



Stimulation hydraulique d'un puits géothermique en milieu fracturé

S.Gentier, X. Rachez
BRGM

“Modélisation : quand faut-il passer au 3D ?”

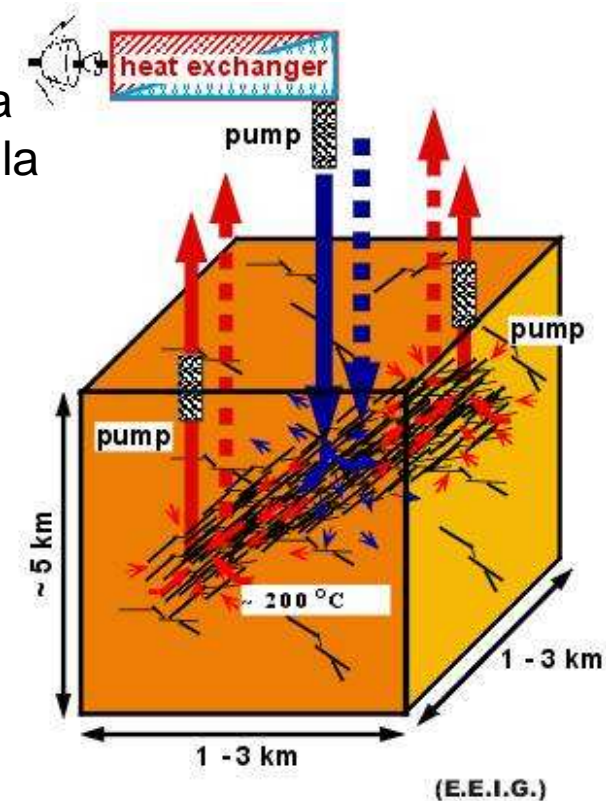
Stimulation hydraulique d'un puits géothermique

> Objectif:

- Provoquer une augmentation irréversible de la perméabilité autour du puits : amélioration de la perméabilité des fractures et si possible de la connexion

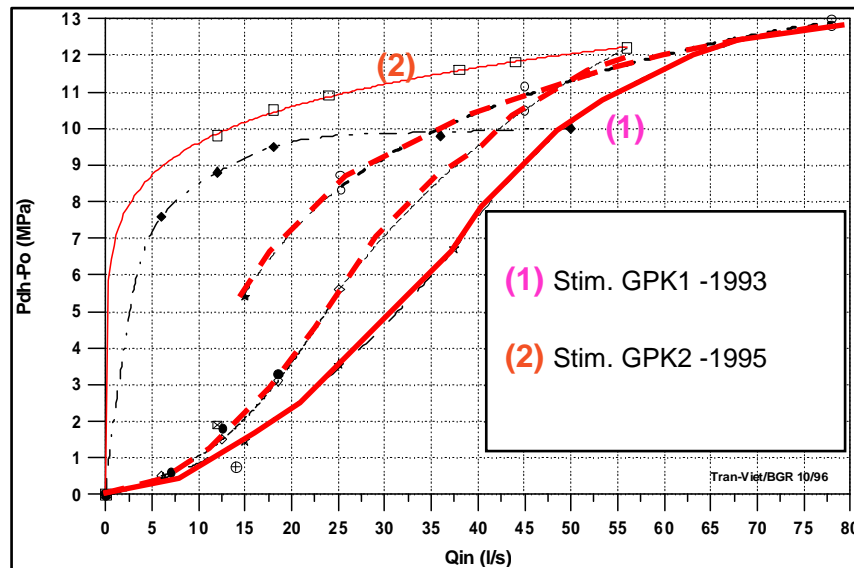
Moyen mis en œuvre:

- Stimulation thermique
 - Stimulation chimique
 - Stimulation hydraulique: portée plus grande ?
- } Faible portée?



Stimulations hydrauliques des puits : mécanismes mis en jeu ?

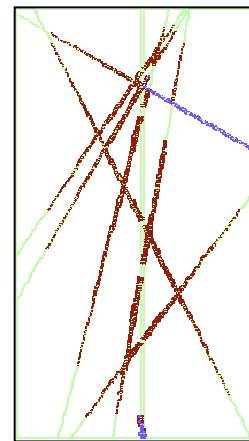
Courbes de stimulation et post-stimulation



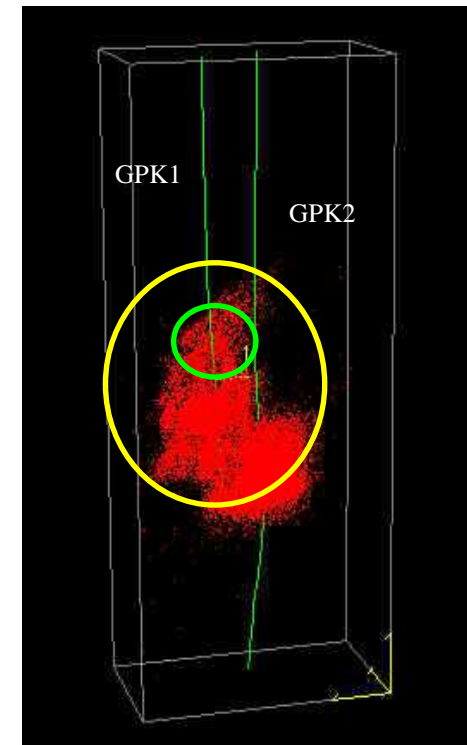
1000 m

Ruptures ?
Cisaillement de plans préexistants ?
Quels plans, quel réseau ? 2D ou 3D ?

Evénements microsismiques



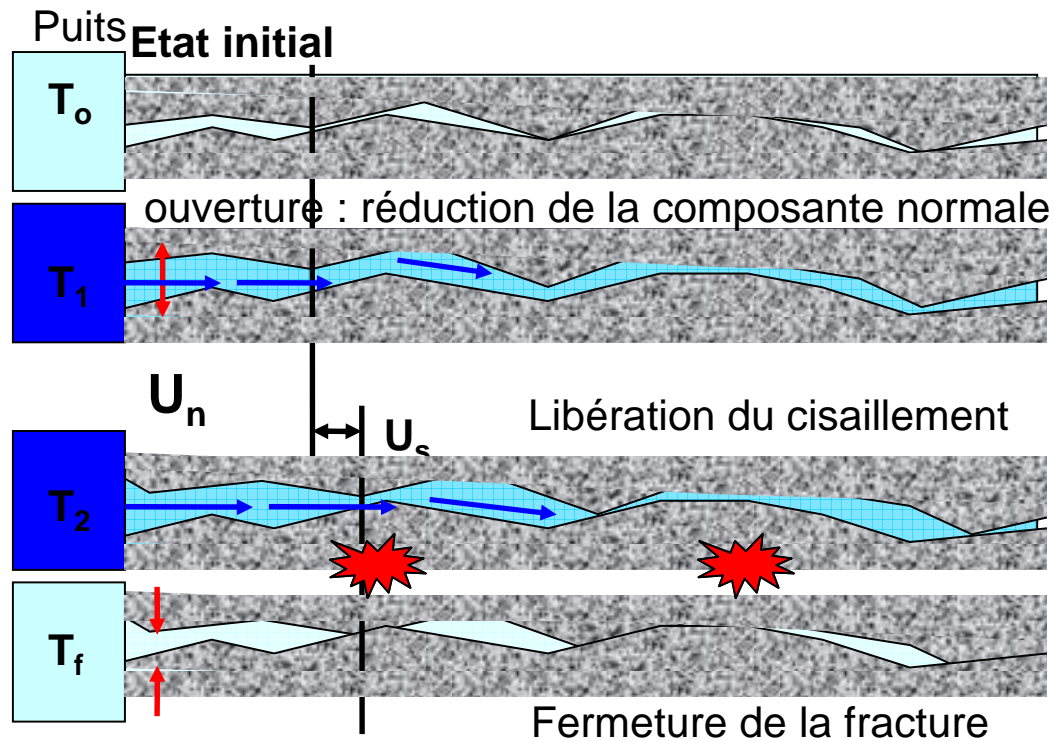
400 m



CFMR

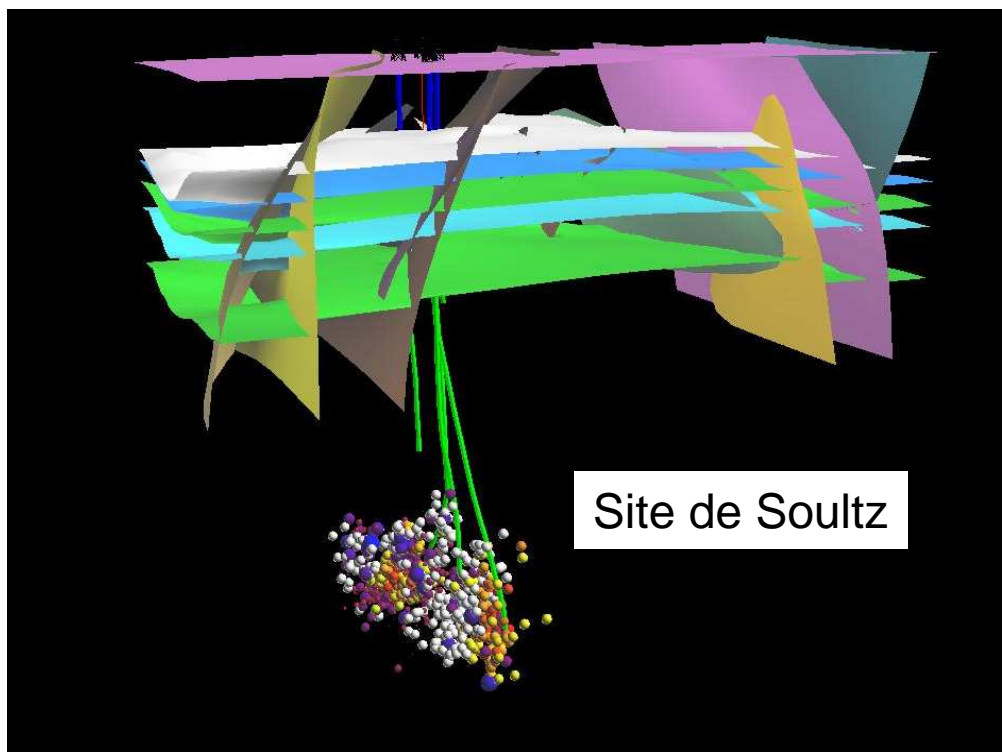
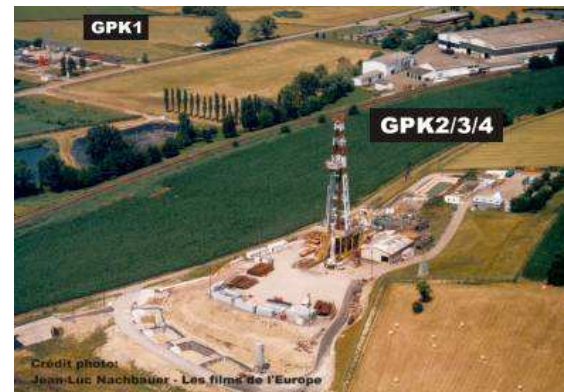
Mécanismes ?

