









LA THERMOMÉCANIQUE DES ROCHES

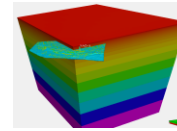
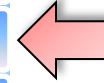
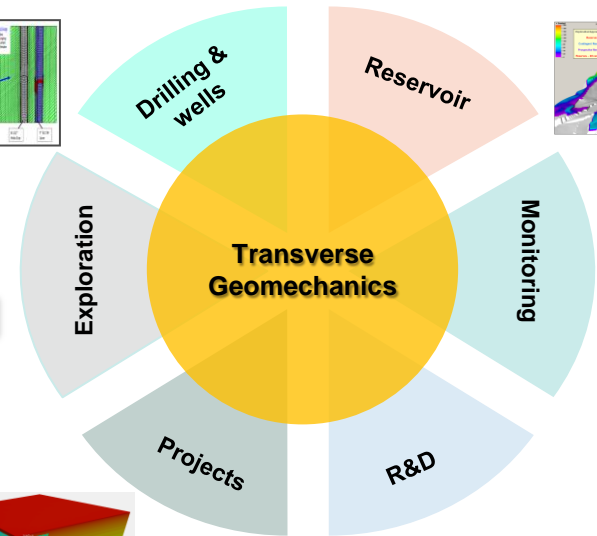
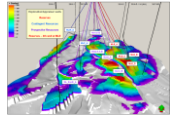
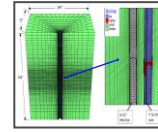
FORAGES ET RÉSERVOIRS PÉTROLIERS

Kun Su, Atef Onaisi
Total EP, Pau, France

Activités Géomécaniques à Total E&P, Pau

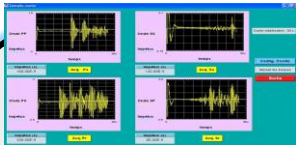
Topics supported

-  Wellbore stability and Fracturing pressure
-  Wellbore strengthening
-  Drill Cutting Re-Injection (DCRI)
-  Sand production risk assessment
-  Compaction, subsidence, wells and cap rock integrity in compacting reservoirs
-  Maximum safe injection pressure
-  Fracability of shale/oil gas plays
-  Mechanics of cement



3 Specialists, PHDs, Post-docs in Collaboration with French and International Universities

Labs

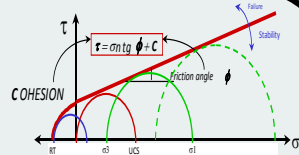


Petro-acoustic under stress



Elasticity and rupture of rocks

10 heavy benches +400 tests/year



Geomechanics core log

Support to affiliates

1 Senior Expert , 2 Referents
2 drillers, 3 reservoir engineers, 5 Technicians

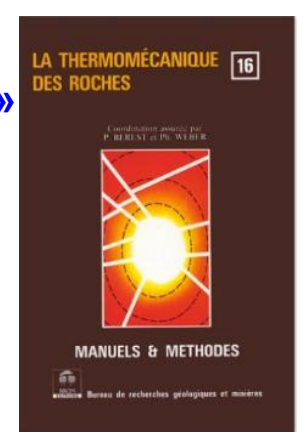
Prospect evaluation including unconventional

Reduced NPT

Safe drilling and reservoir operations

Optimized reservoir management and monitoring

Exemples d'application «LA THERMOMÉCANIQUE DES ROCHES » dans la pratique d'un ingénieur



- Page: 46: La fonction Dawson qui donne la solution de température au centre d'un disc d'une source thermique décroissante dans le temps
- Page 81: Le déplacement thermomécanique à la paroi d'un tunnel est nul quelle que soit la distribution de température → On peut extrapoler ce résultat à un problème hydromécanique d'un tunnel → Le déplacement hydromécanique à la paroi d'un tunnel est nul quelle que soit la distribution de pression
- ...

