

Détermination et interprétation d'un profil complet de contraintes dans l'Est du bassin de Paris

Y. Wileveau¹ & Y. Gunzburger^{2*}

¹ ANDRA, Service scientifique, Bure

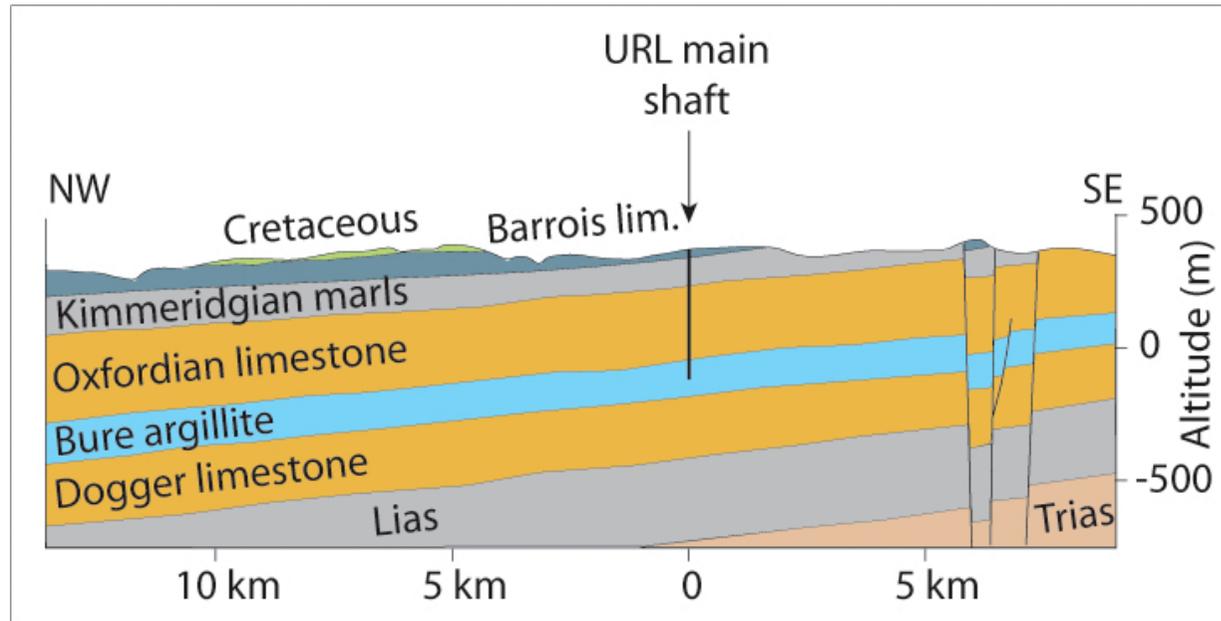
² LAEGO, Ecole des Mines, Nancy

* Travail financé par l'ANDRA, réalisé à l'IPG-Paris sous la direction de F. Cornet
et à l'Université du Minnesota (USA) en collaboration avec E. Detournay

- 1- Mesures par méthodes hydrauliques "classiques"
- 2- Méthodes complémentaires : convergence, breakouts
- 3- Implications "géodynamiques"



Pourquoi estimer l'état de contraintes à Bure ?



- Quasi-absence de topographie
- Stratification sub-horizontale ($1,5^\circ$)
- Pas d'accident tectonique majeur

Du fait des relations d'équilibre :

- Une contrainte principale verticale : $\sigma_v = \rho g z$
- Les deux autres horizontales : σ_h , σ_H

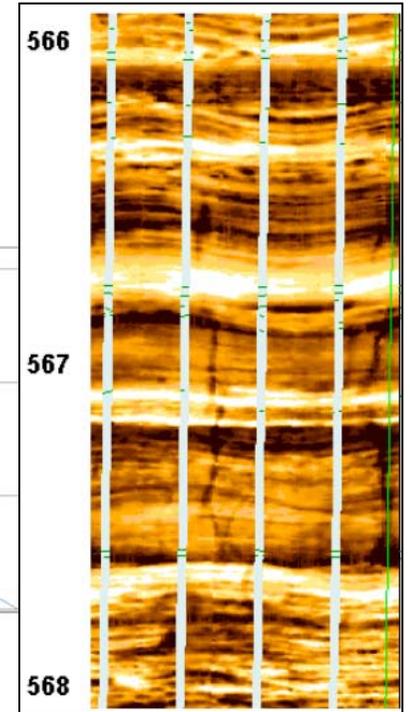
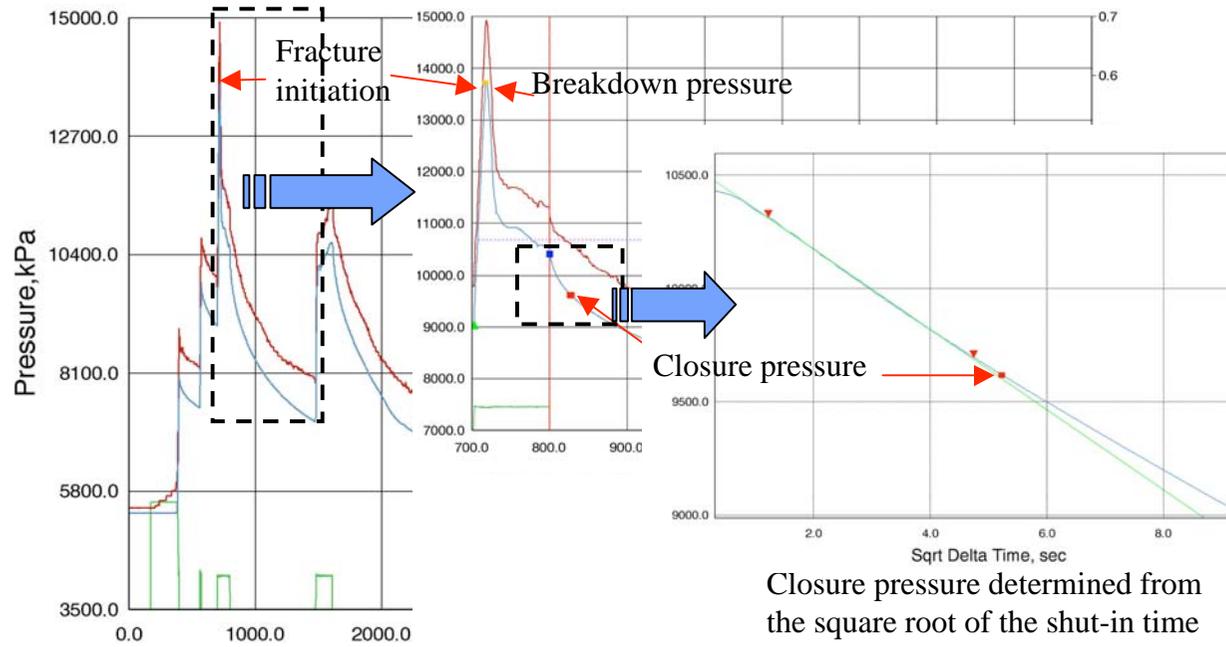
+ histoire de chargement, conditions aux limites...

1- Méthodes hydrauliques
« classiques » :

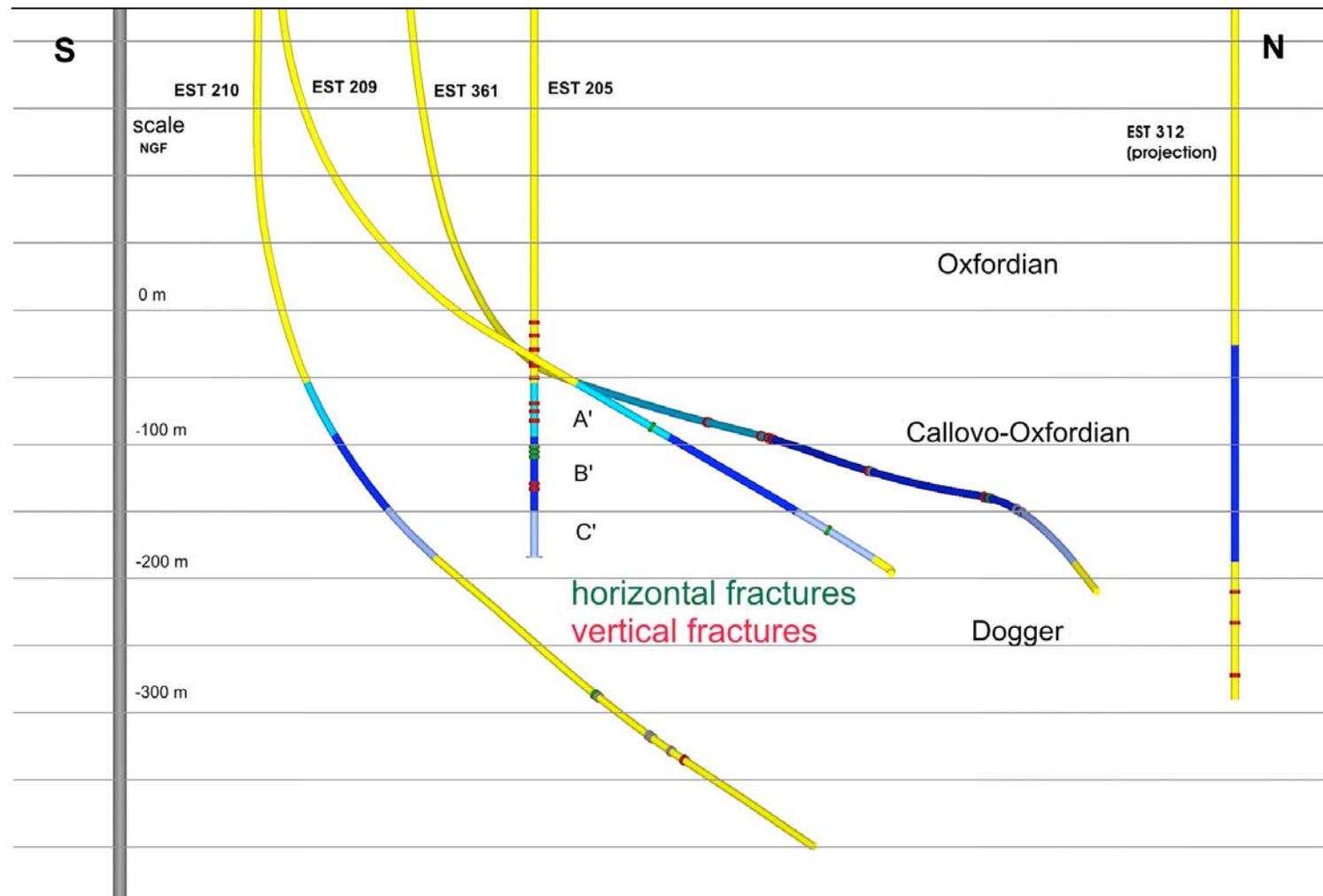
des résultats
remarquablement complets



Dépouillement des essais de fracturation hydraulique



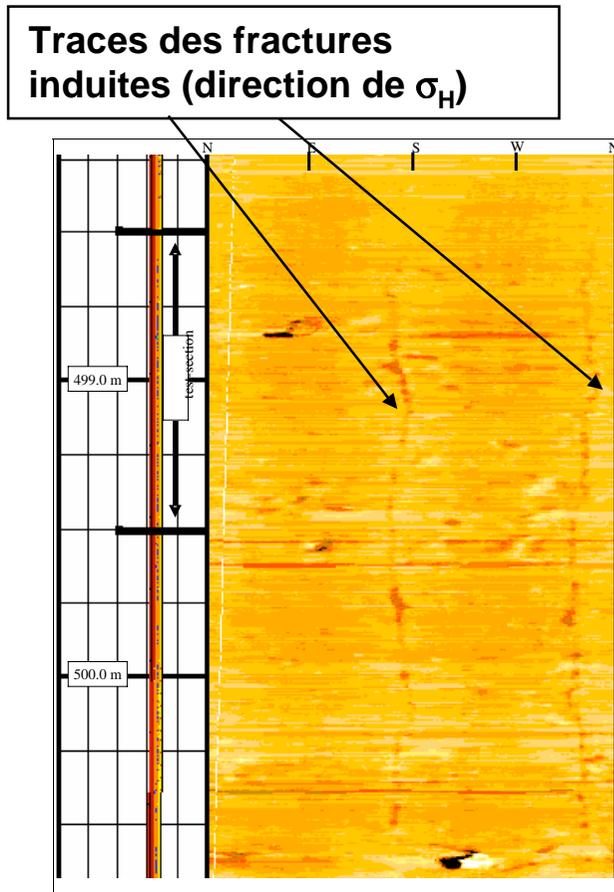
Panorama de l'ensemble des essais de fracturation hydraulique