Evolution de l'ouverture hydraulique est liée au déplacement normal (U_n) et au déplacement tangentiel (U_s)



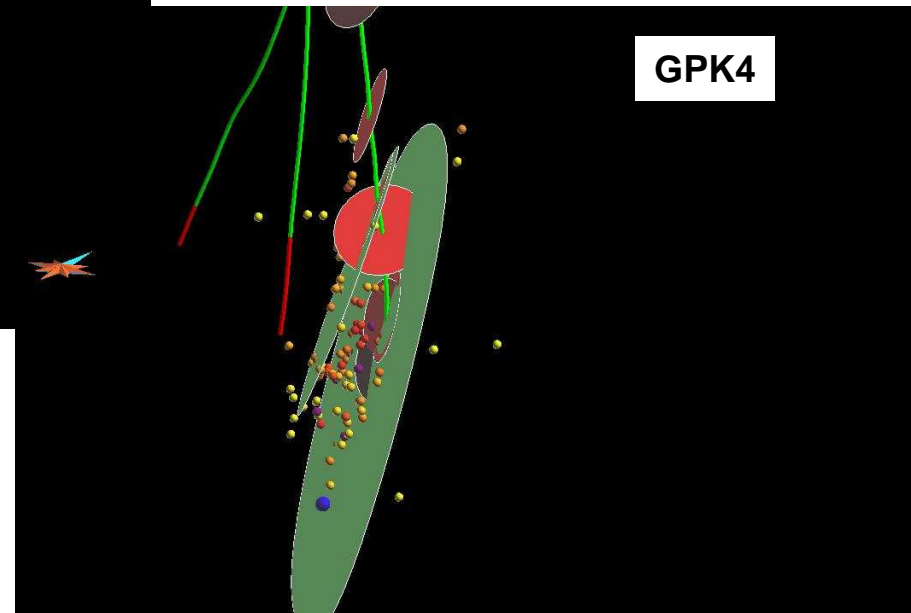
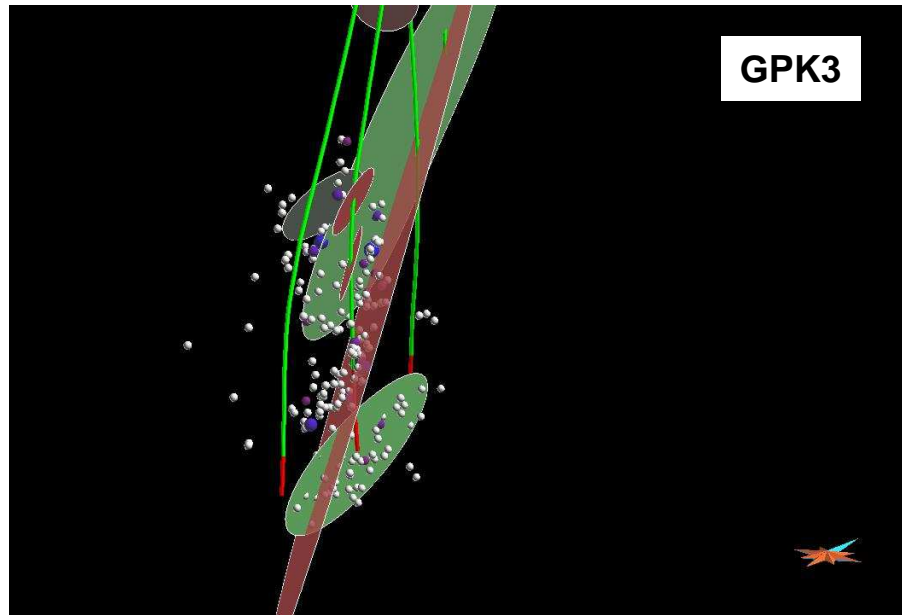
Fonction du réseau de discontinuités + tenseur des contraintes

Quel réseau de discontinuités ?



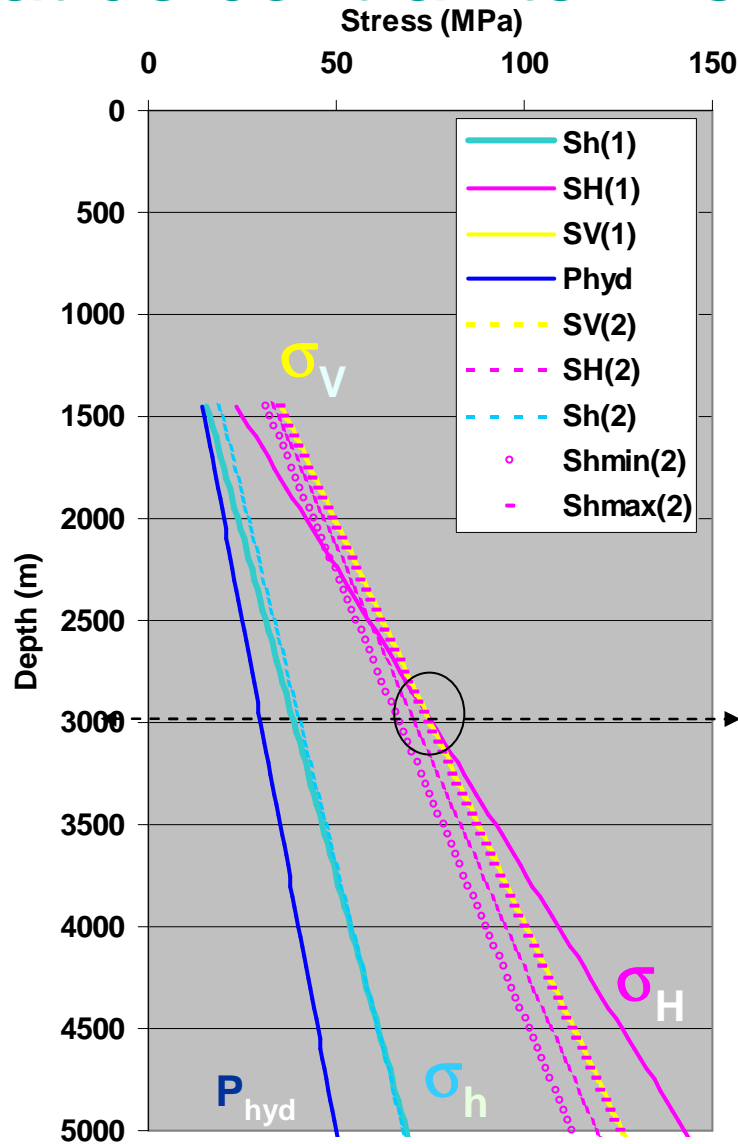
CFMR

Rôle des zones de faille



Identification du réseau
des zones de faille
propre à chaque forage :
Réseau 3D

Etat de contrainte in situ ?

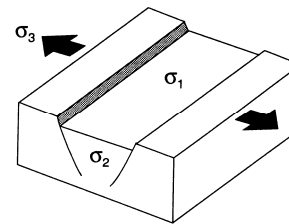


1. Klee and Rummel (1993)

σ : N170° ± 15°

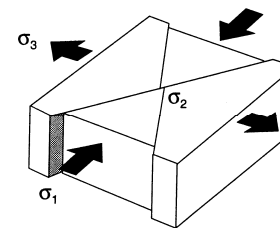
2. Cornet *et al.* (2007)

σ : N 175° ± 6°



Régime de faille normale

?



Régime en décrochement

Anisotropie du champ de contrainte

CFMR

Modélisation THM de la zone fortement stimulée

Méthode aux éléments distincts (3DEC)

- Simule des grands déplacements et rotations de corps discrets, avec détachement complet ou non,
- Reconnaissance automatique de nouveaux contacts

→ adapté à la modélisation de milieux discontinus

Mécanique

- Blocs déformables ou bien rigides,
- Comportement des fractures gouvernés par des système ressort-patin qui prennent en compte l'ouverture et la fermeture des fractures ainsi que leur cisaillement.

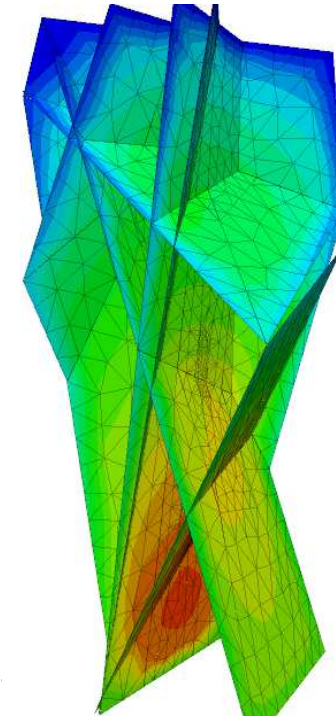
Hydraulique

- Dans les fractures (blocs imperméables)
- Ecoulement laminaire selon la loi cubique

Thermique

- Convection thermique par le fluide dans les fractures
- Echanges thermiques avec le fluide et le massif

→ **Couplage thermo-hydro-mécanique**

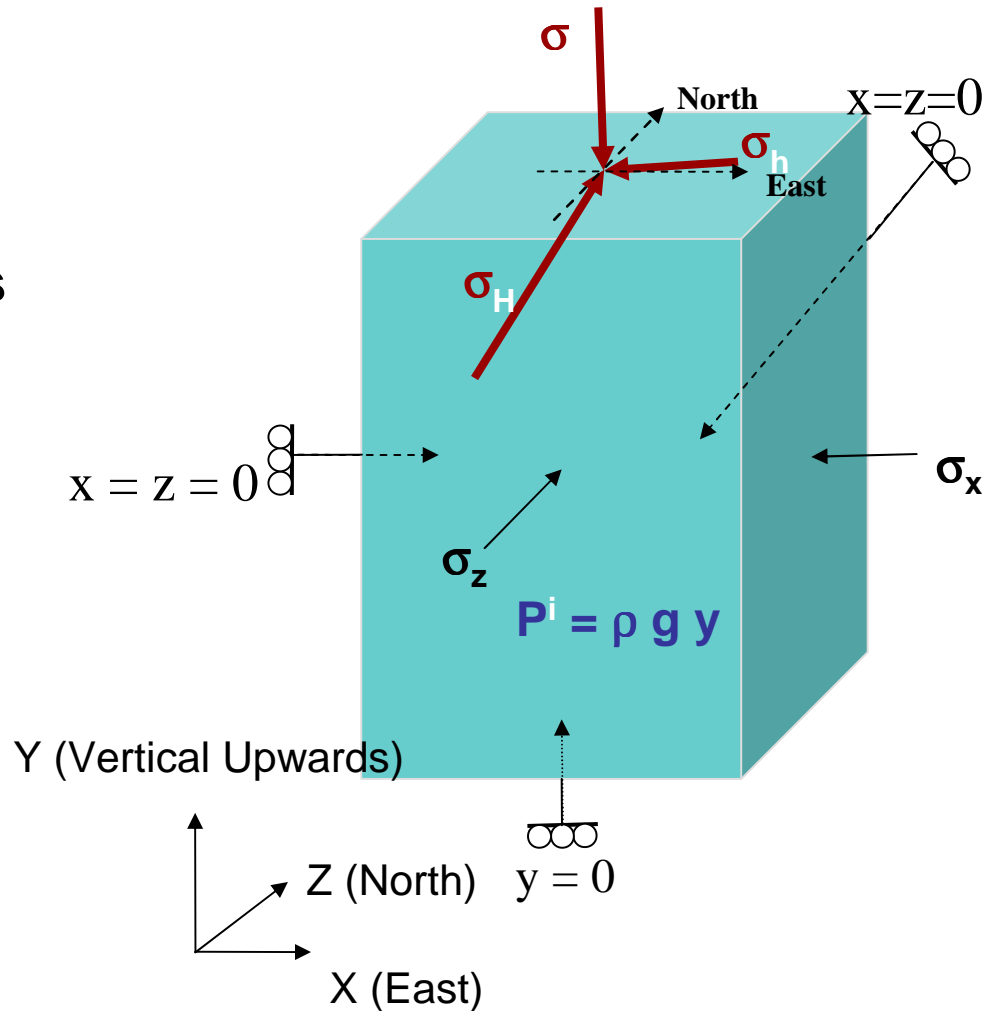
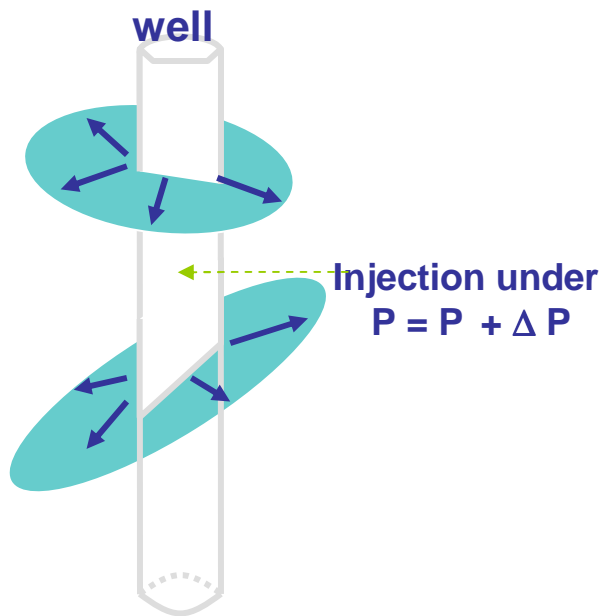