Application de la thermomécanique au forage

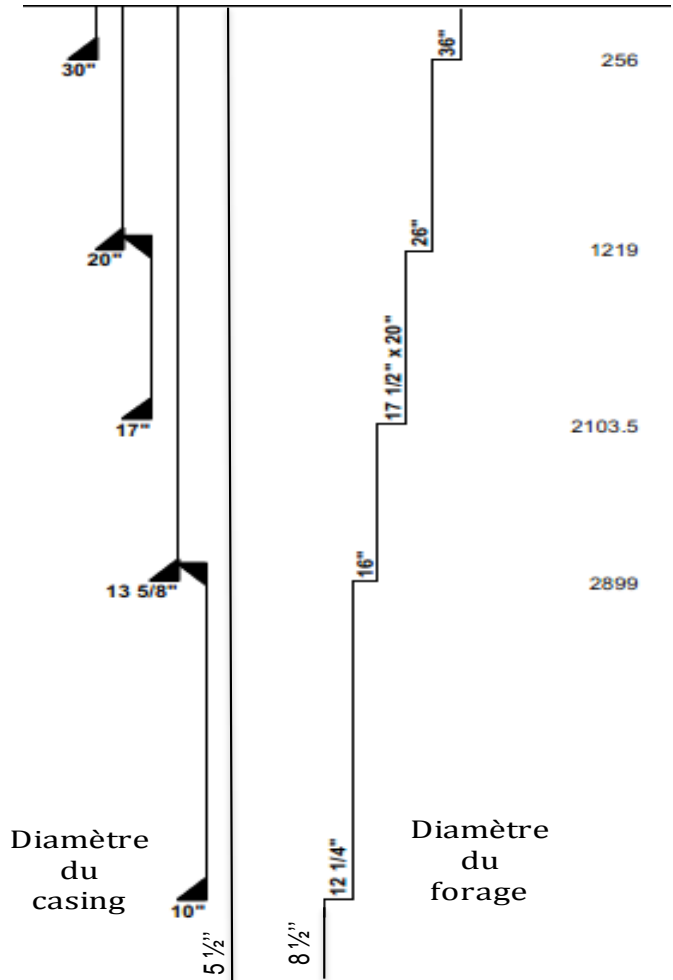
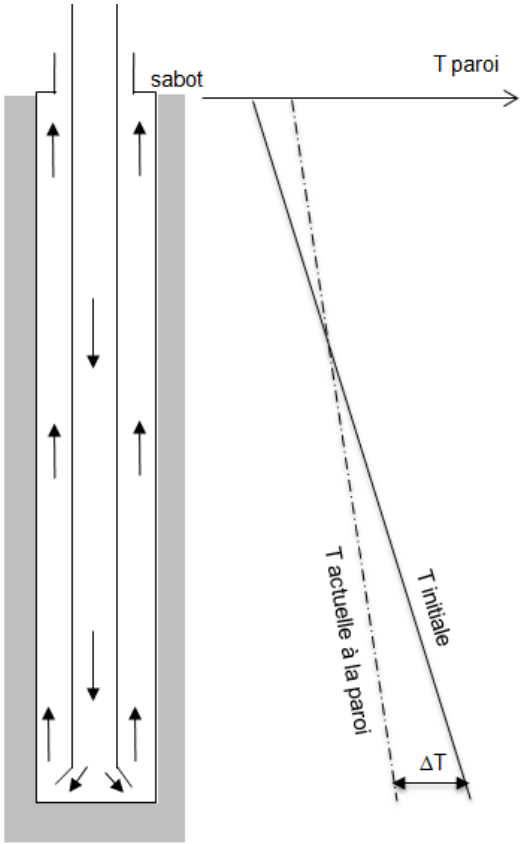
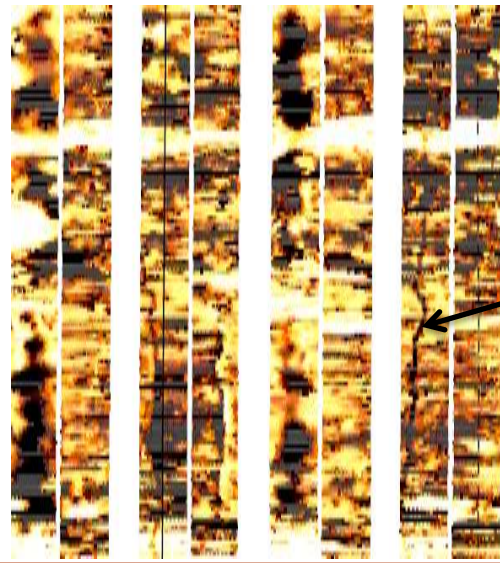
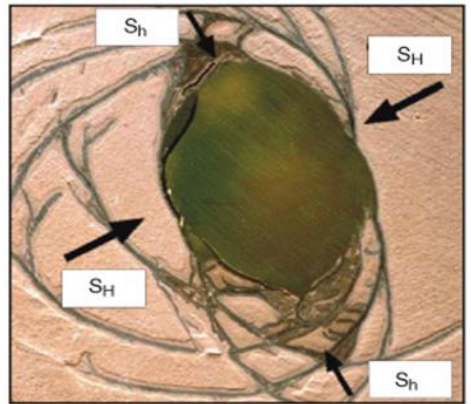
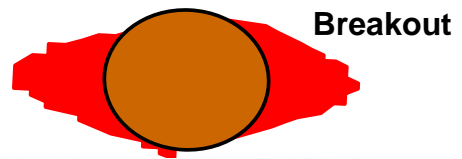
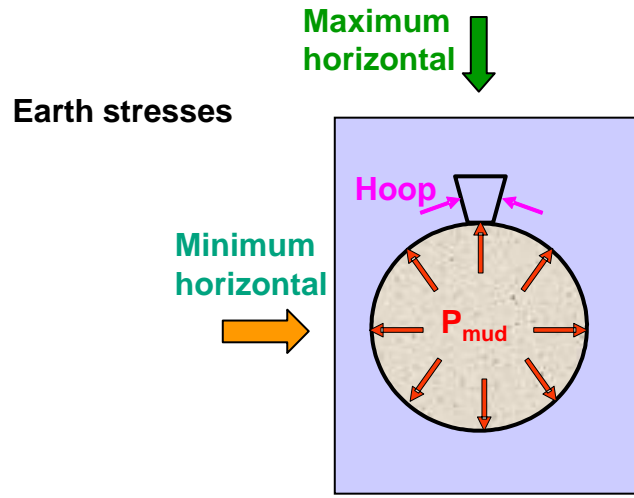
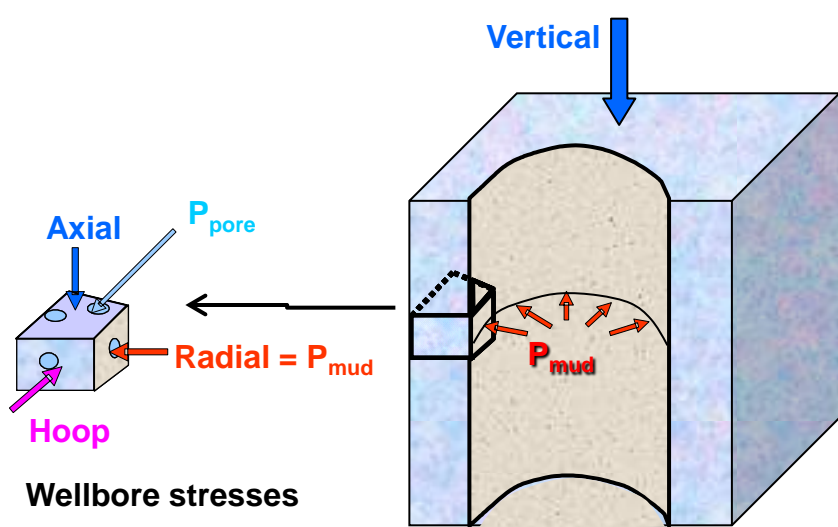