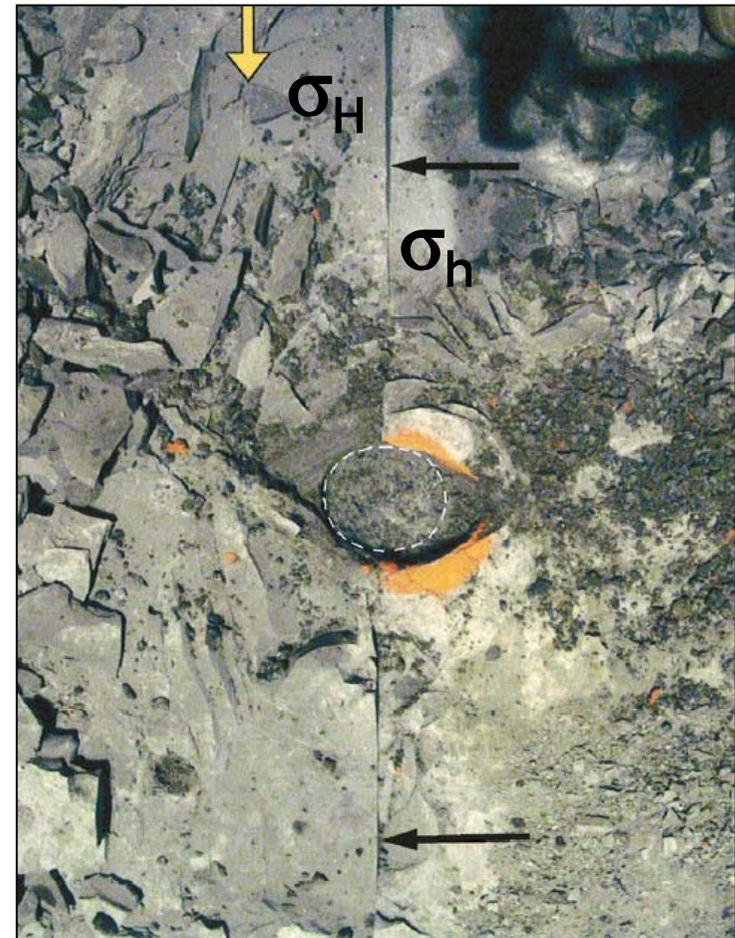
29 essais réussis dans 5 forages :

6 dans les Calcaires oxfordiens, 17 dans le COX et 6 dans les Calcaires du Dogger

Fractures hydrauliques dans le COX mises au jour lors du fonçage du puits principal



Imagerie acoustique UBI après réalisation de la fracturation hydraulique à 499 m dans le forage EST205

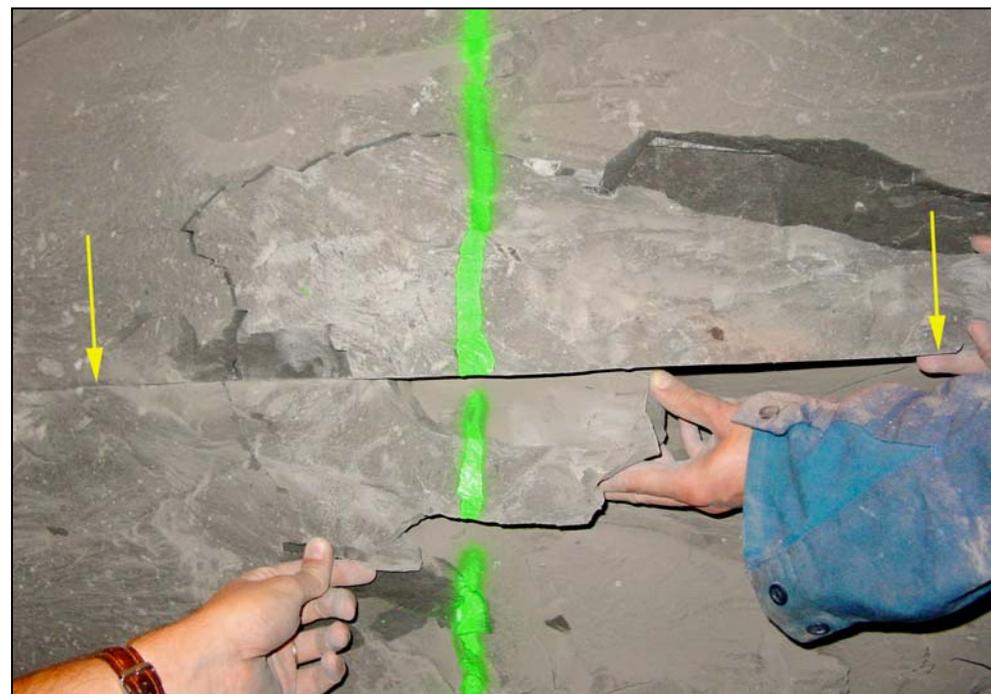


Fond du puits à 499 m, vue du dessus avec la trace du forage vertical EST205

Mais fractures hydrauliques horizontales à certaines profondeurs !



Fracture hydraulique horizontale à 467 m



Fracture hydraulique horizontale à 471 m

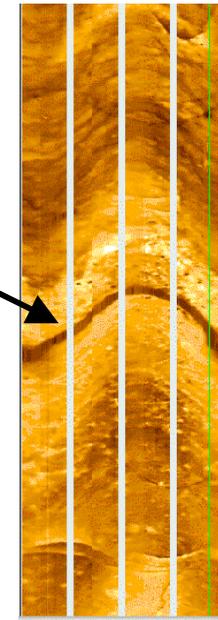
⇒ La contrainte principale verticale est la plus faible des 3 dans cette zone.

Détermination de la contrainte verticale dans le Dogger par la méthode HTPF

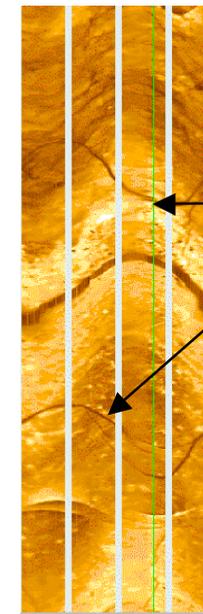
Joint de lignite à la profondeur 655 m utilisable pour une mesure directe de σ_v par la méthode HTPF



FMI avant le test



FMI après le test

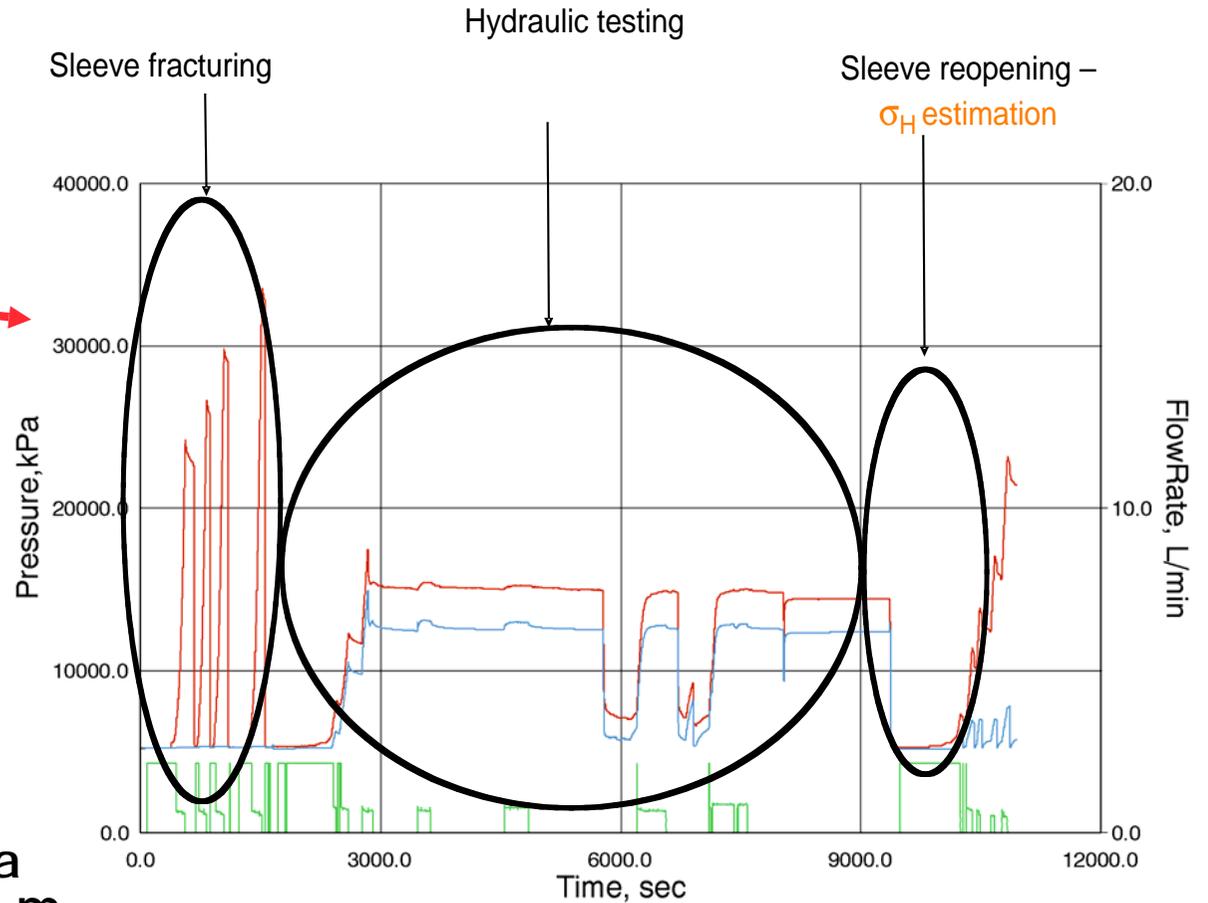
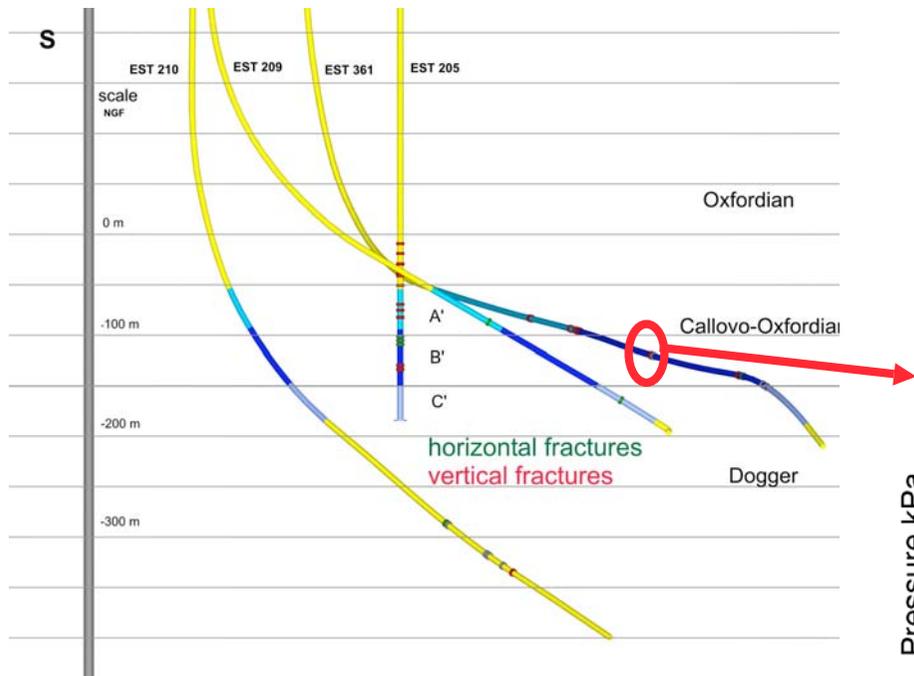


Fractures induites par les packers

➡ Mesure directe : $\sigma_v = 14,7$ MPa à la profondeur 655 m

+ D'autres fractures pré-existantes ont été testées dans le COX ($\sigma_v \approx 12,0$ MPa)

« Sleeve fracturing » et « sleeve reopening » dans le COX

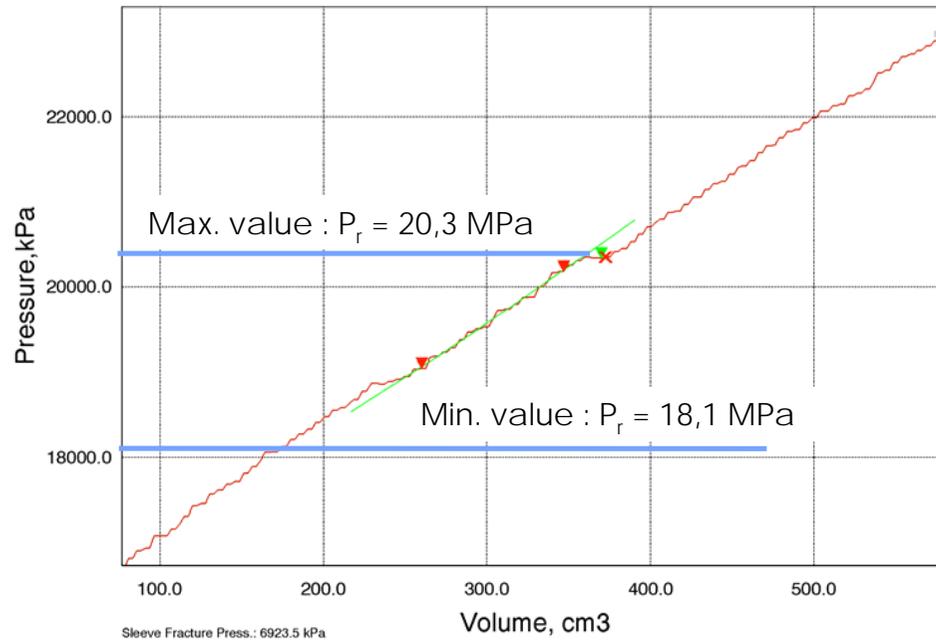


Pour estimer σ_H →

Test spécial à la profondeur 504 m dans un forage sub-horizontal

Estimation de σ_H

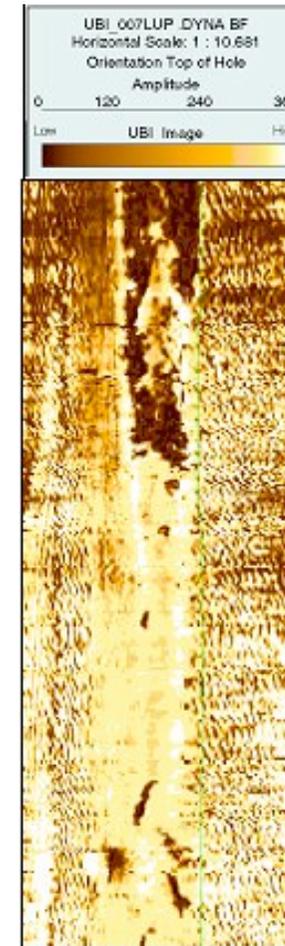
Sleeve reopening : Identification de la pression dans le packer pressure lors de l'ouverture de la fracture