Objectifs des modélisations

- > **Mettre en évidence certains mécanismes qui pourraient expliquer l'augmentation de la perméabilité**
- > **Mettre en relation ces mécanismes avec les événements microsismiques enregistrés lors des stimulations**
- > **Mettre en évidence les paramètres importants**
- > **Permettre une meilleure prise en compte des effets de la stimulation des puits au niveau du modèle hydraulique de l'échangeur thermique et du lien avec le réservoir**

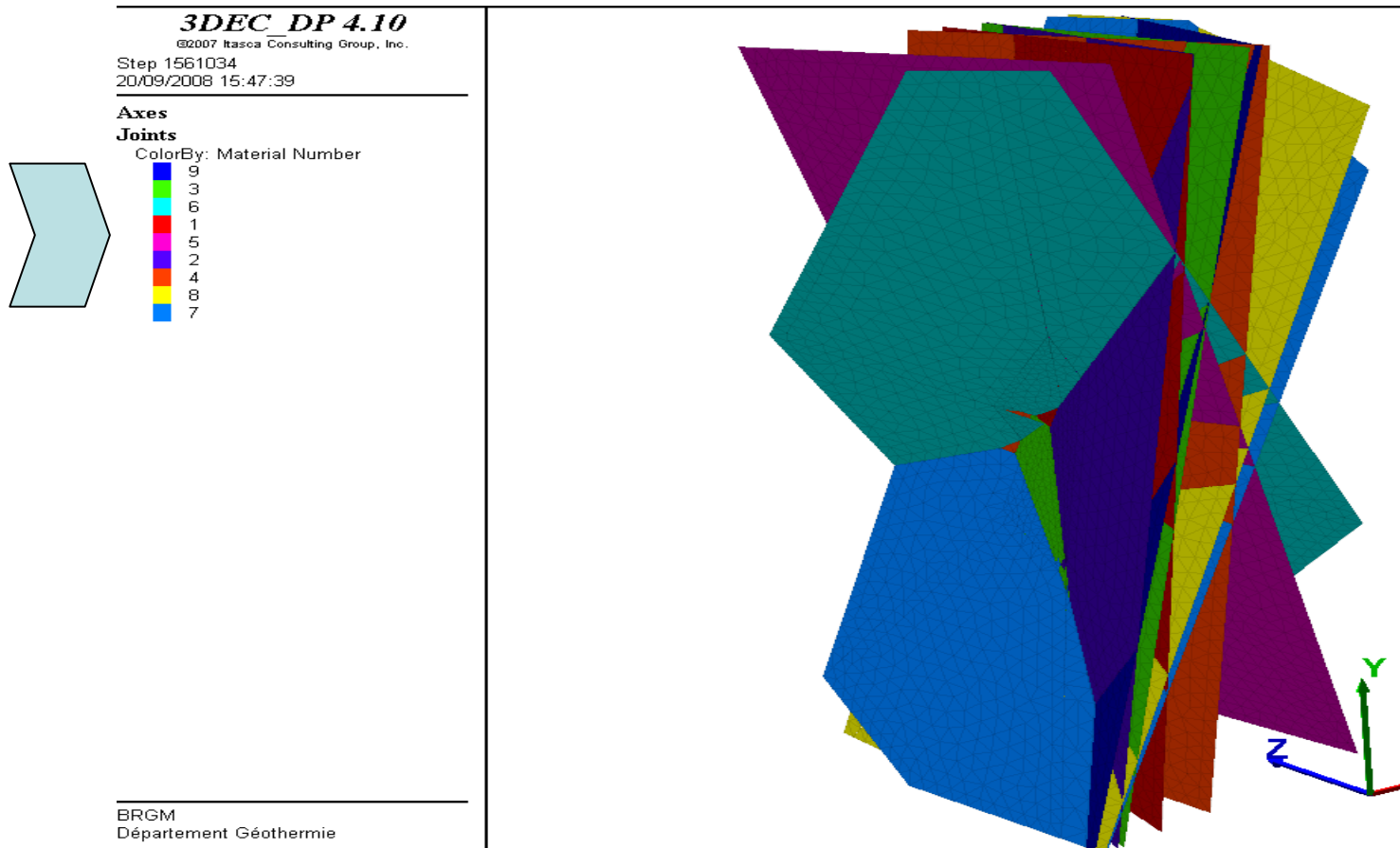
Conditions aux limites et initiales

- **Conditions aux limites**
- **Pressions**
 - Champ hydrostatique

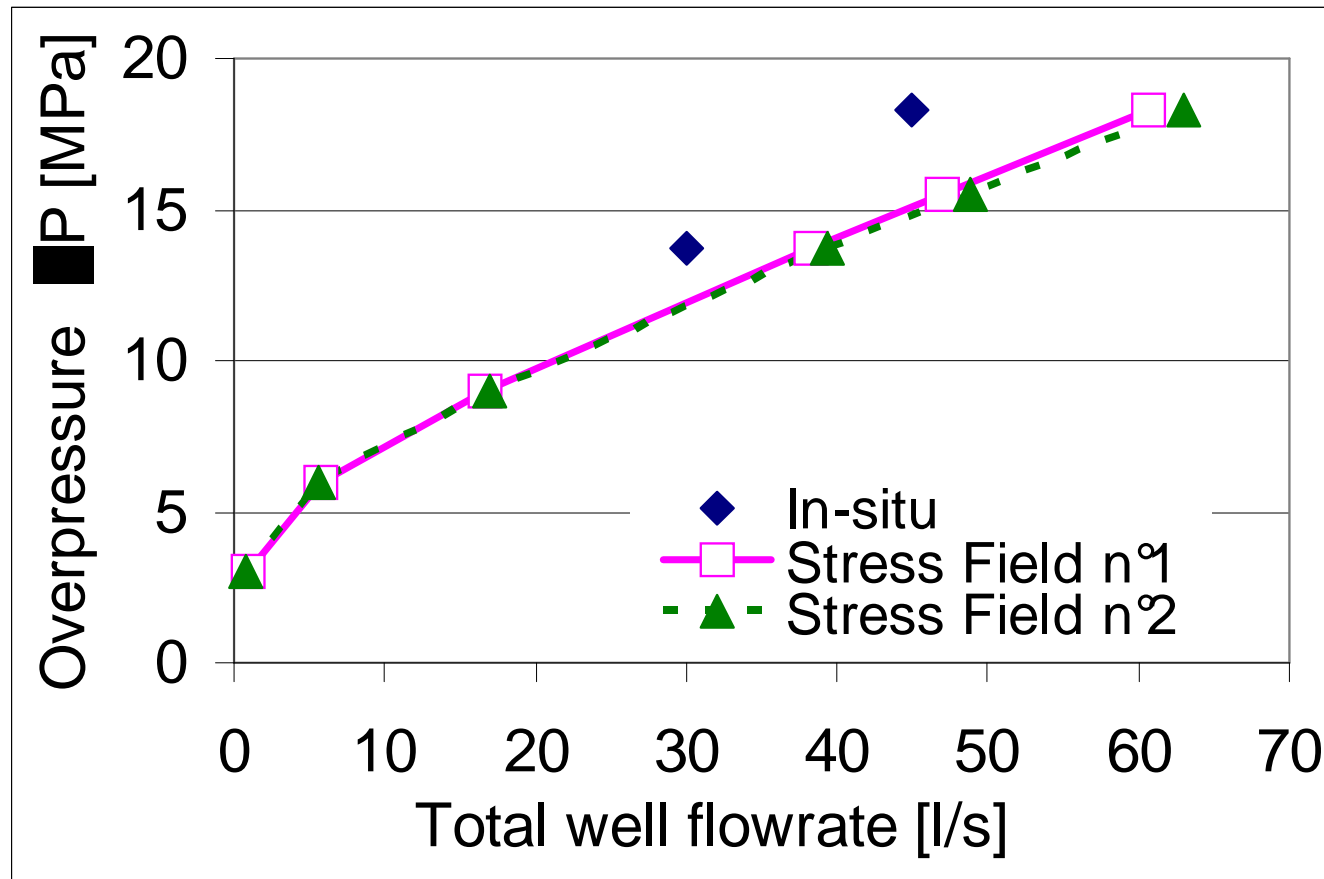


Exemple de la stimulation de GPK4

> GPK4 : 9 zones de failles identifiées

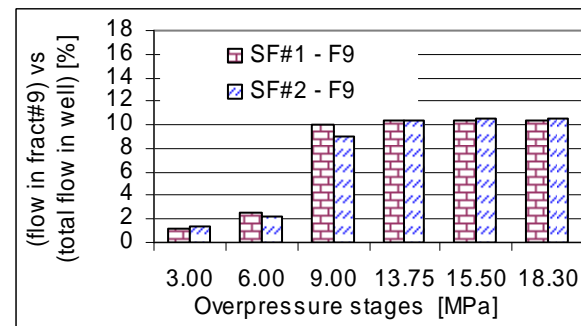
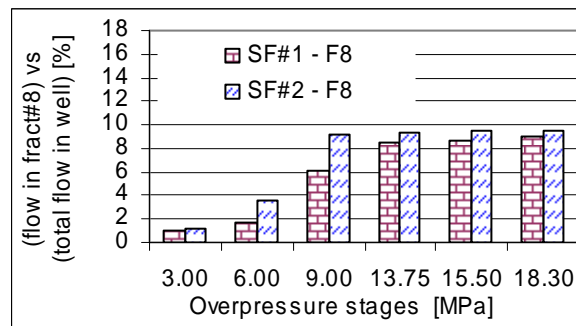
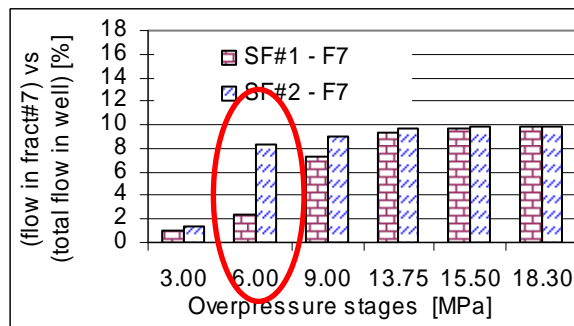
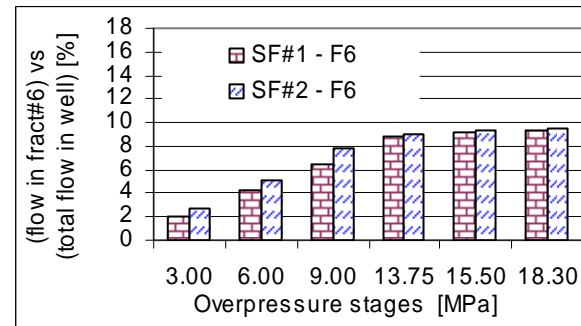
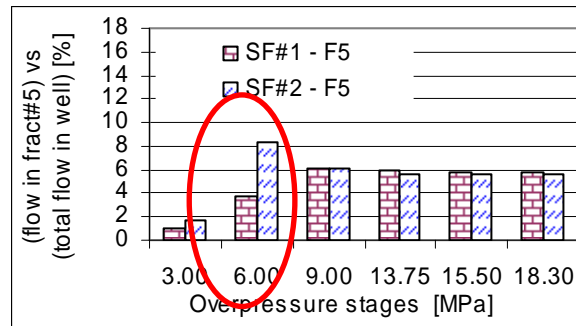
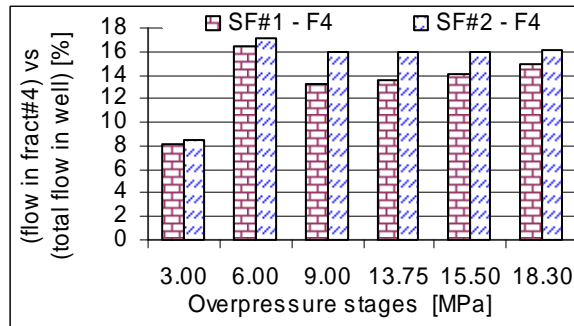
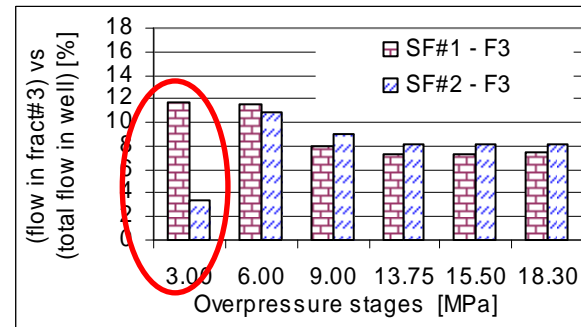