Illustration de l'architecture d'un puits



Profil de température en circulation de boue le long d'une section de puits encore ouverte

Calcul de la stabilité des puits avec la prise en compte σ_{TM}



Fracture induite

Application de la thermomécanique au forage

→ Cas d'un puits vertical

Poids de boue $\rho_b = \frac{3\sigma_H - \sigma_h - P(1 - N) - R_c}{(1 + N) g Z}$ $N = (1 + \sin\phi)/(1 - \sin\phi)$

Delta poids de boue thermique $\Delta\rho_b = \frac{E\alpha\Delta T}{(1 - \nu)(1 + N) g Z}$ quelques %

$$\Delta\sigma_{rr} = -\frac{E\alpha}{1 - \nu} \frac{1}{r^2} \int_a^r u\Delta T(u) du$$

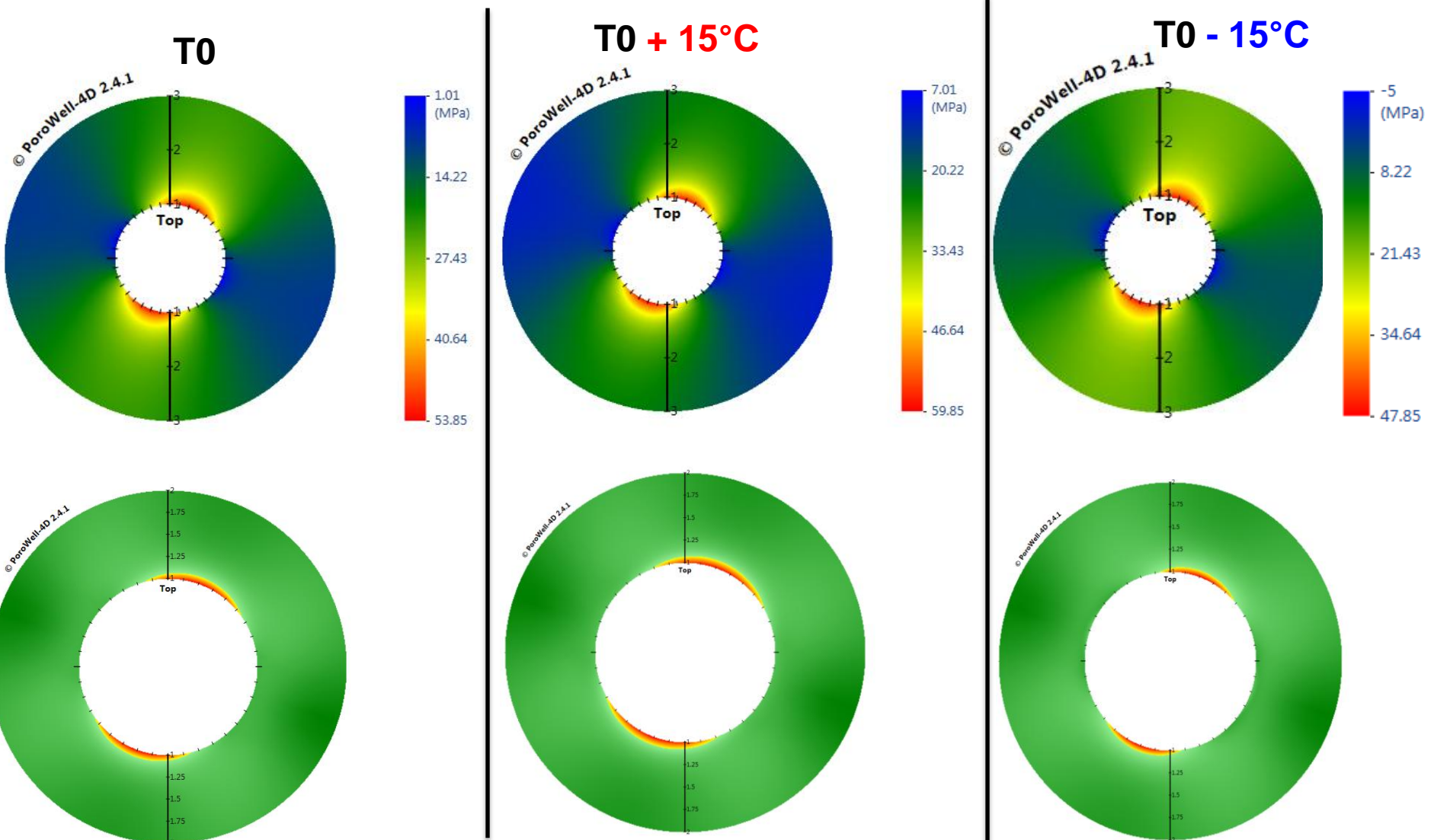
$$\Delta\sigma_{\theta\theta} = +\frac{E\alpha}{1 - \nu} \left[\frac{1}{r^2} \int_a^r u\Delta T(u) du - \Delta T(r) \right] = -\Delta\sigma_{rr} - \frac{E\alpha}{1 - \nu} \Delta T(r)$$

