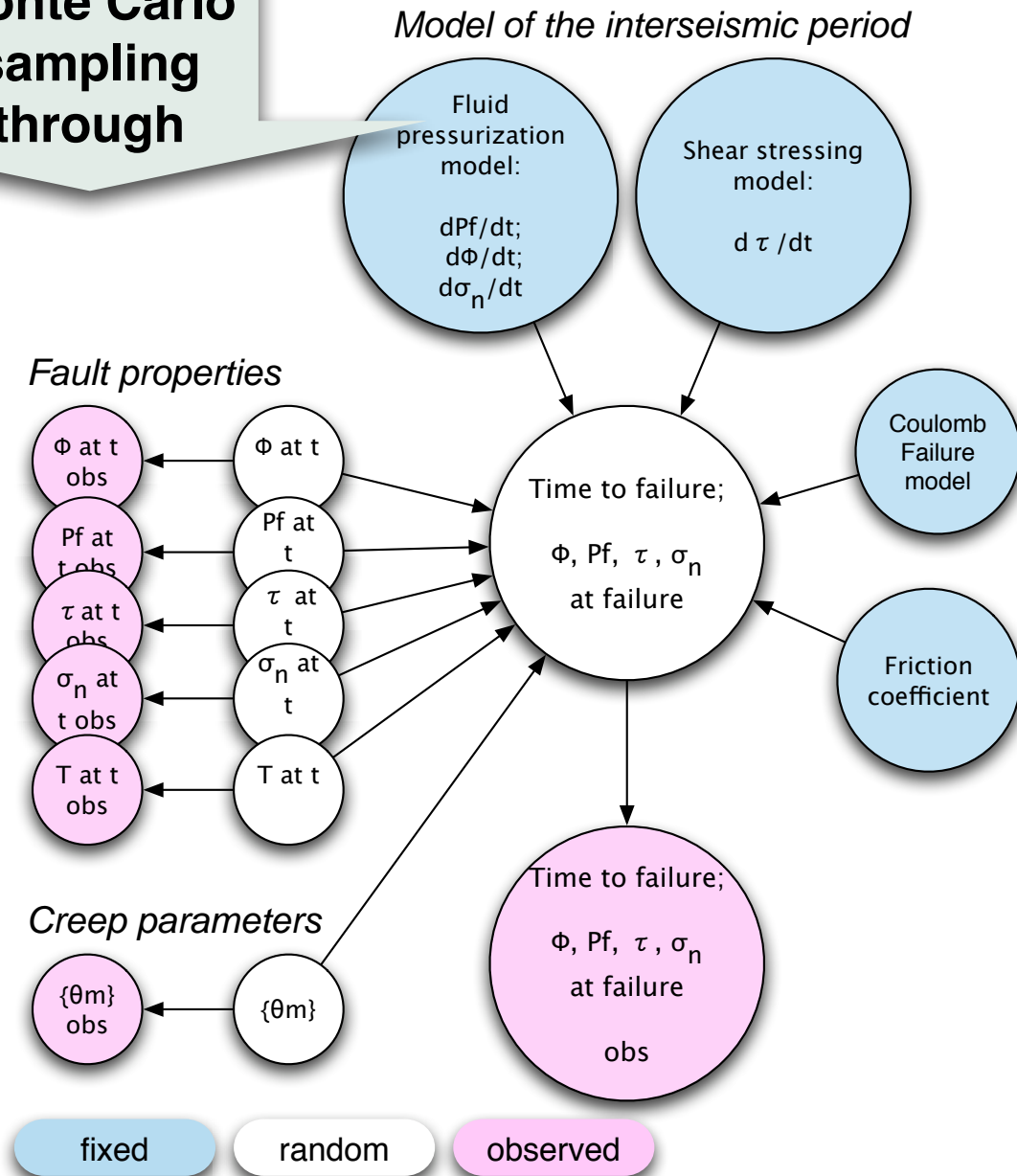


Précision et corrélation

- Global data set, small unwanted correlation between θ_1 and θ_2
- Data set restricted to smaller range of porosities resolves changes in constitutive parameters during experiments but results in large unwanted correlation and more uncertainties