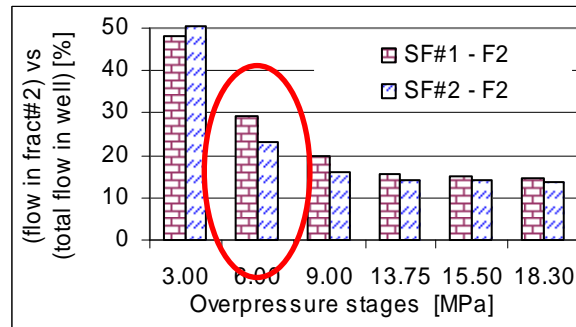
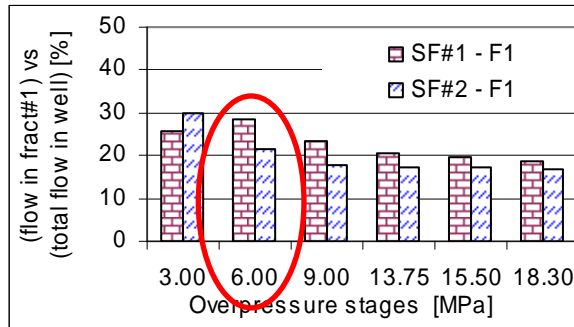


GPK4 : influence de l'état de contrainte



Peu de différence au niveau de la réponse globale du puits

GPK4 - influence de l'état de contrainte



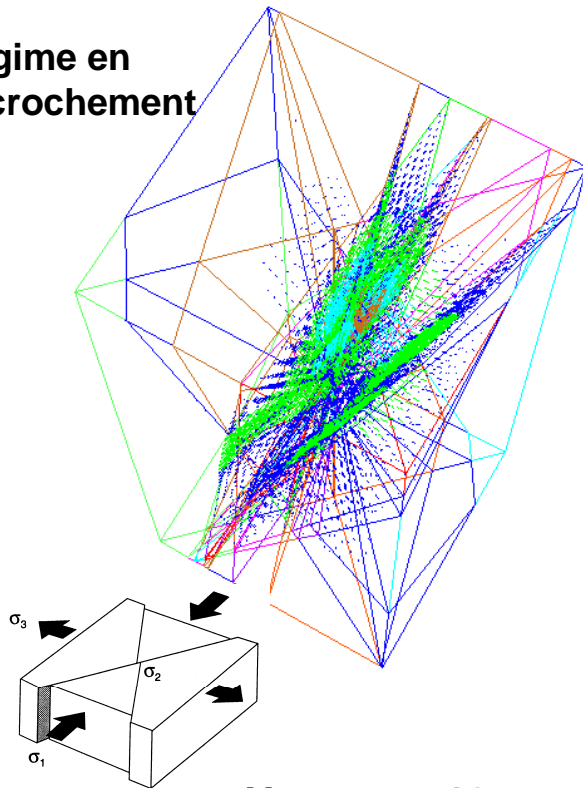
Quelques différences très localisées

CFMR

GPK4 - Influence en termes de déplacements tangentiels

Déplacements tangentiels plus localisés dans certaines fractures

Régime en décrochement



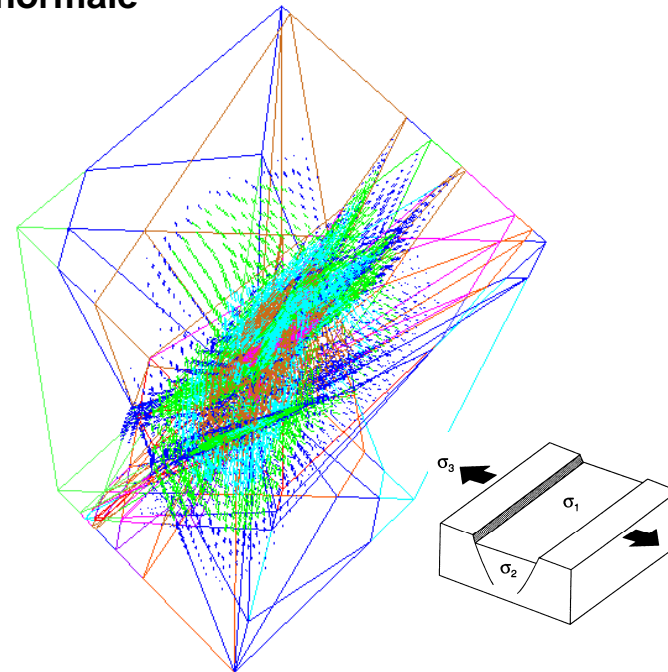
CFMR

Us max ~ 13 cm

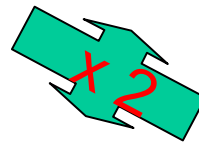
Déplacements tangentiels plus diffus

Régime de faille normale

$\Delta P = 18,3 \text{ MPa}$

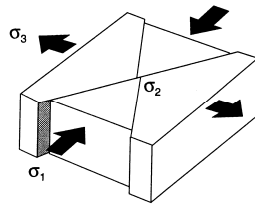
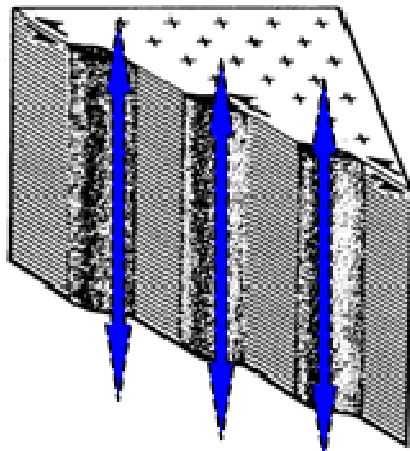


Us max ~ 6 cm

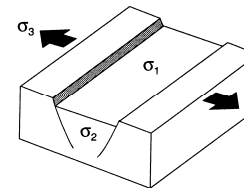
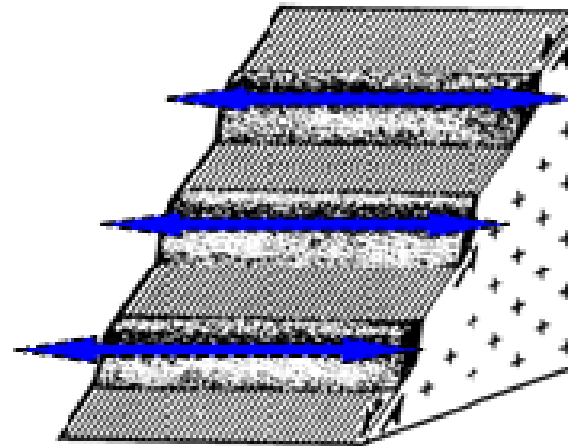


Quelles conséquences possibles sur l'écoulement en 3D ?

Localisation et directions principales de cisaillement peuvent modifier les chemins préférentiels de circulation entre les puits !