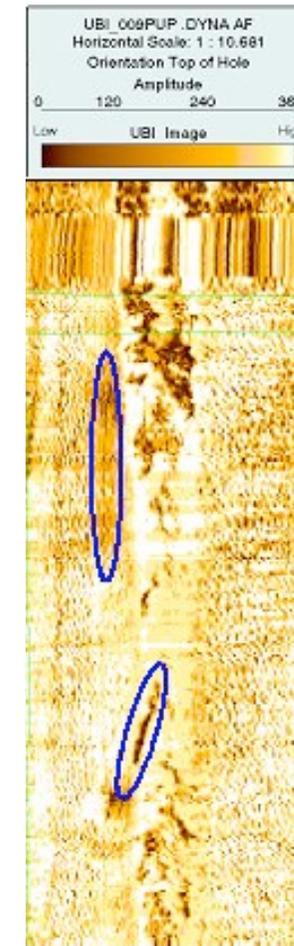
$$\sigma_H - P_0 = 3(\sigma_v - P_0) - (P_r - P_0)$$

$$12.7 \text{ MPa} \leq \sigma_H \leq 14.8 \text{ MPa}$$

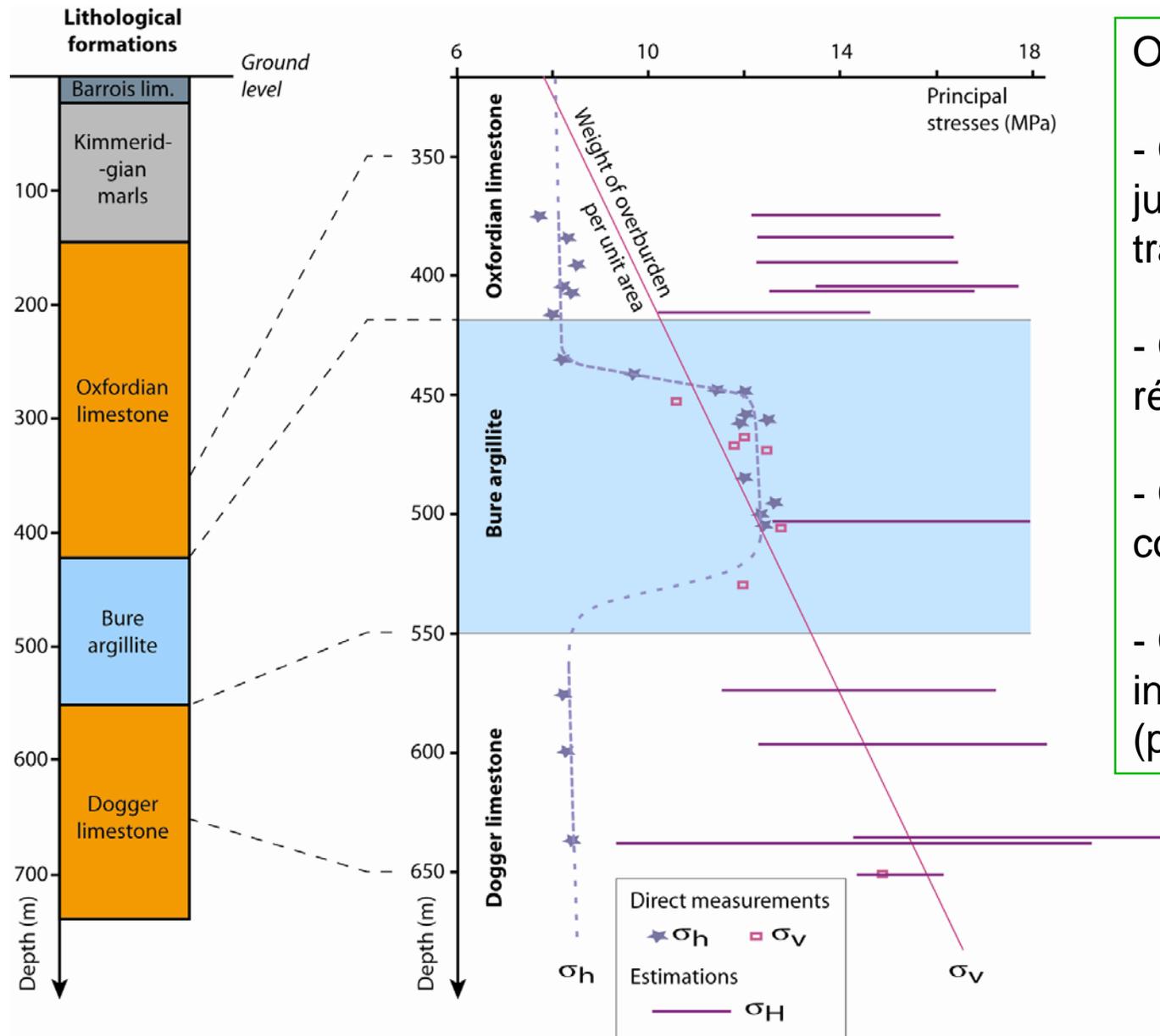
UBI avant le test



UBI après le test



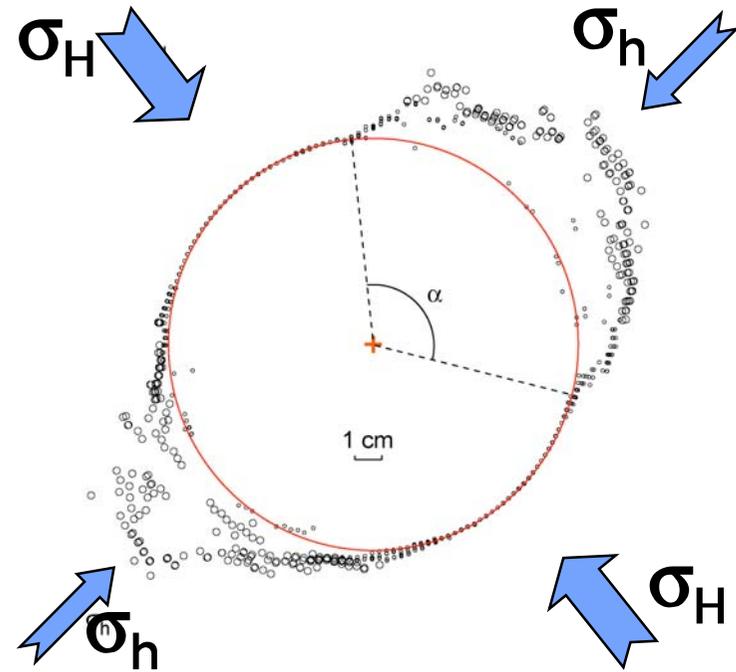
Conclusion : un profil de contraintes remarquablement complet



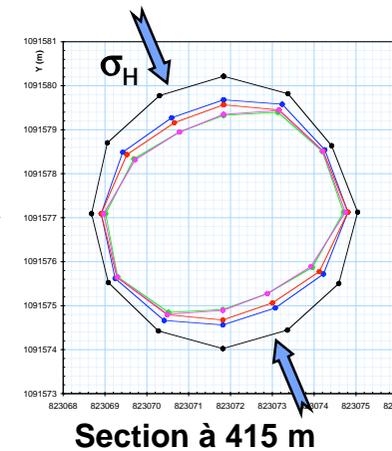
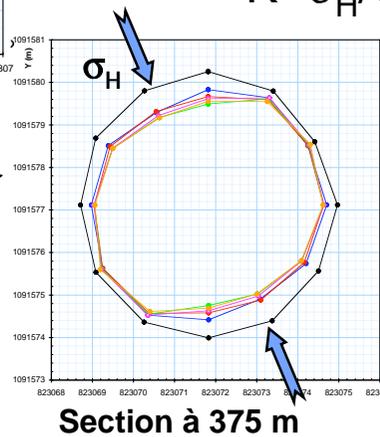
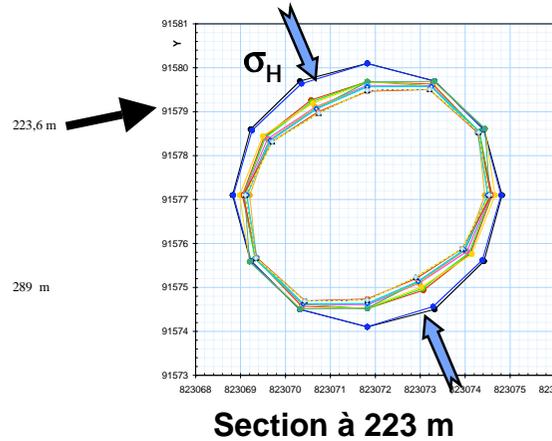
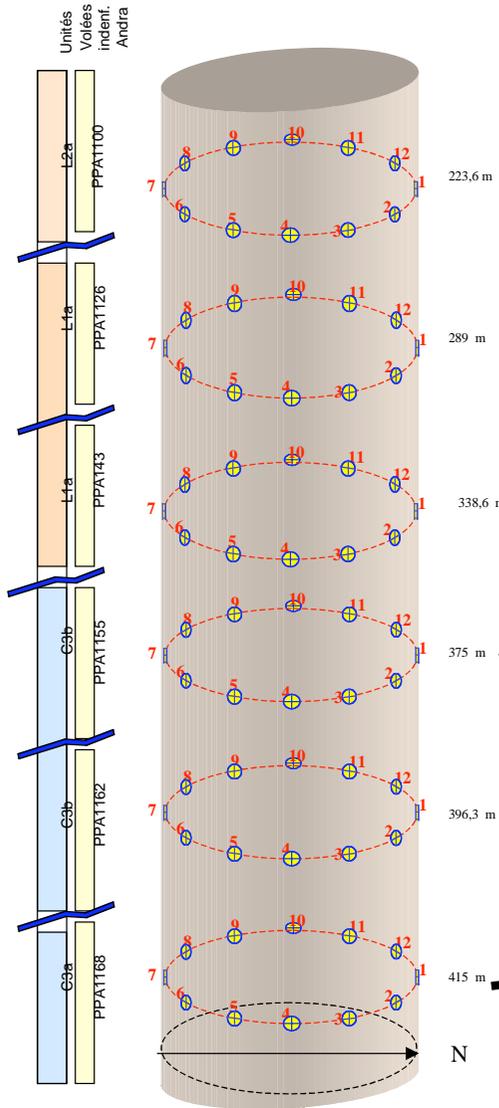
Origine des incertitudes sur σ_H :

- Comportement élastique jusqu'à la rupture fragile en traction (pas de plasticité)
- Connaissance de la résistance en traction
- Critère de rupture en contraintes effectives (*débatu*)
- Connaissance de la pression interstitielle autour du forage (perméabilité)