$$\Delta\sigma_{zz} = -\frac{E\alpha}{1 - \nu} \Delta T(r)$$

$$E \frac{U}{r} + (1 + \nu)\Delta\sigma_{rr} = 0 \quad \mathbf{U=0 \text{ à la paroi !!}}$$

- Les σ thermomécaniques sont proportionnelles à la valeur du module d'Young et ΔT .
- Si une roche possède un module d'Young élevé, naturellement sa résistance est plus élevée aussi, d'où sa marge de résistance pour subir un supplément de contrainte d'origine thermomécanique est plus grande.
- La considération du couplage thermomécanique dans les roches ne se traduit souvent pas par une augmentation de la densité de boue pour assurer la stabilité des parois.

Application de la thermomécanique au forage



Cartes de contrainte $\sigma_{\theta\theta}$ autour d'un puits avec différents écarts de température et zones en rupture avec prise en compte de la contrainte thermomécanique pour un poids de boue fixe (puits vertical, $Z=3000\text{m}$, $E=20\text{GPa}$, $\nu=0.25$, $\sigma_h=63.2\text{MPa}$, $\sigma_H=76.4\text{MPa}$, pression de pore = 55.9MPa , densité de boue 1.92g/cc , azimut de σ_H : $N110^\circ$, $\phi=30^\circ$, $C=10\text{MPa}$, $\alpha = 1.5 \cdot 10^{-5}/^\circ\text{C}$, $\lambda=2.65\text{W/m}^\circ\text{C}$, $t=1\text{jour}$).

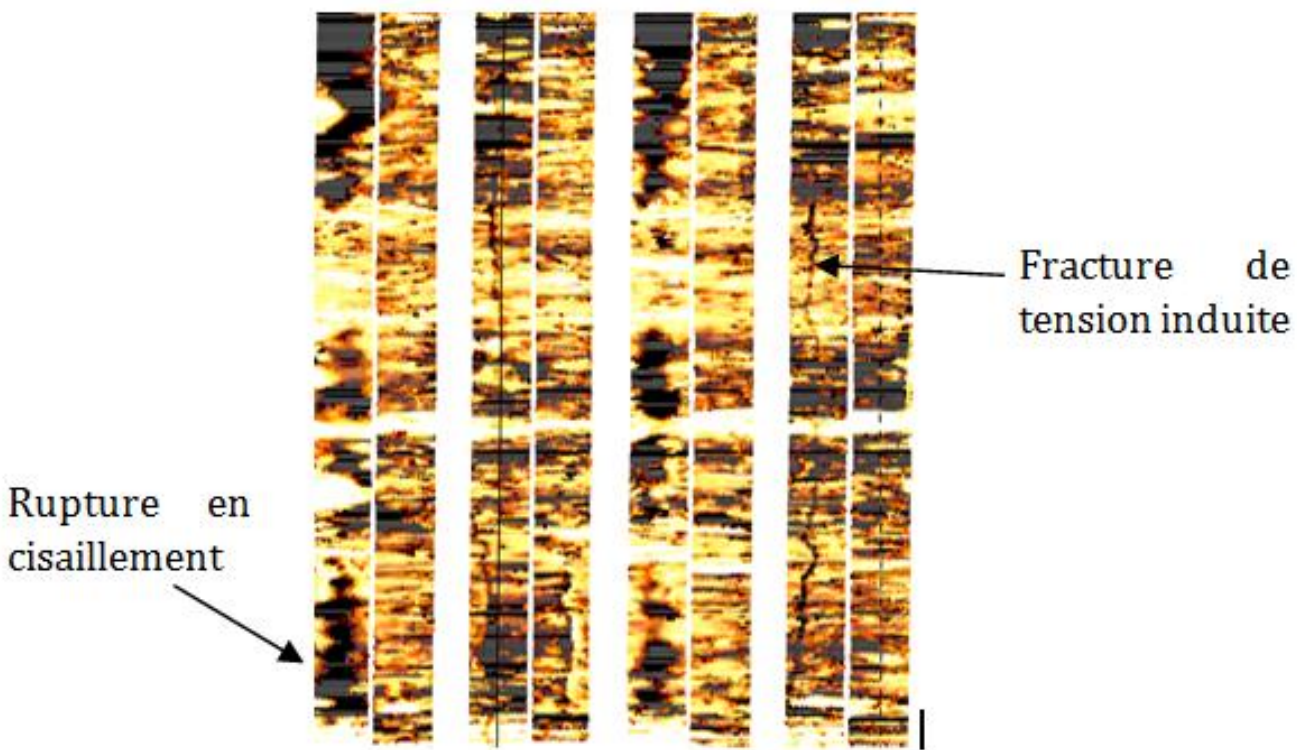
Détermination des contraintes *in situ* par l'interprétation des imageries de la paroi des puits