Circulations plutôt verticales



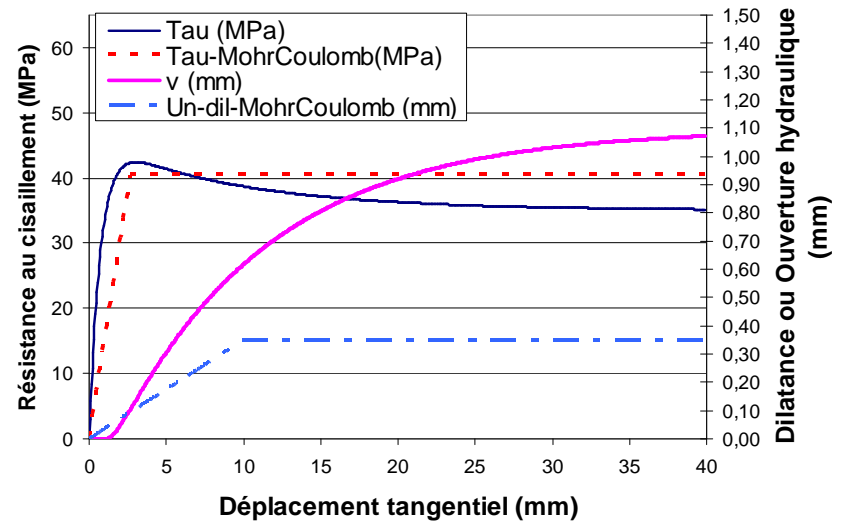
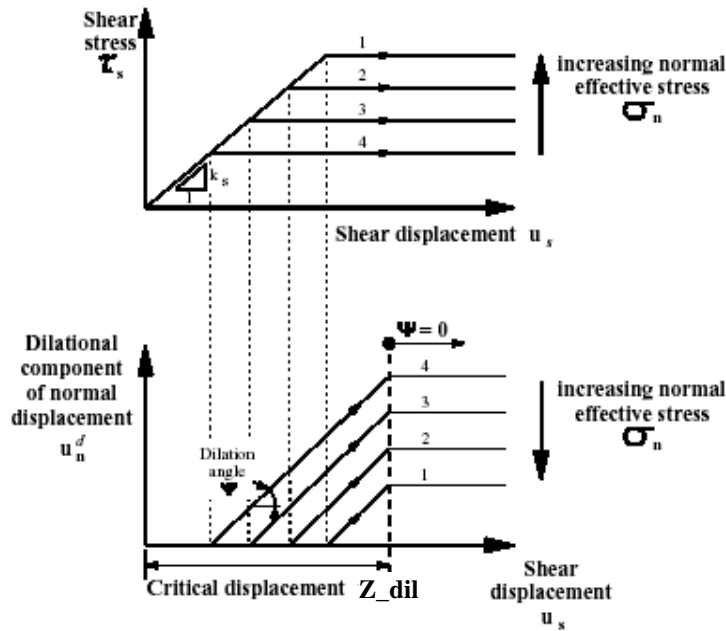
Circulations plutôt horizontales

Loi de comportement des zones de faille

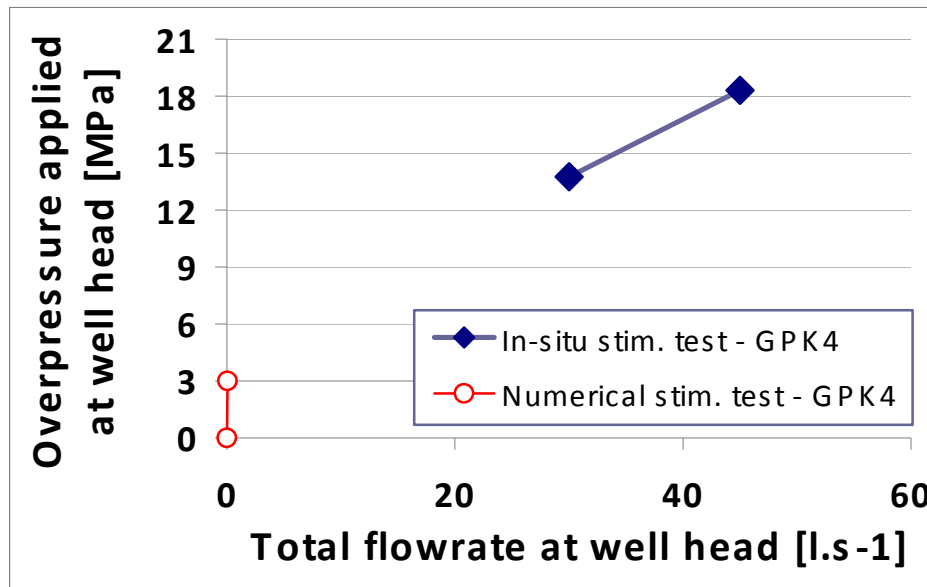
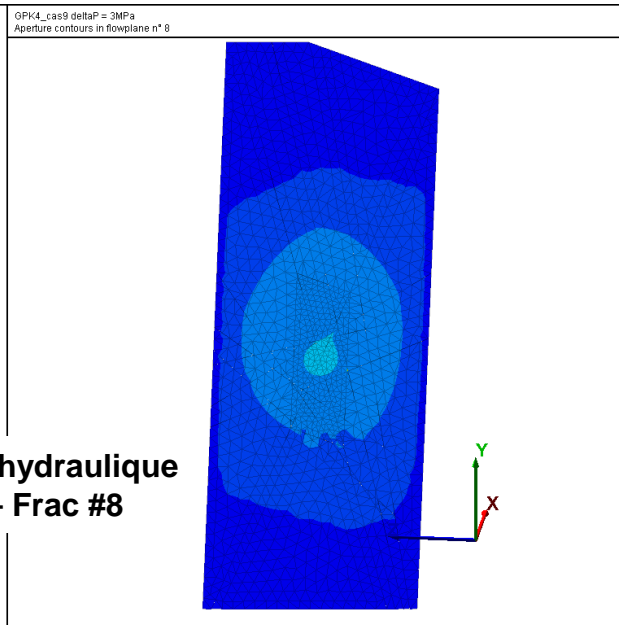
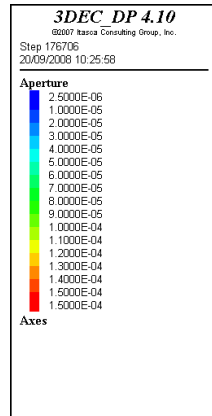
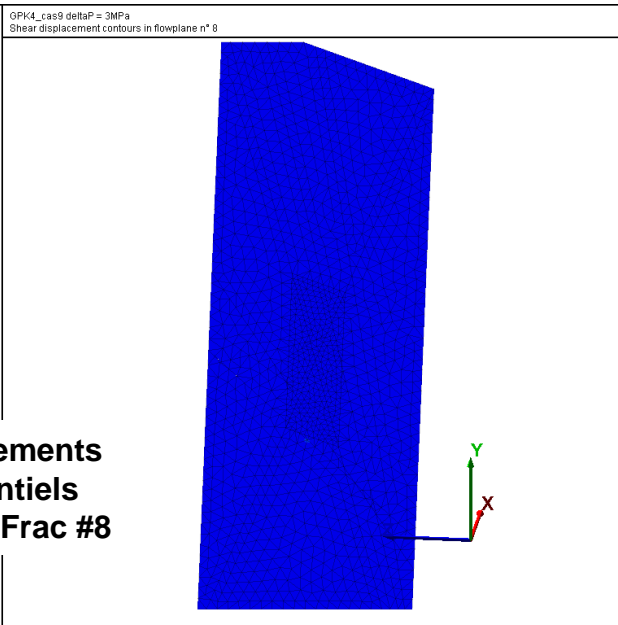
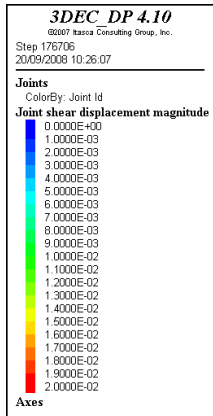
Loi de type Mohr – Coulomb
+ loi de dilatance associée

ou

Loi de type CYJM
(Continuously Yielding Joint Model):
Lien organique entre dilatance et
résistance au cisaillement



K_n [MPa/m]	K_s [MPa/m]	Cohesion [MPa]	Friction angle	Dilation angle	Z_{dil} [mm]
80 000	80 000	0	45°	1°	10
CFMR					
Initial aperture a_0 [mm]		Residual aperture a_{res} [mm]		Maximum aperture a_{max} [mm]	
2.5e-3		2.5e-3		0.15	



CFMR

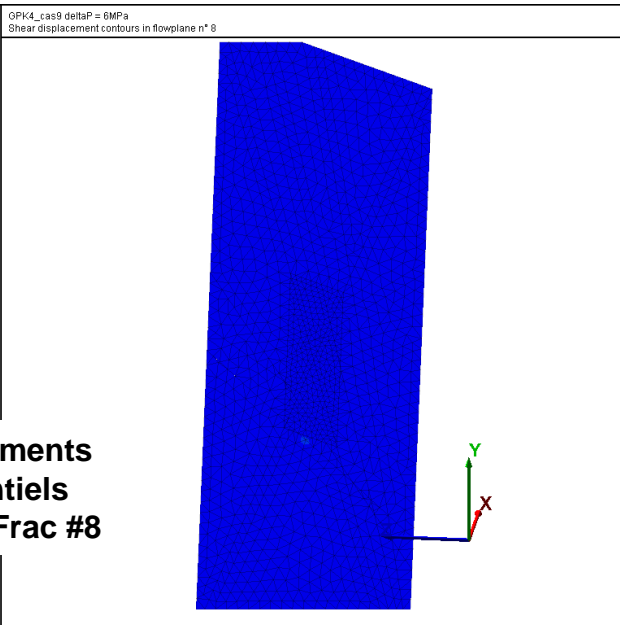


3DEC DP 4.10
 ©2007 Itasca Consulting Group, Inc.
 Step 546623
 20/09/2008 10:26:42

Joints
 ColorBy: Joint Id
Joint shear displacement magnitude

0.0000E+00
1.0000E-03
2.0000E-03
3.0000E-03
4.0000E-03
5.0000E-03
6.0000E-03
7.0000E-03
8.0000E-03
9.0000E-03
1.0000E-02
1.1000E-02
1.2000E-02
1.3000E-02
1.4000E-02
1.5000E-02
1.6000E-02
1.7000E-02
1.8000E-02
1.9000E-02
2.0000E-02

Axes



Déplacements tangentiels GPK4 – Frac #8

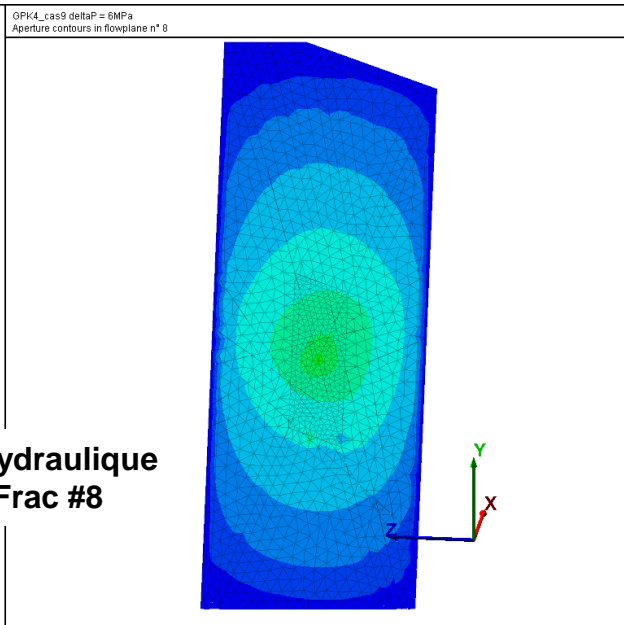
BRGM
 Département Géothermie

3DEC DP 4.10
 ©2007 Itasca Consulting Group, Inc.
 Step 546623
 20/09/2008 10:26:33