2- Apport de méthodes complémentaires d'estimation des contraintes

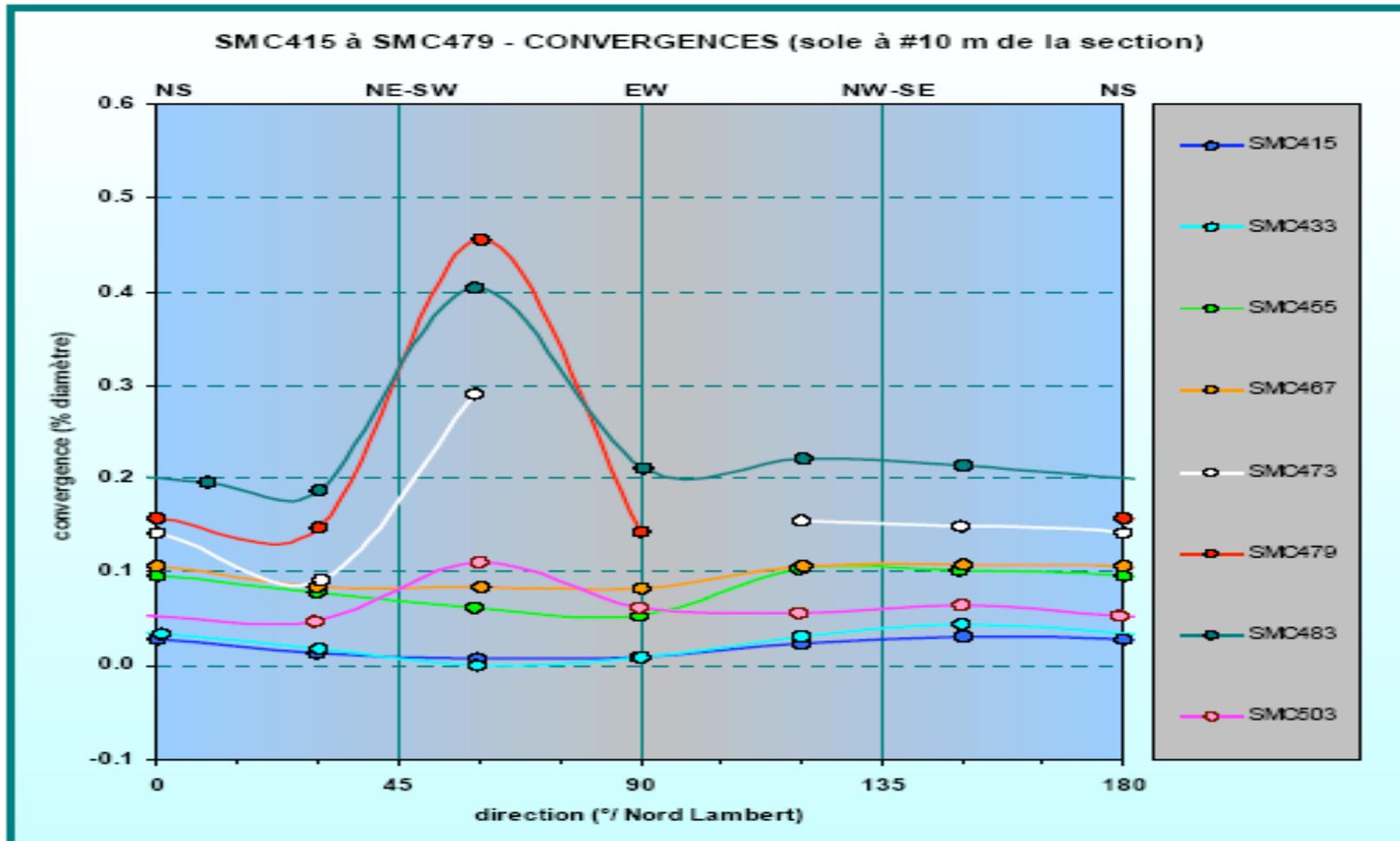


Suivi de la convergence du puits dans les Calcaires oxfordiens



- σ_H orientée N155°E
- Précision : 0,1 mm pour un puits de 6 m de diamètre
- Convergence maximale : $\cong 2\text{mm}$
- Anisotropie de contraintes horizontales : $K = \sigma_H / \sigma_h$ compris entre 1.4 et 1.8

Suivi de la convergence du puits dans le Callovo-Oxfordien

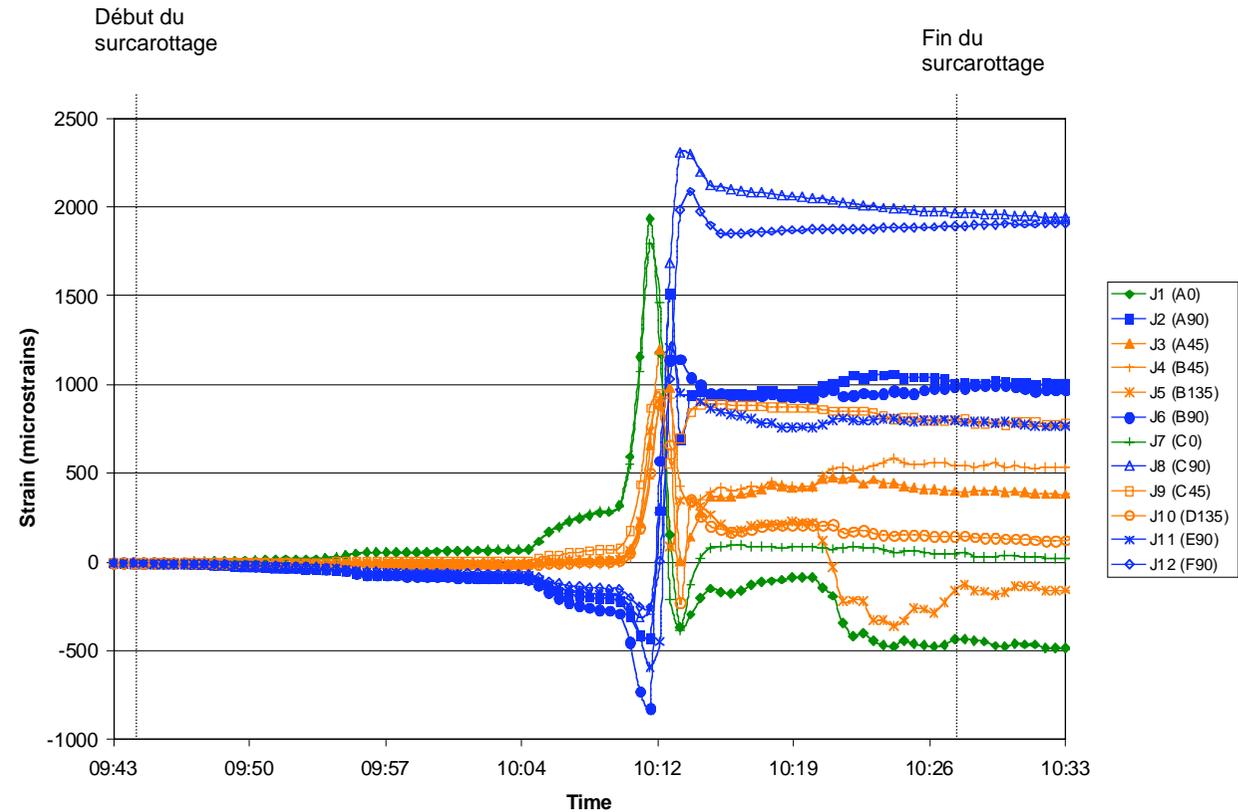


Les convergences *augmentent* dans la direction de σ_h au-delà de 470 m (plastification de la roche en lien direct avec la variation de la teneur en minéraux argileux) ➡ pas interprétable du point de vue $K = \sigma_H / \sigma_h$

Mesures de contraintes réalisées par l'INERIS à partir des galeries

Essai 1

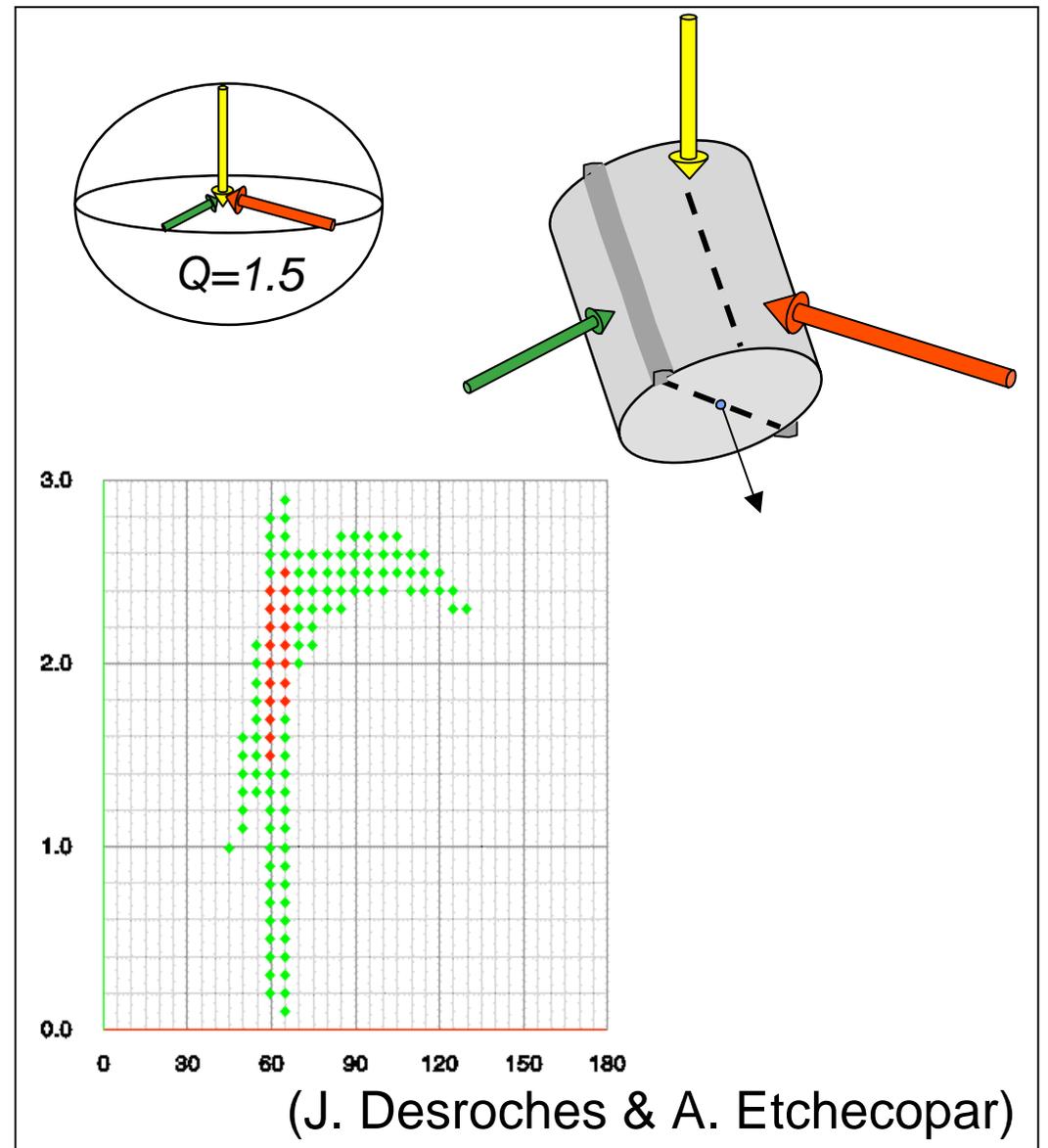
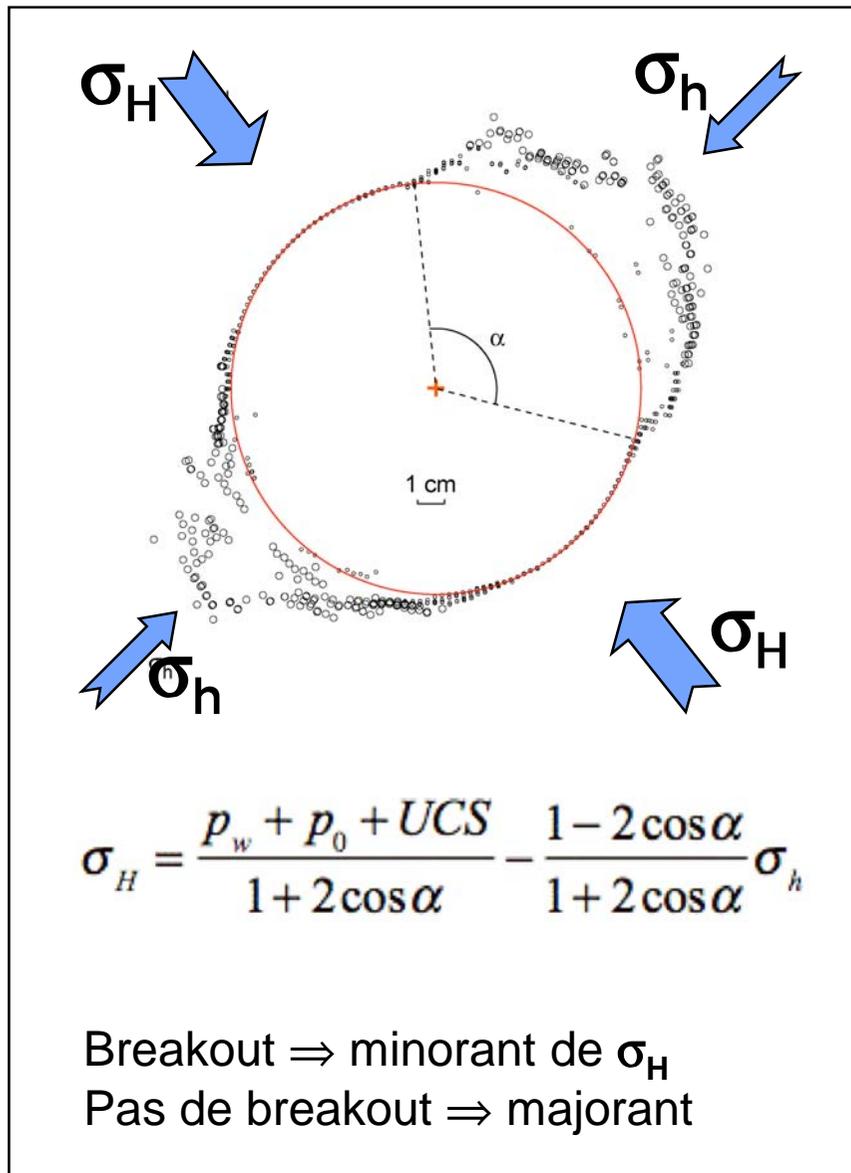
- * CTN non coupée
- * Fort disquage de la carotte