$$3\sigma_h - \sigma_H - P - P_b + \frac{E\alpha\Delta T}{(1-\nu)} < -R_d$$

← Condition d'apparition de la fracture induite

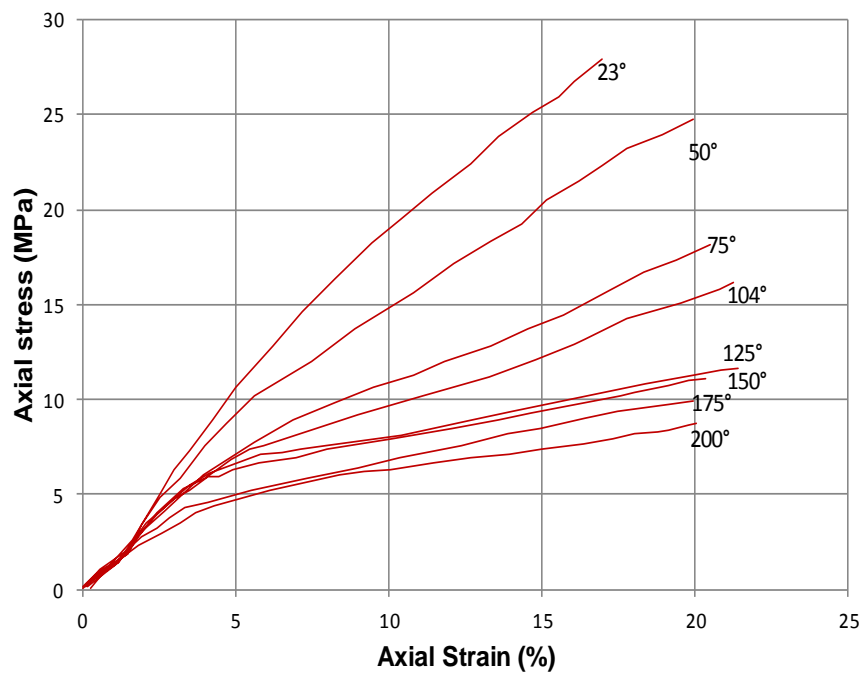
$$\sigma_H + \sigma_h + 2(\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\theta - P(1-N) - P_b(1+N) + \frac{E\alpha\Delta T}{(1-\nu)} > R_c$$

← Breakouts (zone en rupture)

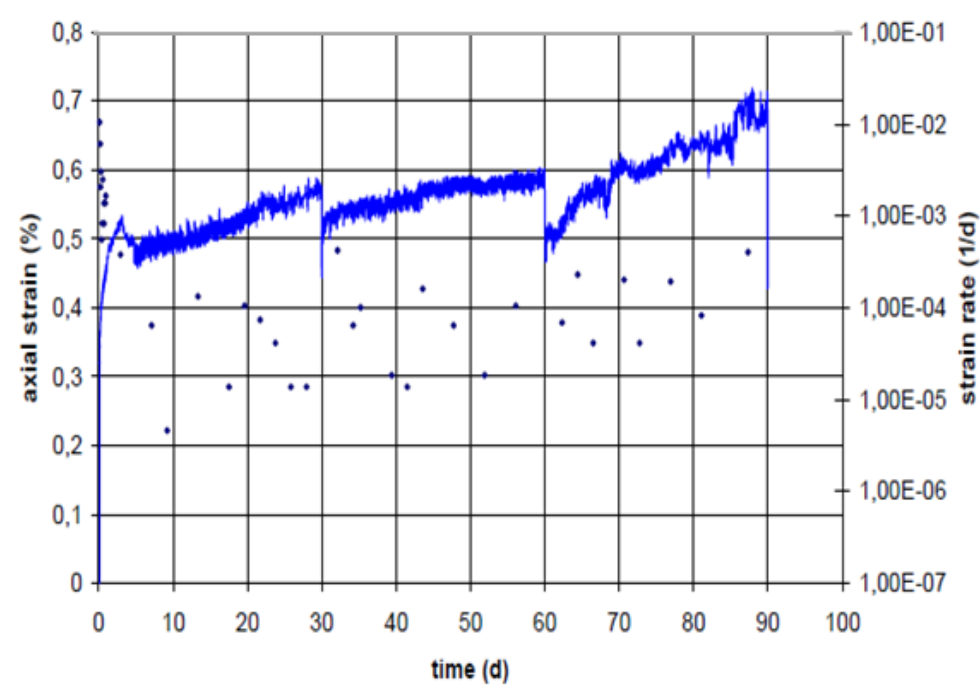


Stabilité des forages dans le sel

Comportement court terme du sel



Comportement long terme du sel



Influence de la température sur les courbes contrainte-déformation obtenues pendant les essais de compression uniaxiale (Thorel L.1994)