Aperture

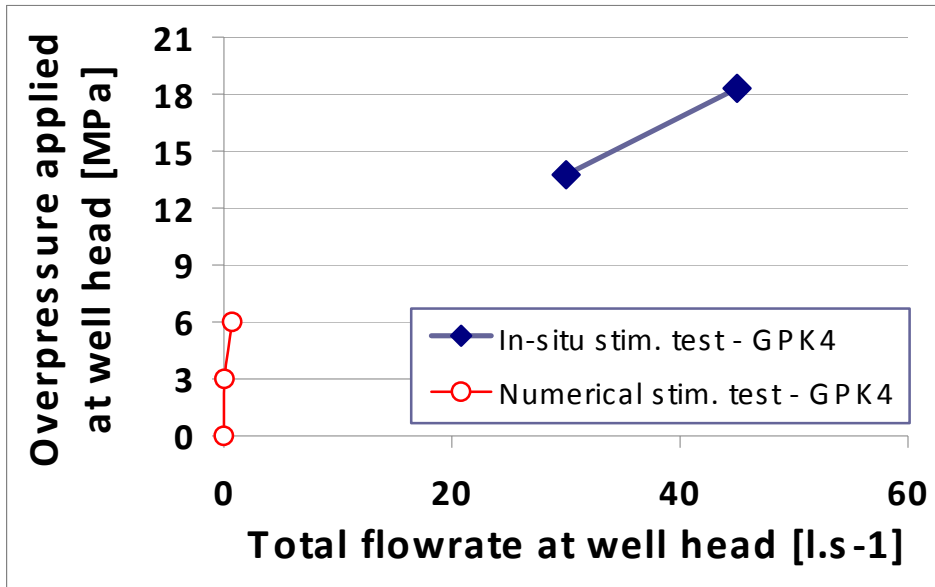
2.5000E-06
1.0000E-05
2.0000E-05
3.0000E-05
4.0000E-05
5.0000E-05
6.0000E-05
7.0000E-05
8.0000E-05
9.0000E-05
1.0000E-04
1.1000E-04
1.2000E-04
1.3000E-04
1.4000E-04
1.5000E-04

Axes



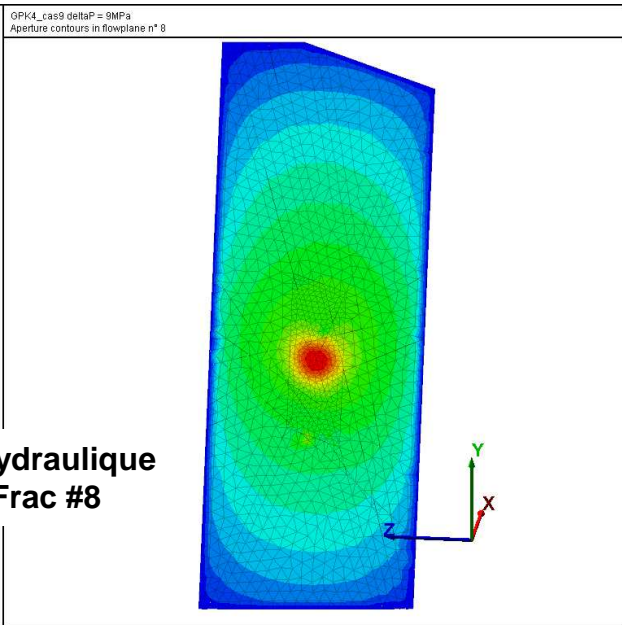
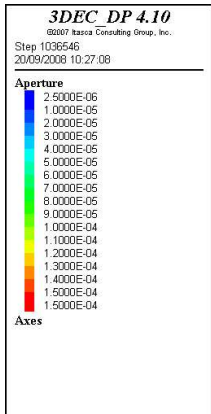
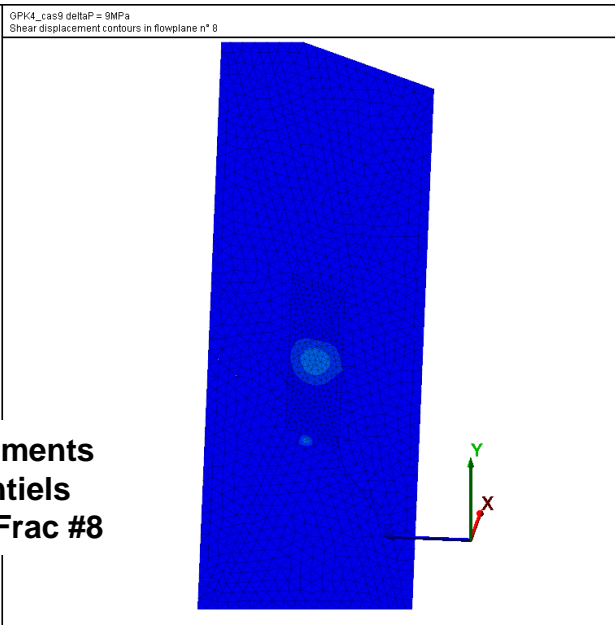
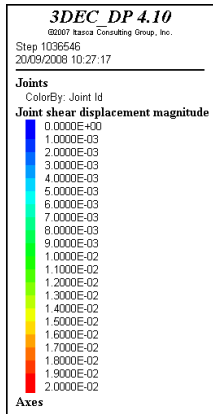
Ouverture hydraulique GPK4 – Frac #8

BRGM
 Département Géothermie



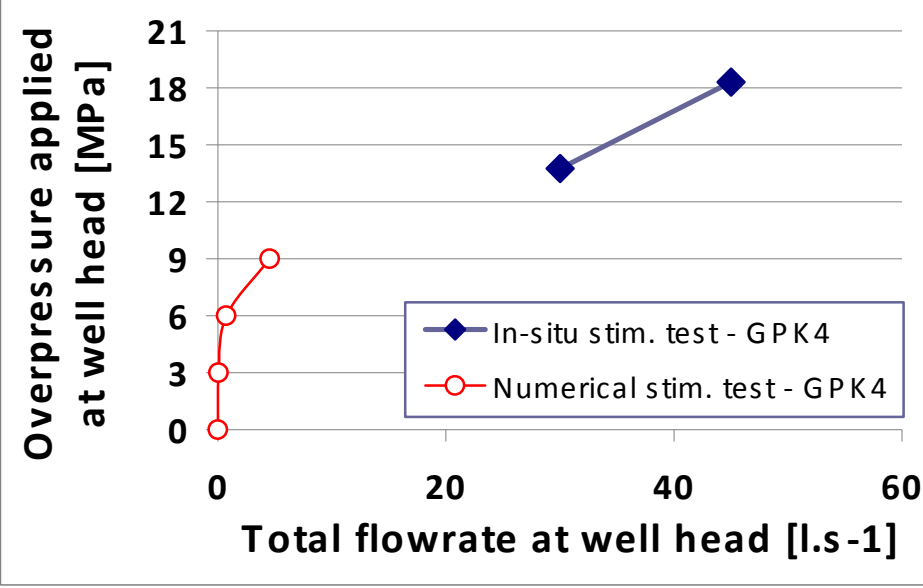
CFMR





BRGM
Département Géothermie

BRGM
Département Géothermie



CFMR

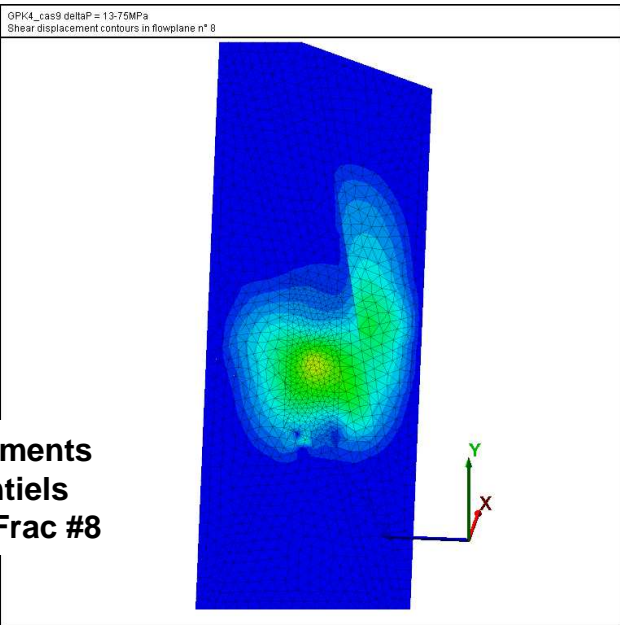


3DEC DP 4.10
 ©2007 Itasca Consulting Group, Inc.
 Step 1313915
 20/09/2008 10:27:51

Joints
 ColorBy: Joint Id
Joint shear displacement magnitude

0.0000E+00
 1.0000E-03
 2.0000E-03
 3.0000E-03
 4.0000E-03
 5.0000E-03
 6.0000E-03
 7.0000E-03
 8.0000E-03
 9.0000E-03
 1.0000E-02
 1.1000E-02
 1.2000E-02
 1.3000E-02
 1.4000E-02
 1.5000E-02
 1.6000E-02
 1.7000E-02
 1.8000E-02
 1.9000E-02
 2.0000E-02

Axes



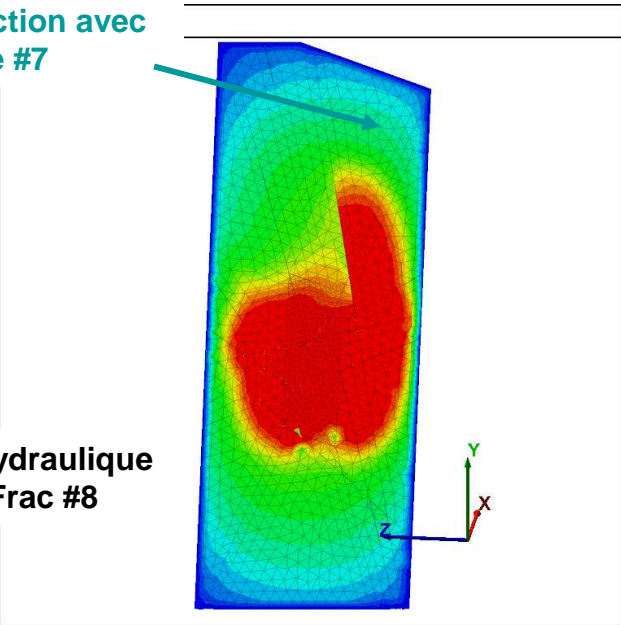
Déplacements tangentiels GPK4 – Frac #8

3DI
 ©2007 Itasca
 Step 1313915
 20/09/2008 10:27:51

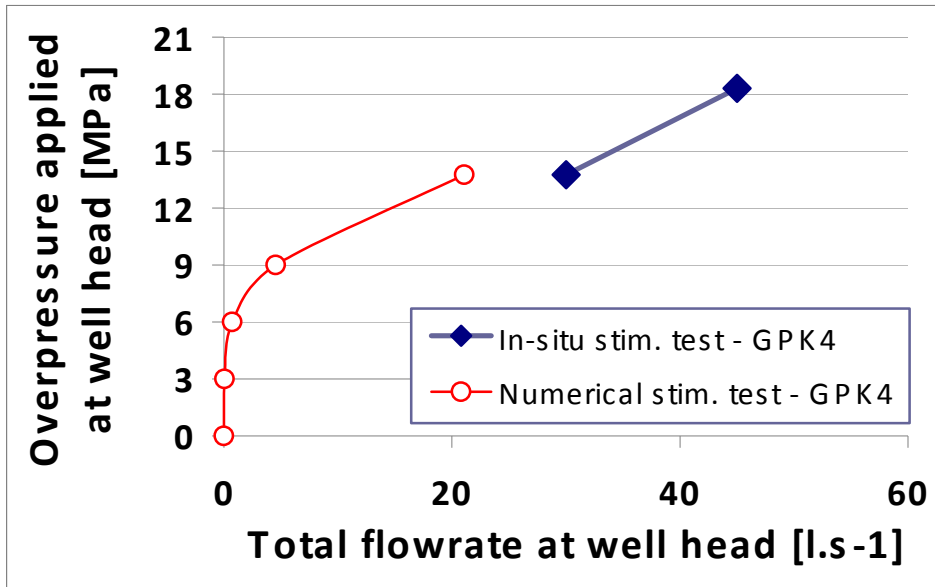
Aperture

2.5000E-06
 1.0000E-05
 2.0000E-05
 3.0000E-05
 4.0000E-05
 5.0000E-05
 6.0000E-05
 7.0000E-05
 8.0000E-05
 9.0000E-05
 1.0000E-04
 1.1000E-04
 1.2000E-04
 1.3000E-04
 1.4000E-04
 1.5000E-04
 1.5000E-04