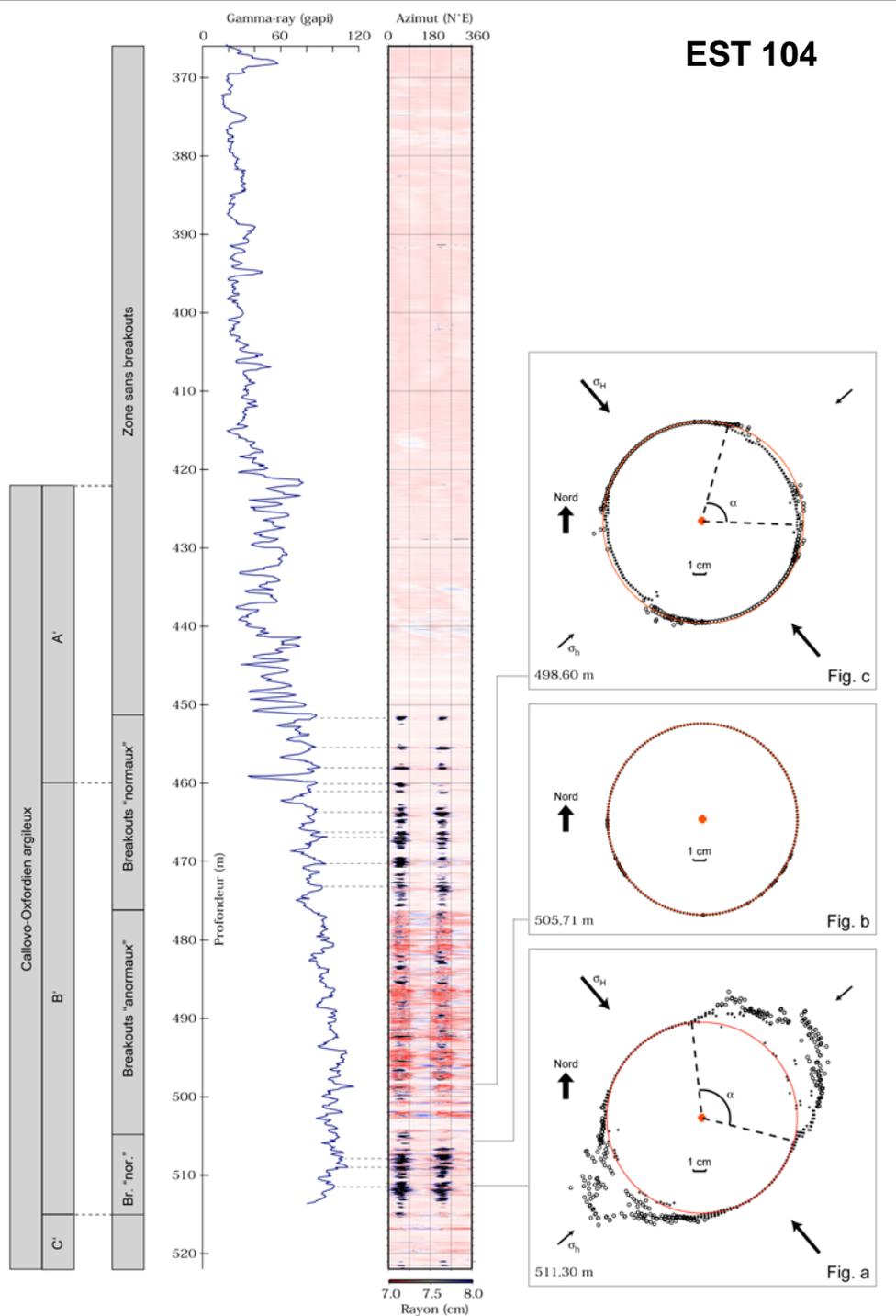


Méthode mal adaptée pour le type de roche *argilite* :

- Effet du carottage à l'air
- fort couplage hydromécanique
- augmentation de température dans la zone

Analyse systématique des « breakouts » dans les forages verticaux et déviés

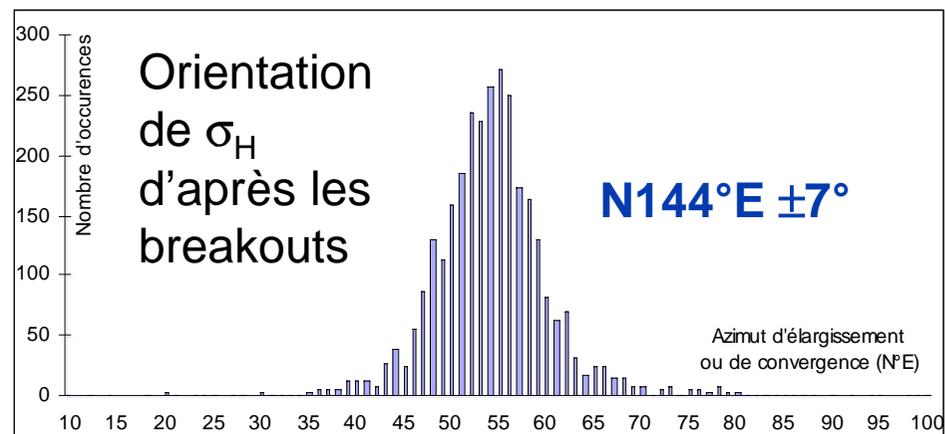




Localisation et morphologie des breakouts d'après l'imagerie UBI

Breakouts préférentiellement dans les niveaux à forte argilosité (moindre résistance)

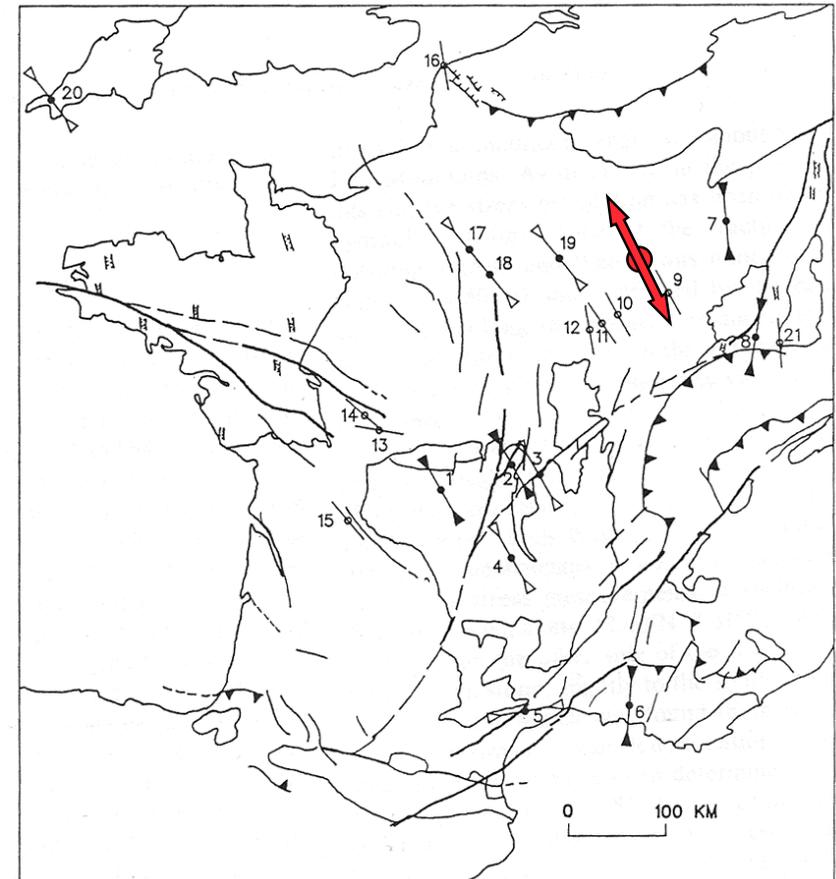
Importance du fluide de forage : à base d'eau ou d'huile



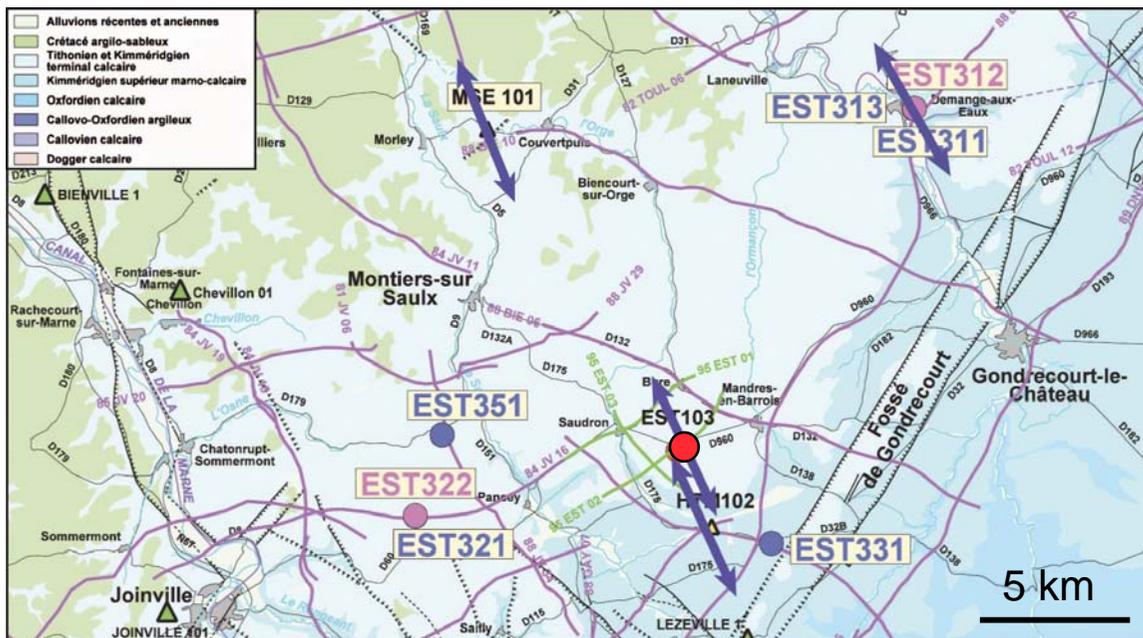
Orientation des contraintes horizontales : Variabilité horizontale

A proximité du labo (< 500 m) :

- EST103 : N109°E (???) [COX]
- EST104 : N144°E ± 7° [COX]
- EST204 : N152°E ± 5° [COX]
- EST205 : N155°E ± 3° [COX]
- EST210 : N153°E ± 1° [Dogger]
- EST212 : N154°E ± 4° [COX]
- EST361 : N148°E ± 2° [Dogger]
- EST363 : N164°E ± 7° [Dogger]



Cornet & Burlet (1992)



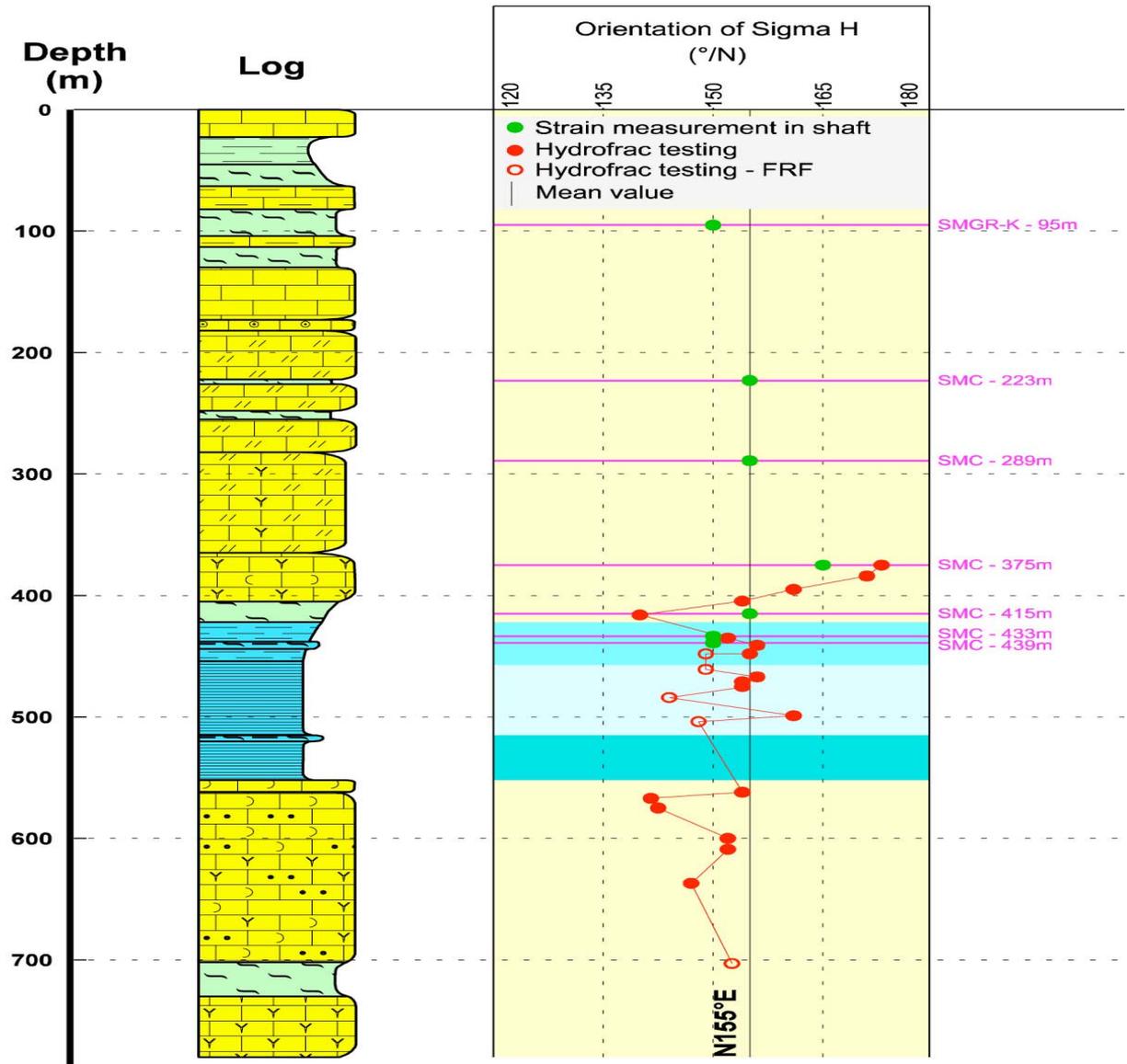
⇒ Existence d'une **variabilité latérale intrinsèque** à toutes les échelles