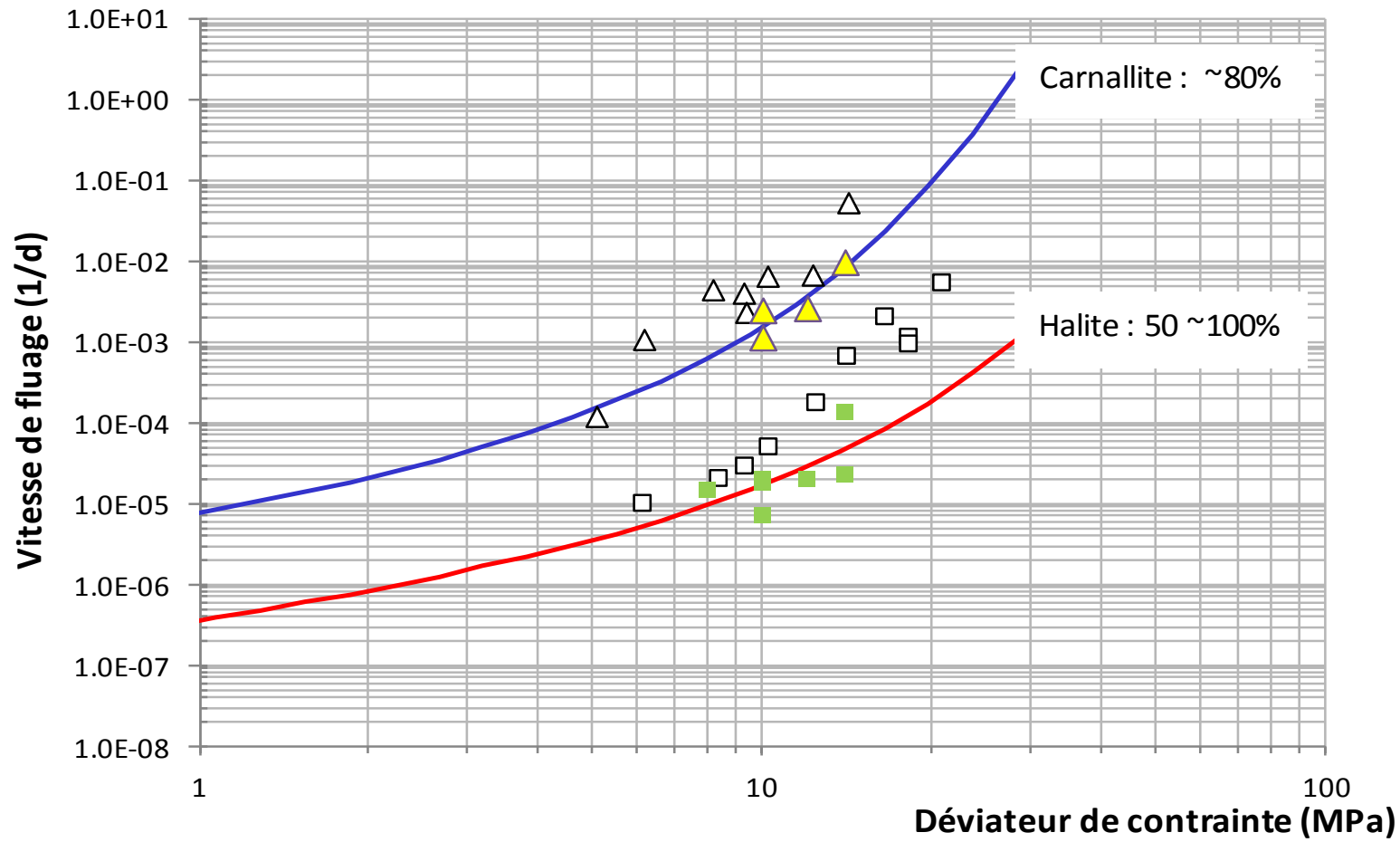
Courbe déformation-temps d'un essai de fluage sur un échantillon prélevé à 3455m de profondeur, composé de 75% d'halite et 83% de carnallite ($\sigma_3=45\text{MPa}$, $\sigma_1=57\text{MPa}$, $T=40^\circ$, 60° et 80° à différents paliers, durée de palier 30 jours)



Stabilité des parois dans le sel

Vitesse de fluage des sels

- Halite, Brazilian Offshore 86°C
- △ Canallite- Brazilian offshore, 86°C
- Halite- Angola offshore, 50°C
- ▲ Carnallite - Angola offshore, 50°C
- Model for Carnallite
- Model for Halite