Modèle de rupture

Monte Carlo sampling through

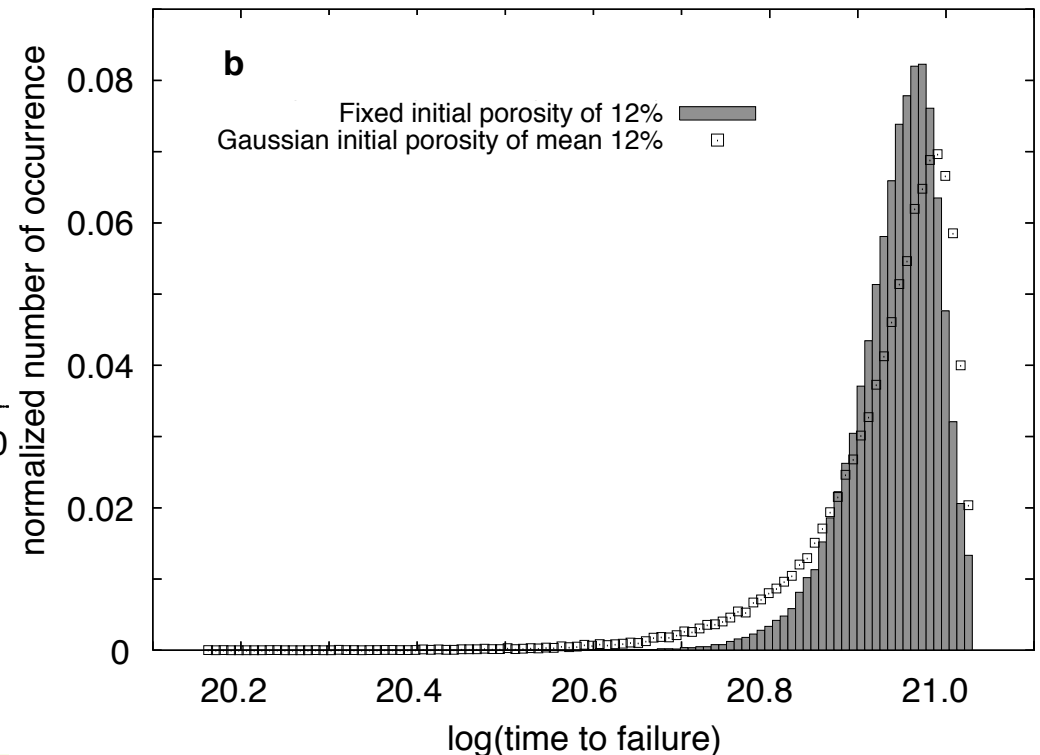
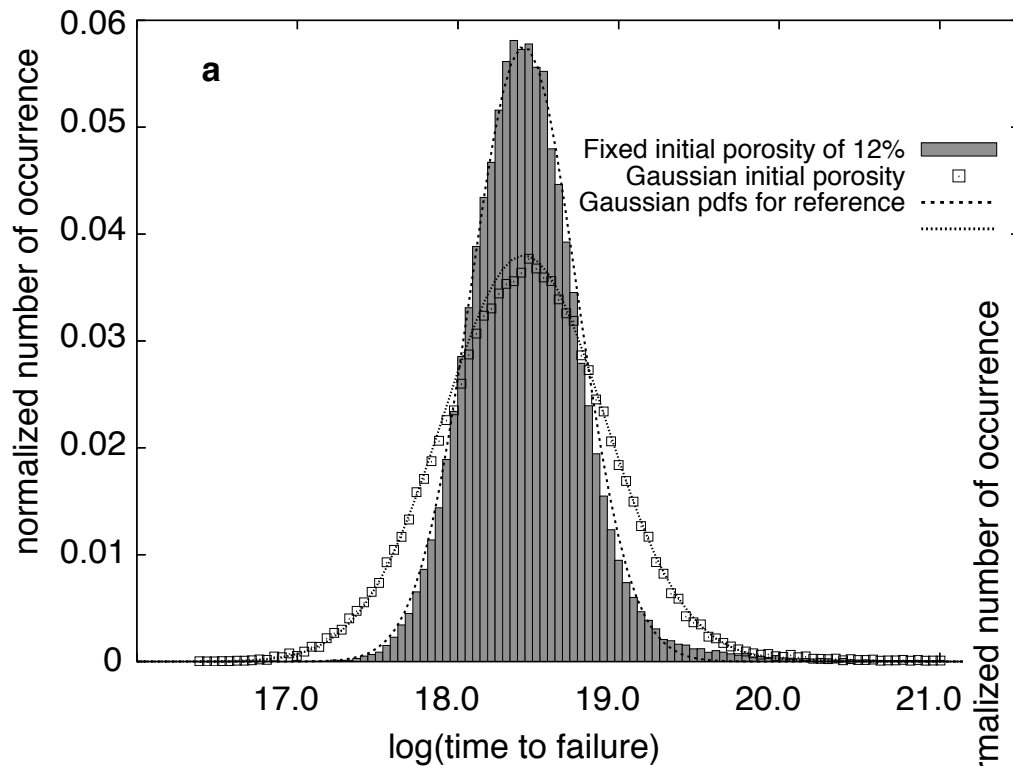