Orientation des contraintes horizontales : Variabilité verticale

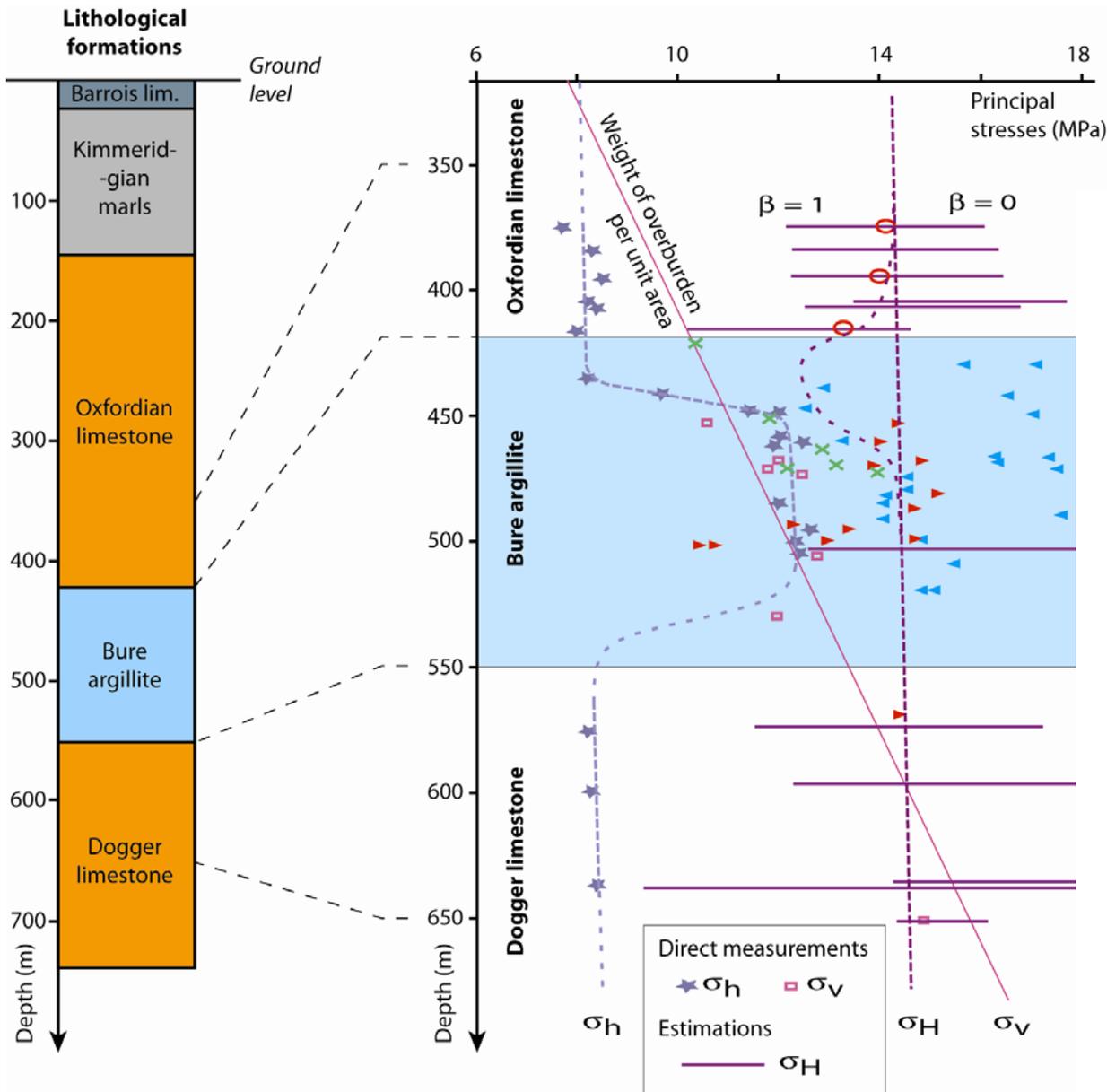
➤ L'orientation dans l'Oxfordien tourne de 40° à l'approche du contact avec le COX

➤ Orientations moyennes très proches dans l'Oxfordien (sauf limite), le COX et le Dogger

➤ σ_H : N155°E



Magnitude des contraintes horizontales : corrélation avec la lithologie



Aspects quantitatifs dans le COX :

- $\sigma_v < \sigma_h$ (fracture hydr. horizontale)
- $\sigma_h < \sigma_H$ (breakouts très continus)

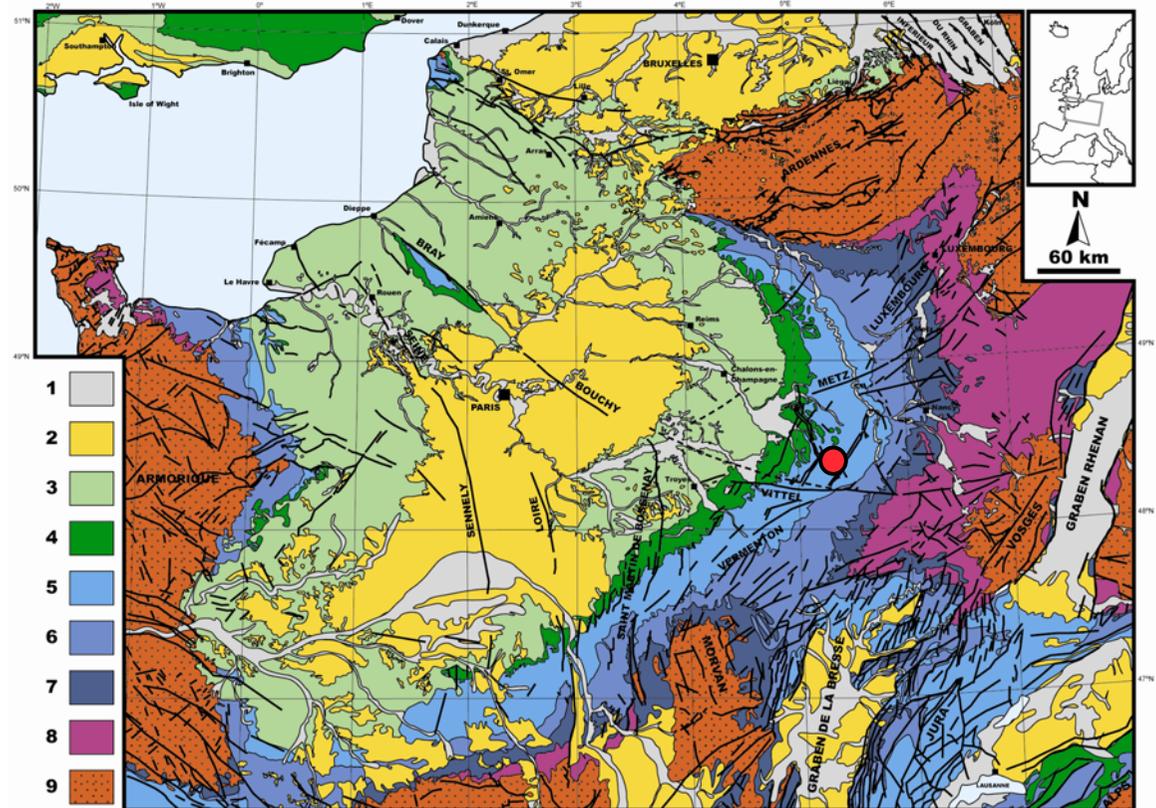
Deux traits caractéristiques :

- σ_H "insensible" à la lithologie
- σ_h très différentes dans les calcaires et les argillites

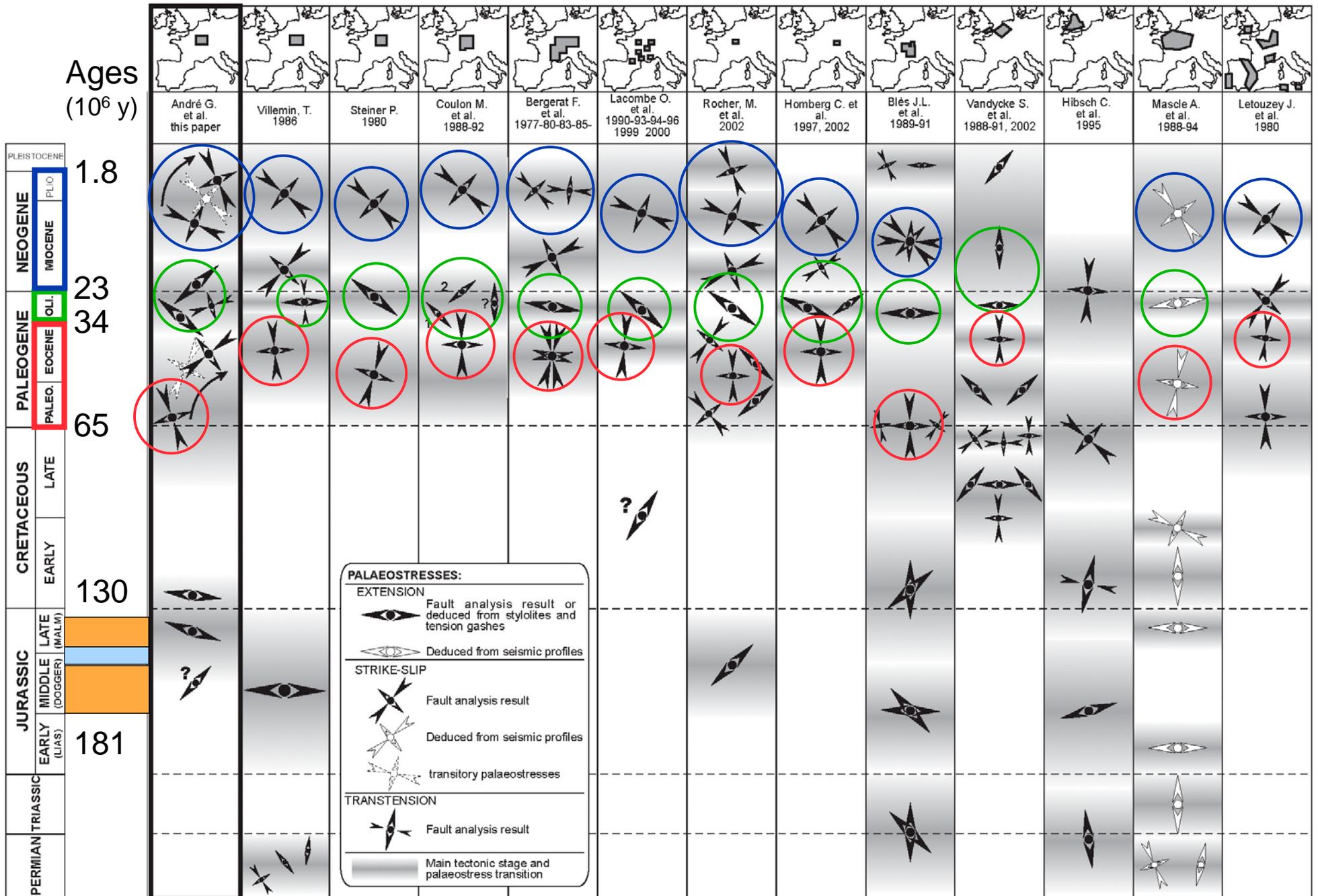
Conséquences :

- σ_h est mineure dans les calcaires et intermédiaire dans le COX
- très faible gradient vertical "à lithologie constante" : $< 1 \text{ MPa} / 300 \text{ m}$
- Composante horizontale additionnelle non gravitaire : $\sigma_{H,h} / \sigma_v \neq \nu / (1 - \nu)$