Axes



Ouverture hydraulique GPK4 – Frac #8



CFMR

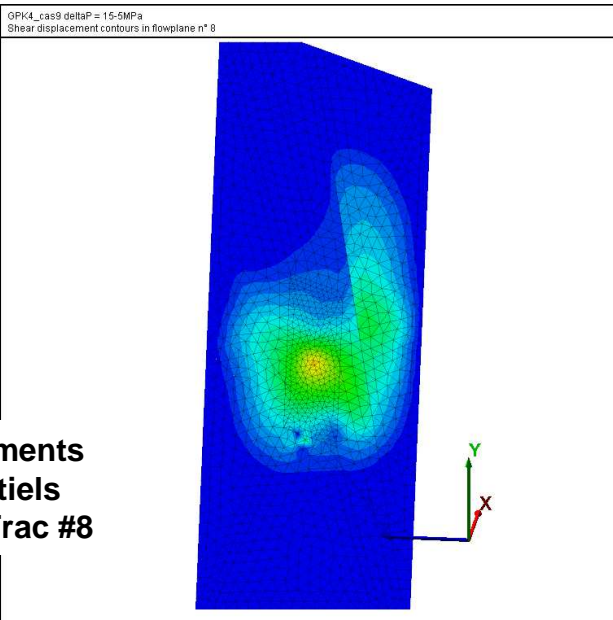


3DEC DP 4.10
©2007 Itasca Consulting Group, Inc.
Step 1437261
20/09/2008 10:28:26

Joints
ColorBy: Joint Id
Joint shear displacement magnitude

0.0000E+00
1.0000E-03
2.0000E-03
3.0000E-03
4.0000E-03
5.0000E-03
6.0000E-03
7.0000E-03
8.0000E-03
9.0000E-03
1.0000E-02
1.1000E-02
1.2000E-02
1.3000E-02
1.4000E-02
1.5000E-02
1.6000E-02
1.7000E-02
1.8000E-02
1.9000E-02
2.0000E-02

Axes



Déplacements tangentiels
GPK4 – Frac #8

BRGM
Département Géothermie

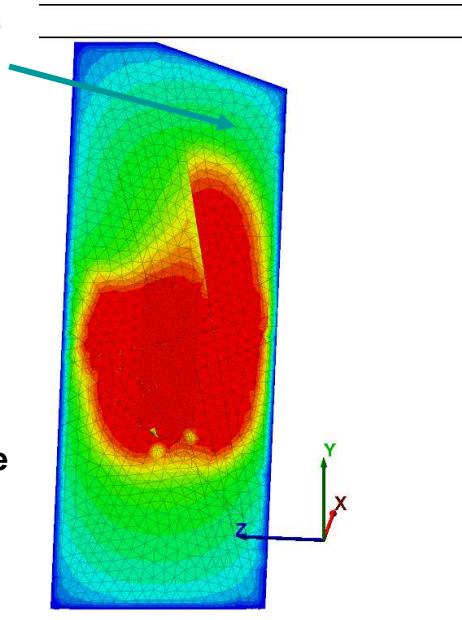
3DI
©2007 It
Step 1437261
20/09/2008 11

Aperture

2.5000E-06
1.0000E-05
2.0000E-05
3.0000E-05
4.0000E-05
5.0000E-05
6.0000E-05
7.0000E-05
8.0000E-05
9.0000E-05
1.0000E-04
1.1000E-04
1.2000E-04
1.3000E-04
1.4000E-04
1.5000E-04
1.5000E-04

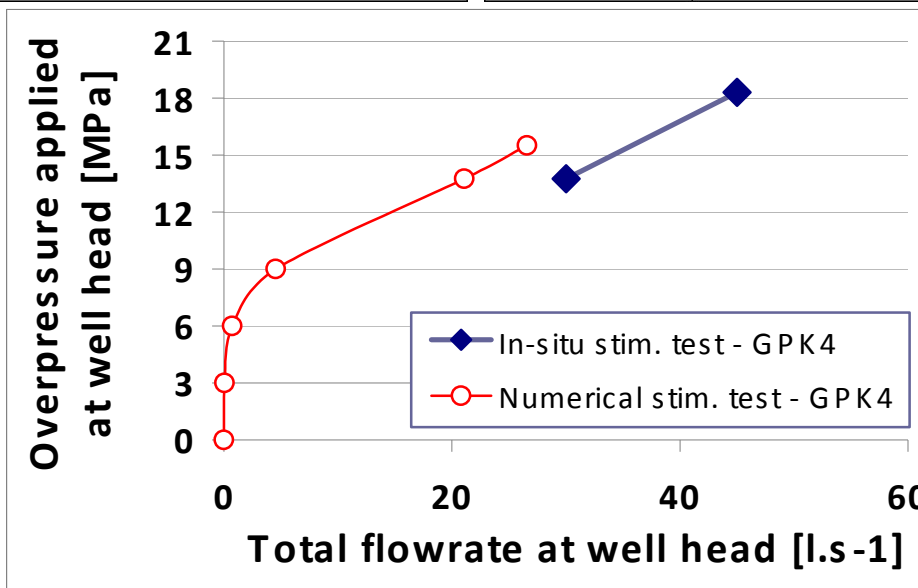
Axes

Intersection avec fracture #7



Ouverture hydraulique
GPK4 – Frac #8

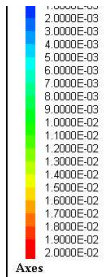
BRGM
Département Géothermie



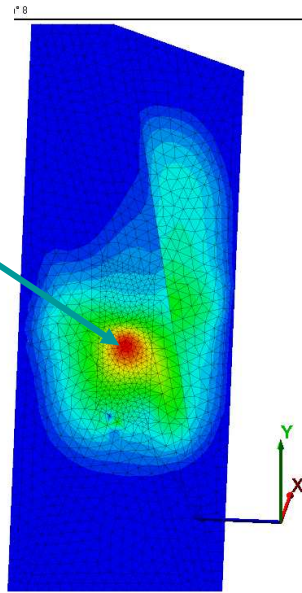
CFMR



Déplacement ~ 2 cm
 Rayon ~ 30 m
 Sismique or asismique ?

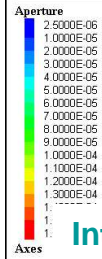


Déplacements tangentiels
 GPK4 – Frac #8



BRGM
 Département Géothermie

3DEC DP 4.10
 ©2007 Itasca Consulting Group, Inc.
 Step 1561034
 20/09/2008 10:34:32

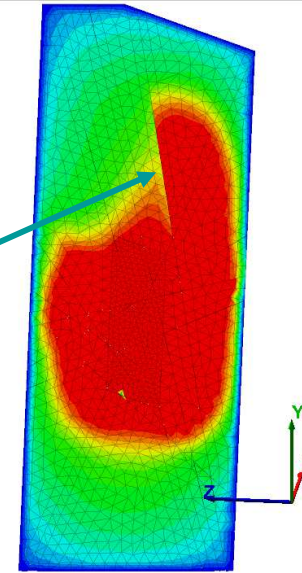


Aperture

BRGM
 Département Géothermie

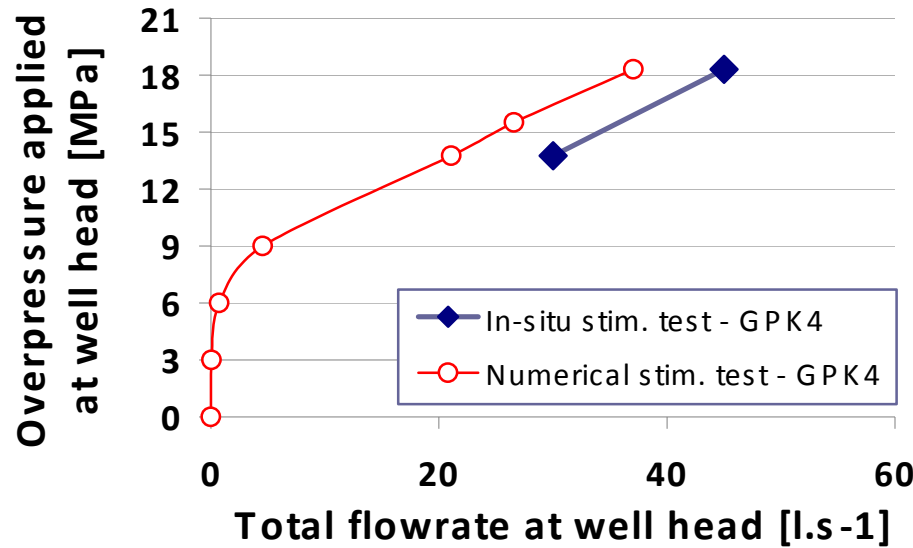
Ouverture hydraulique
 GPK4 – Frac #8

GPK4_cas9 deltaP = 18-3MPa
 Aperture contours in flowplane n° 8



Intersection avec fracture #7

Mise en évidence de mécanismes qui peuvent intervenir durant la stimulation hydraulique

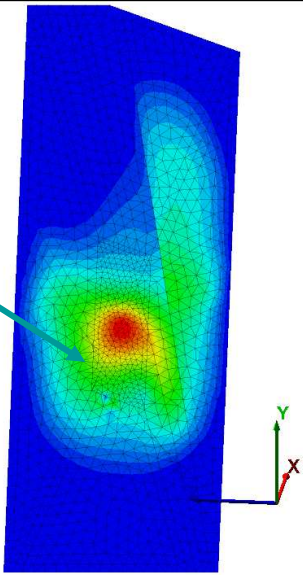


CFMR



3DEC DP 4.10
©2007 Itasca Consulting Group, Inc.
Step 3841224
20/09/2008 10:40:40
Joints
ColorBy: Joint Id

GPk4_cas9dech deltaP = OMPa-WellShutdown
Shear displacement contours in flowplane n° 8



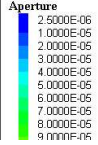
- Déplacement tangentiel continue à augmenter légèrement durant la fermeture du puits
- mode de fermeture du puits?