- undrained
- 1 fault element
- $t=0$, 12% porosity
- $z=3\text{km}$
- $\{\theta_j\}$ from previous inversion
- (static) friction=0.6
- $d\tau/dt=2.5$ bar/year
- $d\sigma_n/dt=0$
- Coulomb failure:
 $\tau \geq \text{friction} * (\sigma_n - P_f)$

Results in terms of time to failure

Temps à la rupture

- Utilisant les paramètres de compaction a) d'après toutes les données de Niemeijer et al et b) d'après le sous-ensemble $0.5 < \Phi / \Phi_0 < 0.8$



Forme pdf des temps à la rupture

- C'est la matrice de covariance des paramètres de compaction qui influe sur le type d'asymétrie (vers la dte ou vers la gauche)
- Dans le cas θ non corrélés, que ce soit vraiment lognormal ou plutôt brownian importe peu dans un premier temps : ça peut servir à reparamétriser le pb
- Mais pour le risque sismique, le comportement aux temps longs est important : 0 pour lognormal, mais valeur finie pour BPT
- Malheureusement, avec moins de 50 échantillons d'une loi (ex. catalogue sismicité), il est dur de distinguer lognormal de BPT (Ellsworth et al 99)

Perspectives

- ★ Analyses d'expériences en labo

 - Sélection de modèles (éventuellement pour des expériences en domaine plus ductile)

 - Analyse et intégration d'expériences de compaction sous contraintes déviatoriques dans lesquelles résistance des failles et porosité sont mesurées

- ★ Intégration d'autres types de données.

 - Images optiques très haute résolution

 - Histoire de la sismicité sur 2000 ans : cas de la faille du Levant

Projets en cours

- PI Projet Marie Curie IRG FAULTMOD

Quantitative understanding of the interseismic evolution of fault properties: numerical modelling using lab-experiments;

coordinateur Jean Schmittbuhl; collaborateurs Prof. Chris Spiers, Univ. Utrecht, High Pressure and Temperature Lab., Stephen Hickman, U.S. Geological Survey, Earthquake Hazards Team.

- Projet ANR MODALSIS

Modélisation de l'aléa sismique autour d'Istanbul;

coordonné par Jean Schmittbuhl. Implication à 20%.

- PI Projet PNTS

Inversion d'images optiques haute-résolution pour obtenir le champ de déformation dense : développements méthodologiques;

avec Jérôme Van der Woerd, Jean Schmittbuhl, Renaud Toussaint de l'EOST et André Jalobeanu du LSIIT (Laboratoire des Sciences de l'Image, de l'Informatique et de la Télédétection, Strasbourg).

Analyses d'images optiques

- But : inverser des couples d'images de failles actives décrochantes pour mettre en évidence
 - le partitionnement cosismique de la déformation entre plusieurs failles,
 - l'endommagement,
 - l'hétérogénéité de la rupture en surface très près des failles,
 - et les effets postsismiques
- pour contraindre des modèles numériques de rhéologie de zones de failles 3D (épaisseur non nulle).
- Comparaison des méthodes existantes
 - déphasage en Fourier
 - corrélation (CIV)
 - recallage non-rigide (imagerie médicale)
 - Choix des images à acquérir