3- Implications « géodynamiques » de l'état de contraintes actuel



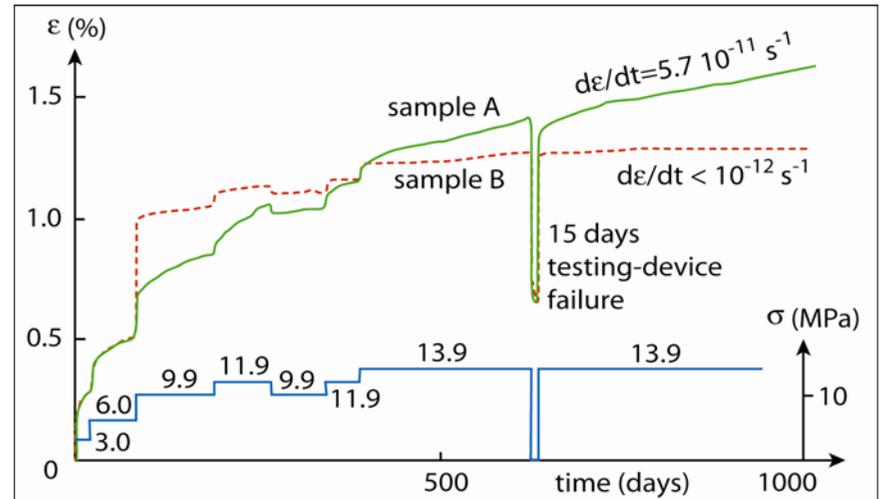
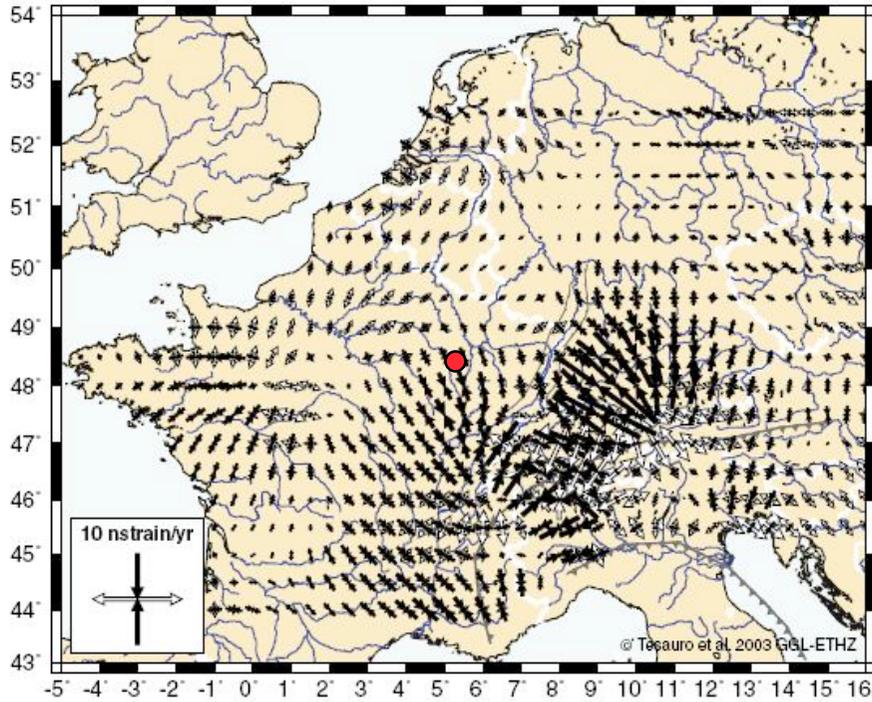
G. André (2004)



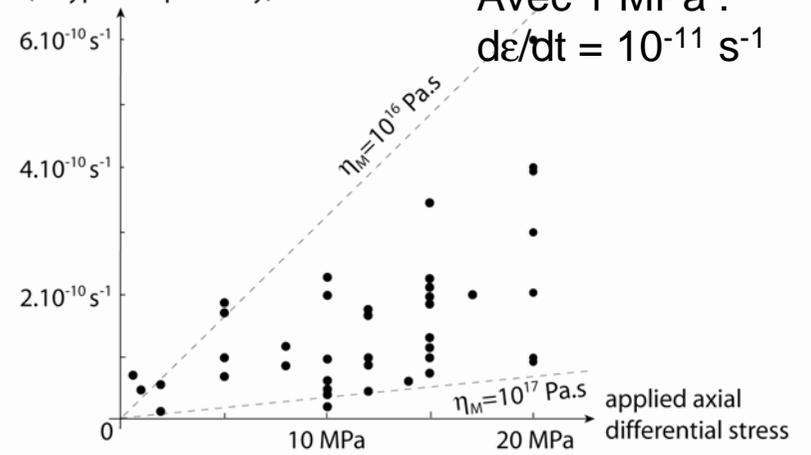
Une solution simple ?

Tesauro *et al.* (2003)

$d\varepsilon/dt < 10^{-17} \text{ s}^{-1}$

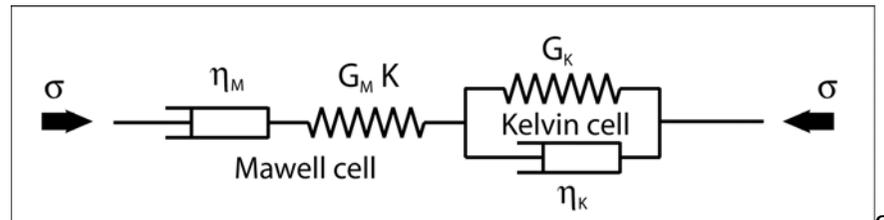
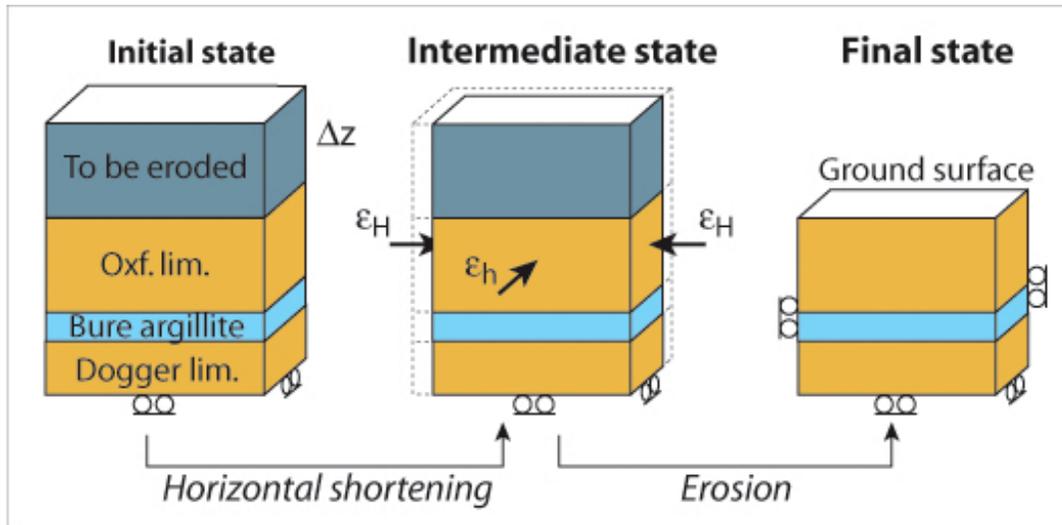


$d\varepsilon/dt$ at the end of the test (A-type samples only)



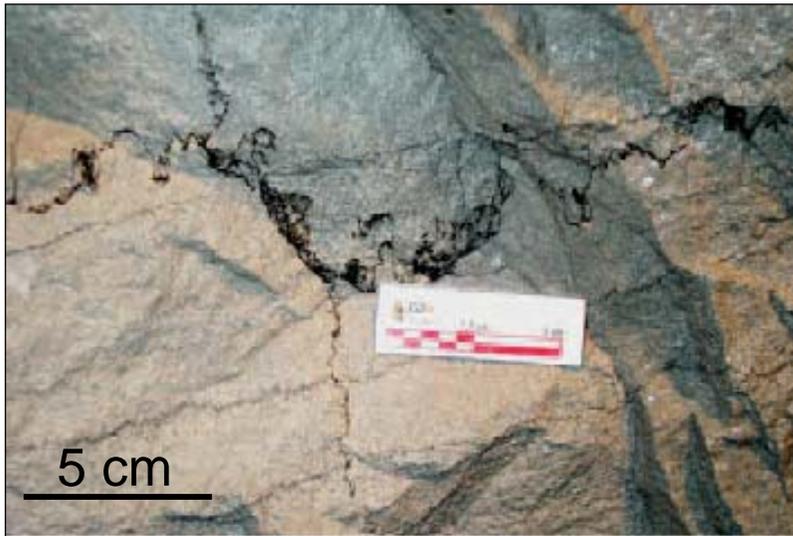
Avec 1 MPa : $d\varepsilon/dt = 10^{-11} \text{ s}^{-1}$

Essais de fluage (Zang & Rothfuchs)



Comportement à long terme des formations carbonatées :

Déformabilité accrue + Très faible coefficient de Poisson



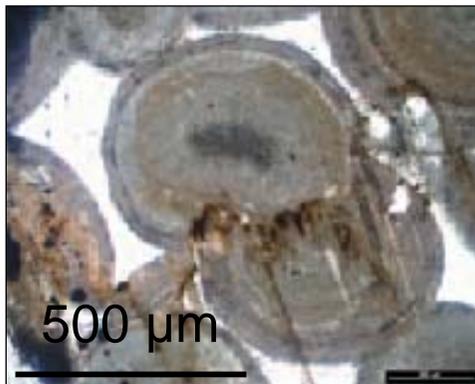
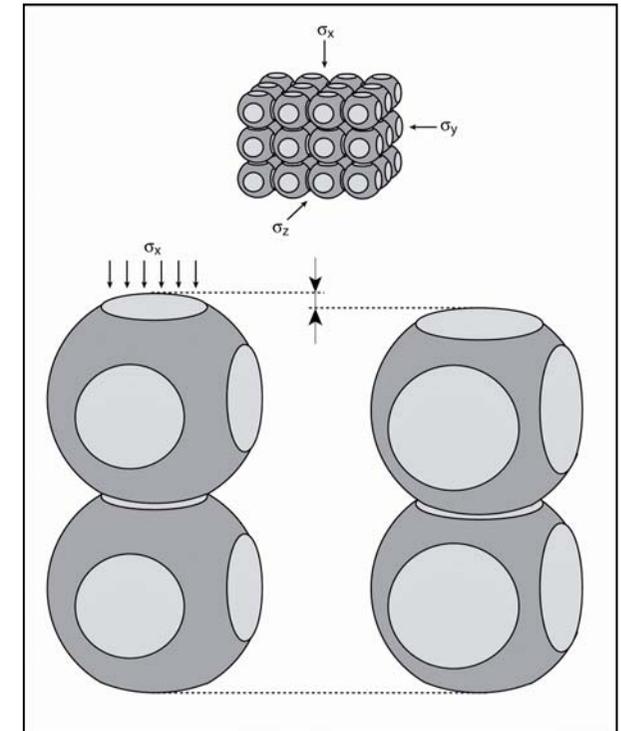
$$\eta_D = \frac{RTa^3}{12wDv_M^2K_p}$$

$$= 10^{18} - 10^{21} \text{ Pa.s}$$

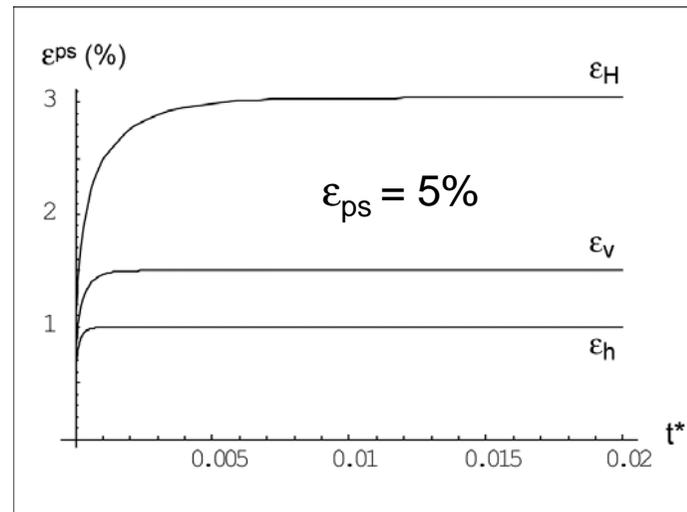
$$\tau_D = \eta_D / \sigma_0$$

$$= 100 - 100\,000 \text{ ans}$$

(\cong durée stockage)