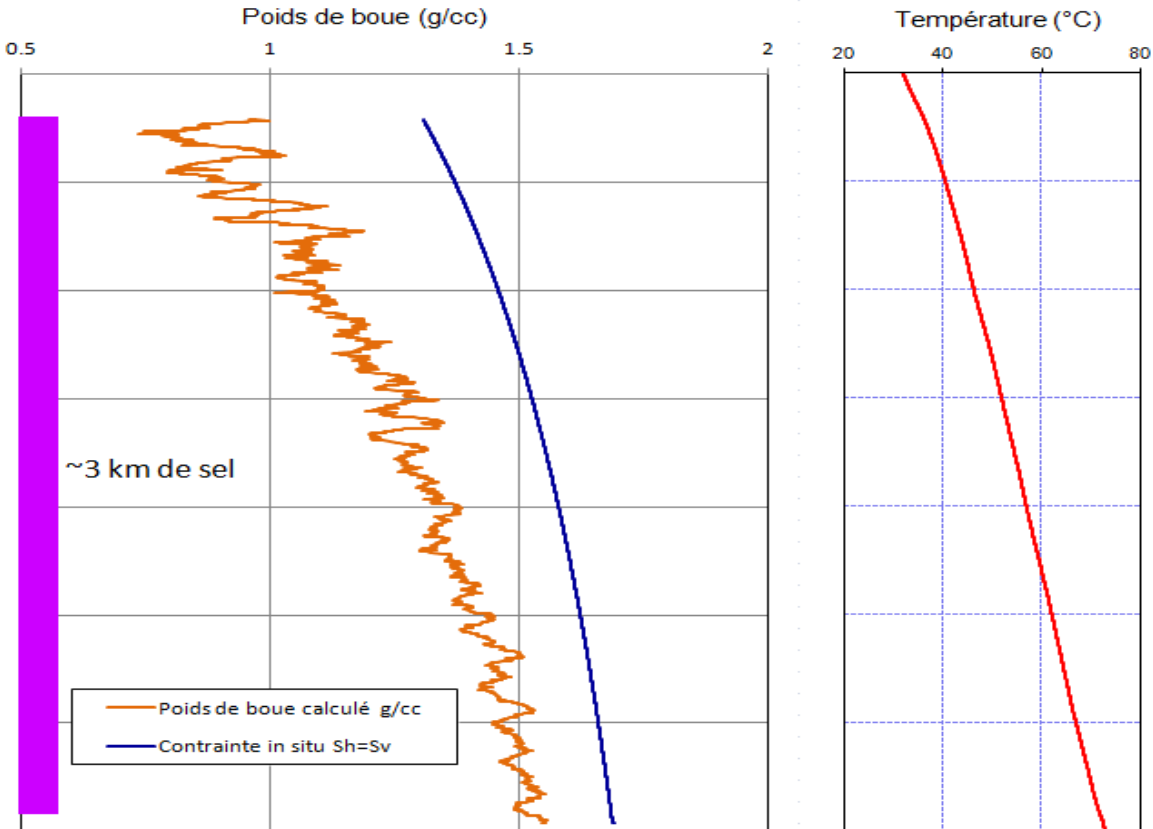
Stabilité des parois dans le sel

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = A \cdot e^{-B/T} \cdot \sigma^n$$

← Loi de fluage

$$\frac{R(t)}{R_0} = \exp\left\{-t \frac{3^{n+1/2}}{4n-2} A \cdot e^{-B/T} (\sigma_h - P_\delta)^n\right\}$$

← Solution de convergence d'un forage



Profil du poids de boue calculé en fonction de la profondeur de forage pour assurer une convergence de puits de moins de 5% ($\Delta R/R_0$) en trois semaines.

Thermomécanique à l'échelle du réservoir

→ Utilisation d'une méthode simple proposée par Faux *et al* pour traiter le problème d'inclusion

Faux *et al* (1996 and 1997)

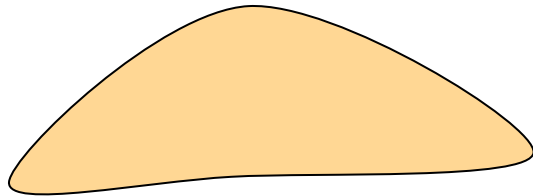
$$\mathbf{A}_{xx} = \Lambda_2 \frac{-y}{x^2+y^2} i \quad , \quad \mathbf{A}_{yy} = \Lambda_2 \frac{x}{x^2+y^2} j \quad , \quad \mathbf{A}_{xy} = \frac{\Lambda_2}{2} \left(\frac{x}{x^2+y^2} i - \frac{y}{x^2+y^2} j \right)$$

Thermomécanique

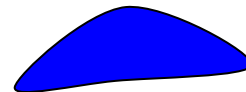
$$\Lambda_2 = \frac{\alpha \Delta T E}{2\pi(1-\nu)}$$

Hydromécanique

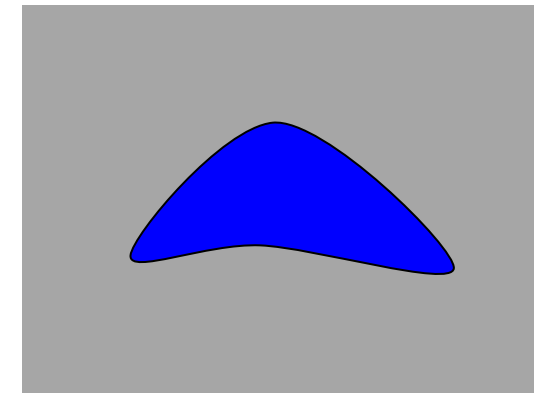
$$\Lambda_2 = \frac{(1-2\nu)}{2\pi(1-\nu)} \beta \Delta P$$