G. André (2004)



R : constante des gaz parfaits

T : temperature

a : grain diameter

w : fluid film thickness

D : diffusivity

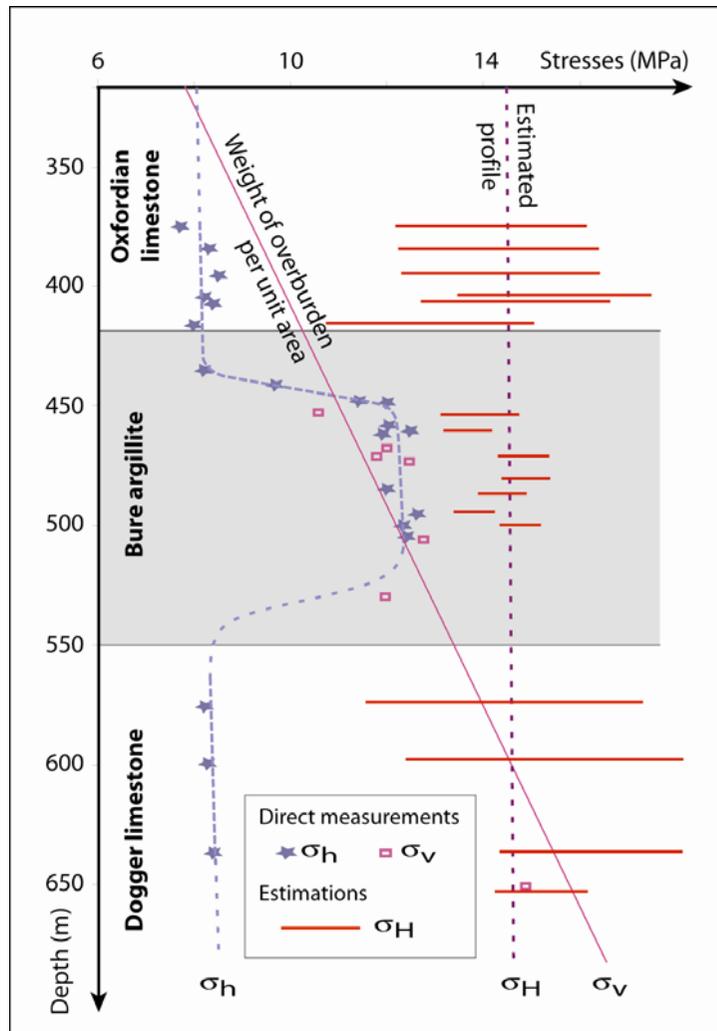
v_M : molar volume

K_X : solubility at equilibrium

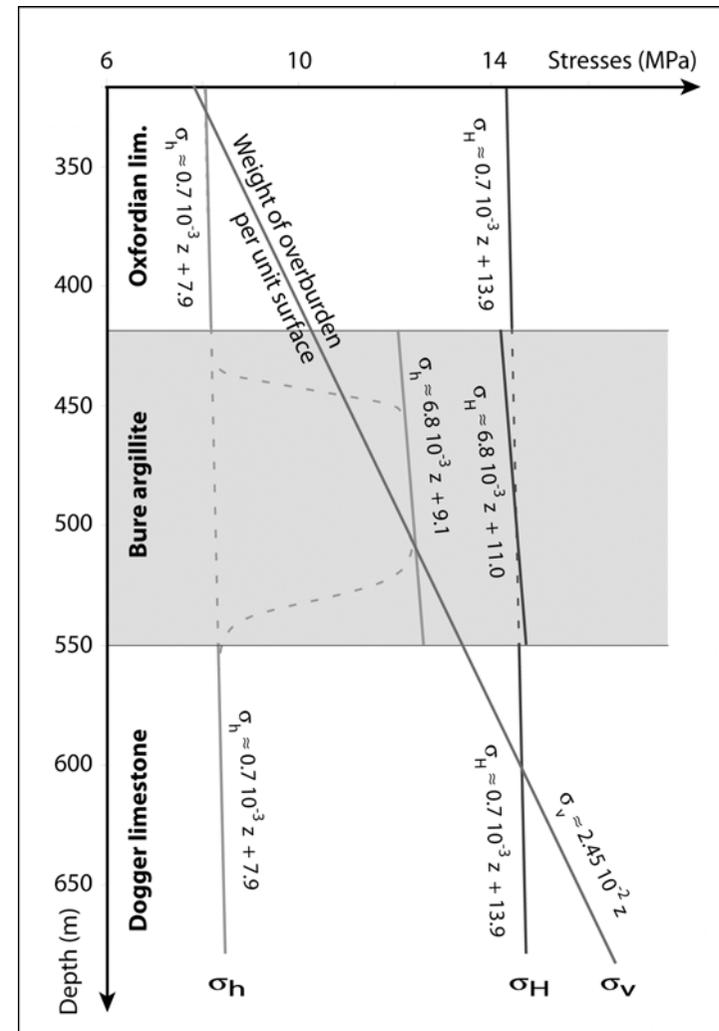
$\sigma_0 = 180 \text{ MPa}$: seuil thermodyn.

Pressure-solution \rightarrow Comportement quasi-visqueux

Mesures de contraintes



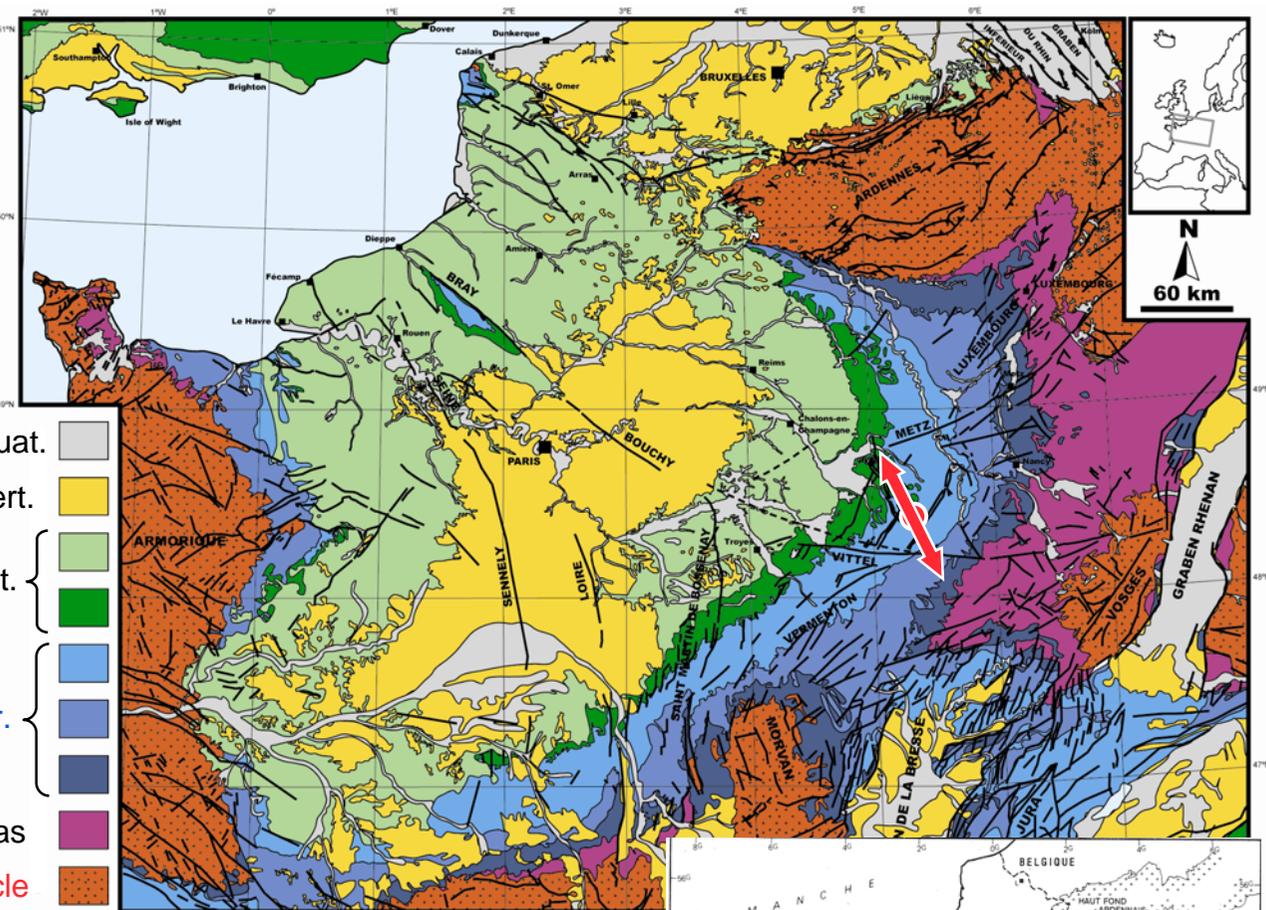
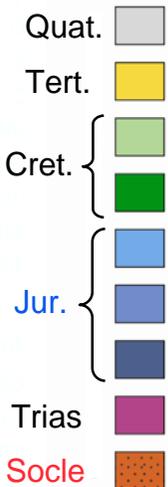
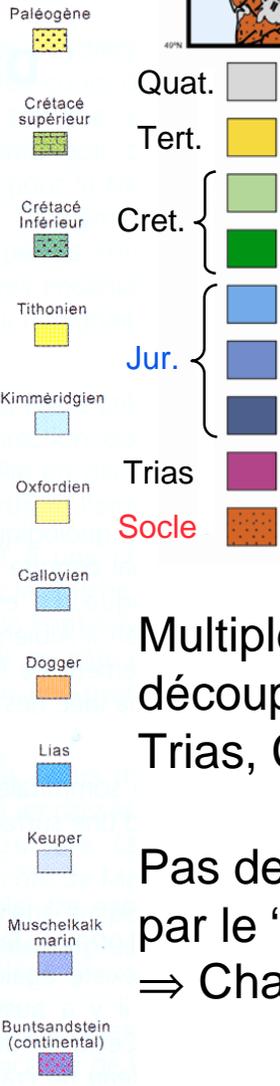
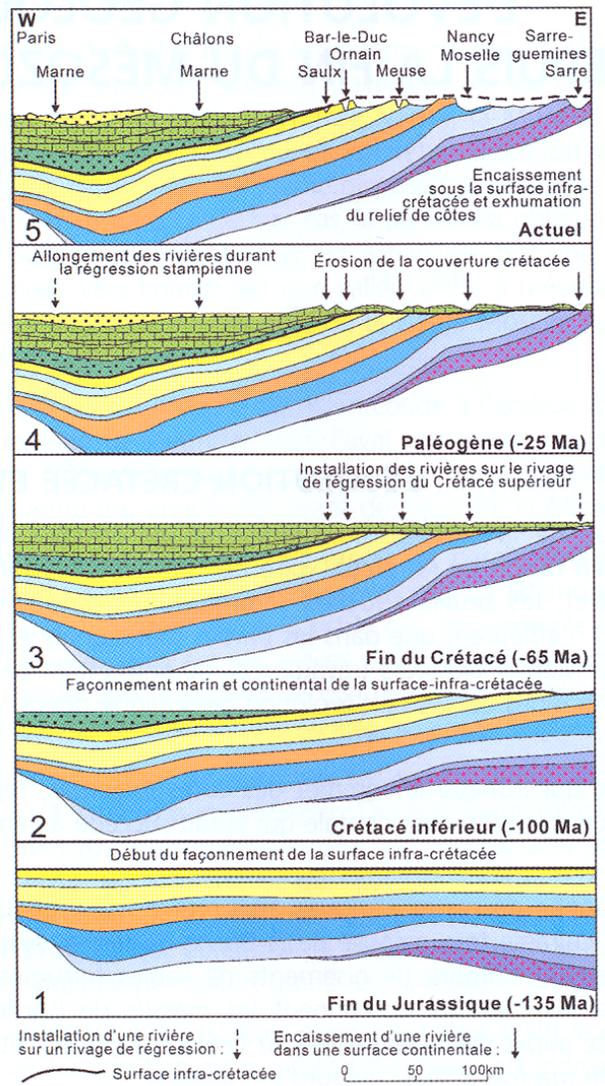
Modèle



- Les calcaires se déforment de manière quasi-visqueuses à long terme
- Les argilites accomodent la déformation de manière passive
- L'état de contraintes est contrôlé par la déformation lente des unités rigides

... mais ce n'est pas si simple !

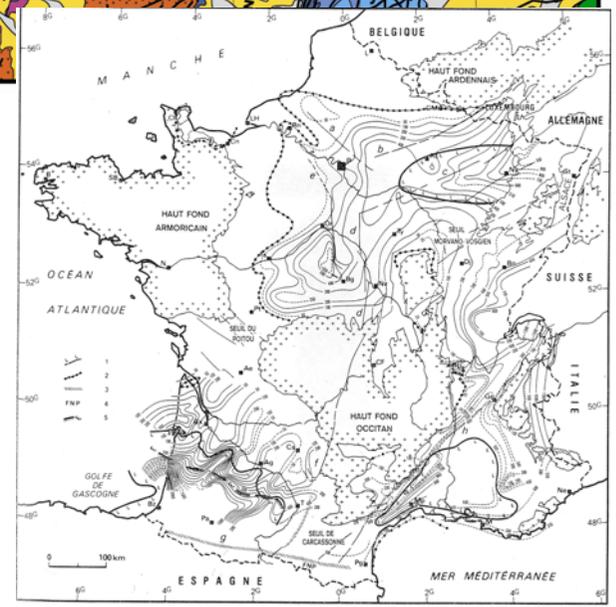
Lexa-Chaumard & Pautrot (2006)



Multiplus niveaux de découplage potentiel : Trias, COX...

Pas de chargement possible par le "bord" ⇒ Chargement interne ?

Curnelle & Dubois (1986)



Conclusions

Seule une combinaison de différentes approches qualitatives et quantitatives (mesures) peut permettre d'accéder à l'état de contraintes naturel et à ses variations

- Ne pas négliger les méthodes les plus simples (breakouts...)
- Utiliser avec précaution les méthodes les plus complexes (hypothèses)

Nombreuses questions posées par la signification de l'état de contraintes

- Corrélations avec la lithologie
- Faibles gradients verticaux
- Composante horizontale non gravitaire
- Modes de chargement aux limites

Points fondamentaux :

- Etat de contraintes contrôlé par la déformation lente des unités rigides
- Analyse indissociable de la discussion géodynamique : échelles de temps et d'espace hors du cadre classique de la mécanique des roches

Le bassin de Paris :

**un exemple simple (géométrie, histoire, lithologies contrastées...)
mais soulevant de nombreuses questions**