Géométrie initiale du réservoir

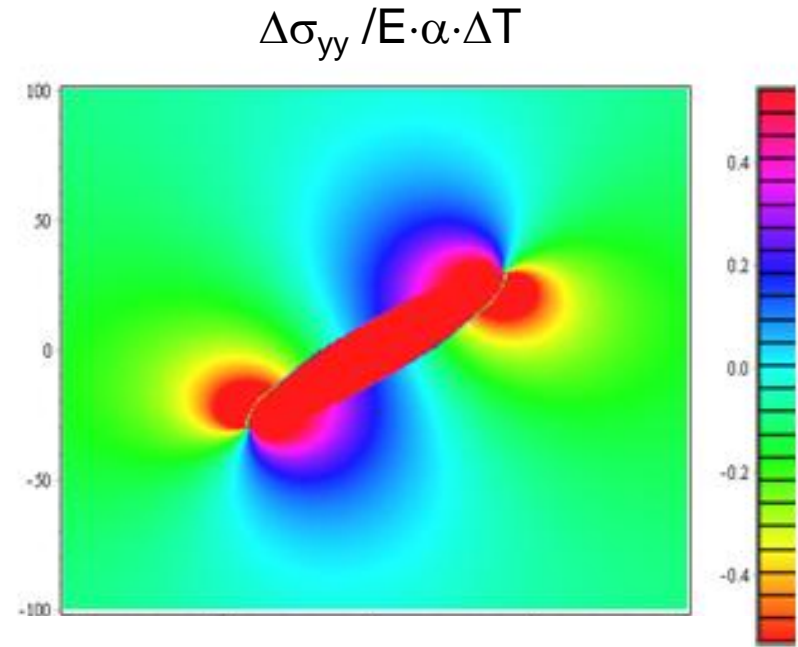
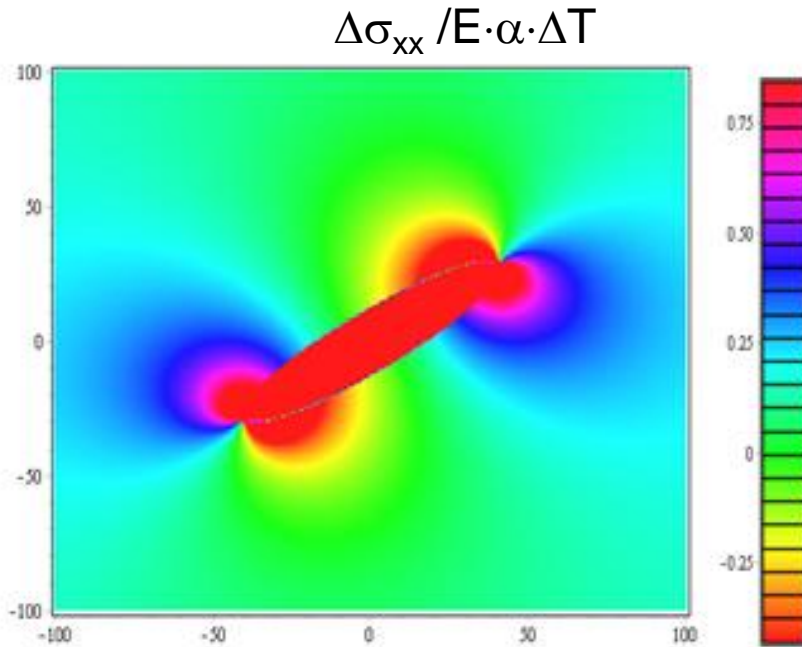


Déformation libre

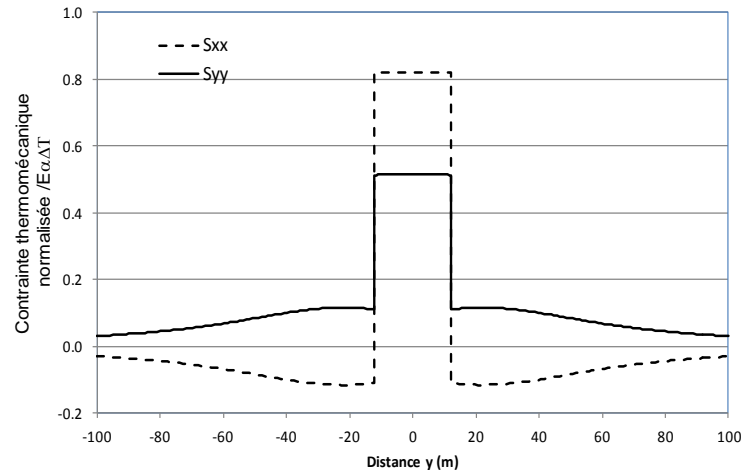


Interaction avec les formations autour

Thermomécanique à l'échelle du réservoir



Variation des contraintes thermomécaniques normalisées $\Delta\sigma_{xx} / E \cdot \alpha \cdot \Delta T$ (gauche) et $\Delta\sigma_{yy} / E \cdot \alpha \cdot \Delta T$ (droite) autour d'un réservoir elliptique, profil des contraintes à $x=0$ (figure en bas), induite par une diminution de température



CONCLUSIONS

- La considération thermomécanique est importante dans plusieurs aspects géomécaniques du forage et du réservoir:
 - détermination des contraintes *in situ* à partir des imageries de parois des puits.
 - détermination du **poids de boue** pour forer le sel
 - variation des **contraintes** dans et autour des réservoirs soumis à l'injection des eaux produites
 - injection CO₂,
 - fracturation de gas (oil) shale
- Il existe de nombreuses solutions analytiques de température et de contrainte thermomécanique applicables pour des problèmes du forage et du réservoir