Déplacements tangentiels
GPk4 – Frac #8

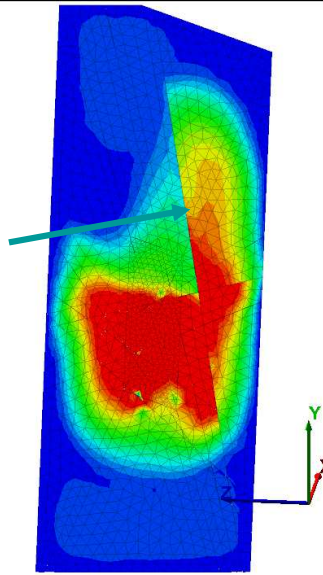
axes

BRGM
Département Géothermie

3DEC DP 4.10
©2007 Itasca Consulting Group, Inc.
Step 3841224
20/09/2008 10:40:32
Aperture



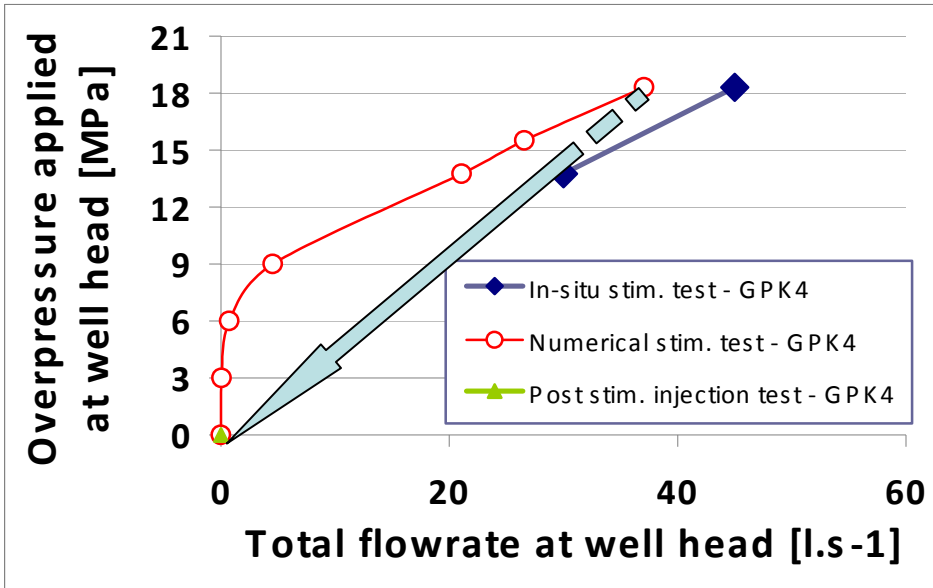
GPk4_cas9dech deltaP = OMPa-WellShutdown
Aperture contours in flowplane n° 8



Ouverture hydraulique irréversible après la fermeture du puits

Ouverture hydraulique
GPk4 – Frac #8

BRGM
Département Géothermie

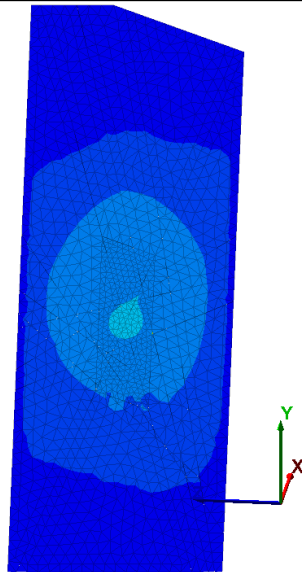
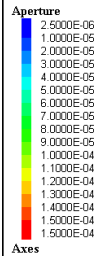


CFMR



3DEC DP 4.10
©2007 Itasca Consulting Group, Inc.
Step 176706
20/09/2008 10:25:58

GPK4_cas9 deltaP = 3MPa
Aperture contours in flowplane n° 8

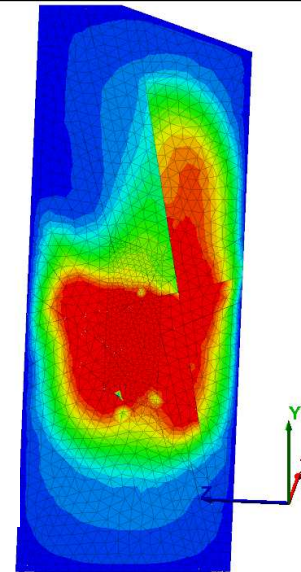
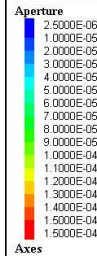


Ouverture hydraulique
GPK4 – Frac #8
Stimulation test

BRGM
Département Géothermie

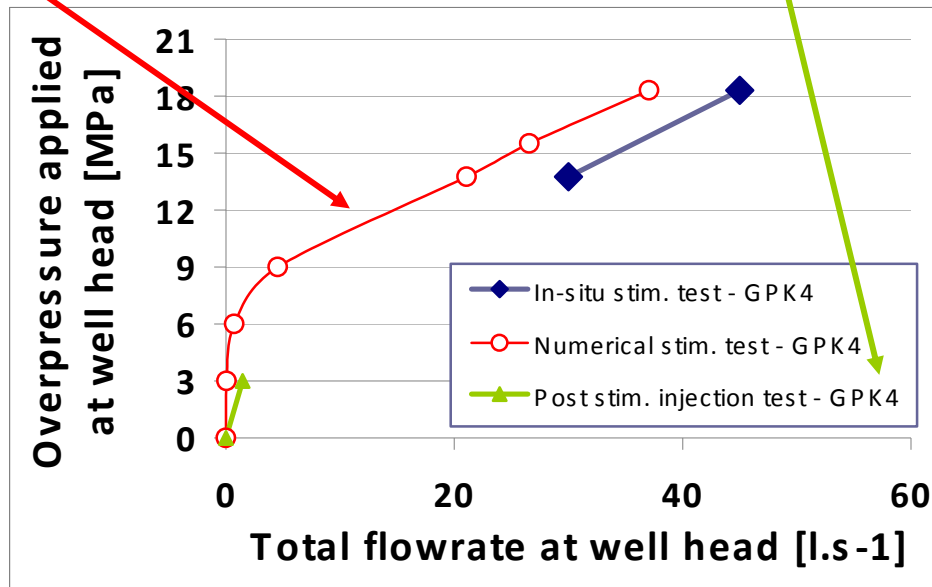
3DEC DP 4.10
©2007 Itasca Consulting Group, Inc.
Step 4777462
20/09/2008 10:44:26

GPK4_cas9reload deltaP = 3MPa_injection
Aperture contours in flowplane n° 8



Ouverture hydraulique
GPK4 – Frac #8
Post stim. Injection test

BRGM
Département Géothermie

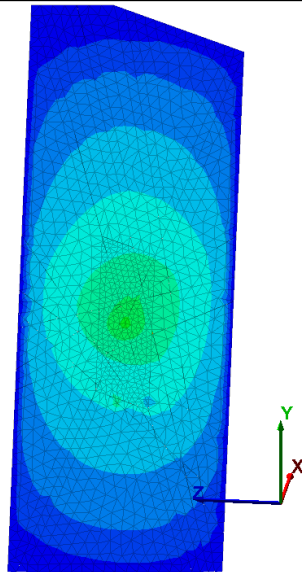
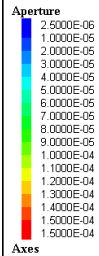


CFMR



3DEC DP 4.10
©2007 Itasca Consulting Group, Inc.
Step 546623
20/09/2008 10:26:33

GPK4_cas9 deltaP = 6MPa
Aperture contours in flowplane n° 8

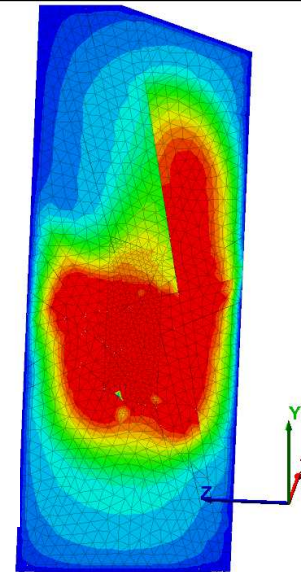
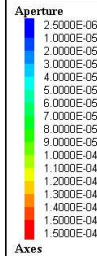


**Ouverture hydraulique
GPK4 – Frac #8
Stimulation test**

BRGM
Département Géothermie

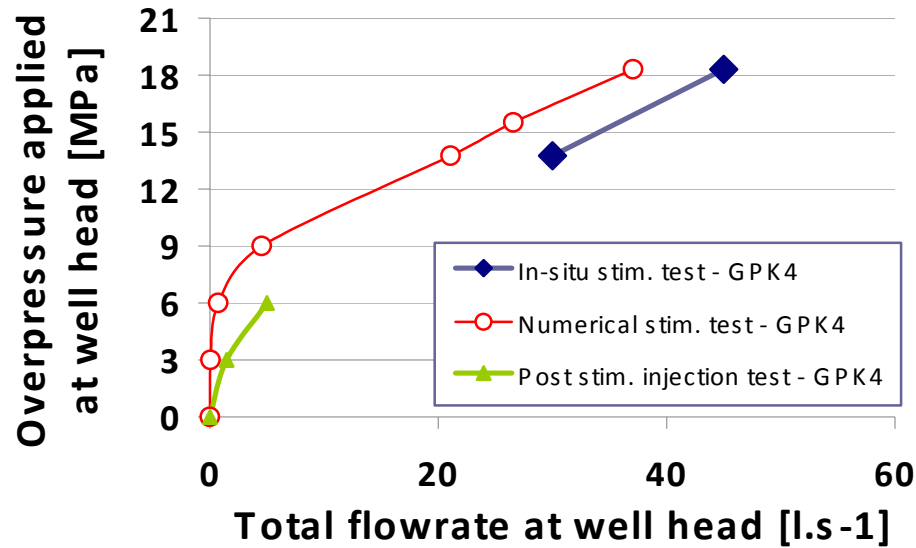
3DEC DP 4.10
©2007 Itasca Consulting Group, Inc.
Step 5413785
20/09/2008 10:45:47

GPK4_cas9reload deltaP = 6MPa_injection
Aperture contours in flowplane n° 8



**Ouverture hydraulique
GPK4 – Frac #8
Post stim. Injection test**

BRGM
Département Géothermie



CFMR



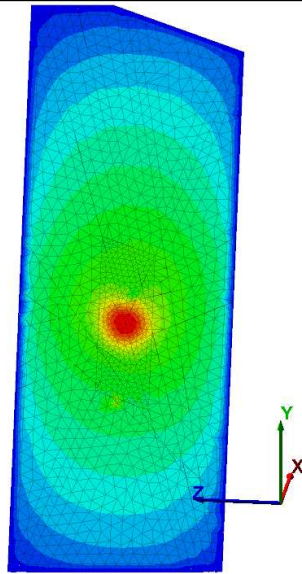
3DEC DP 4.10
©2007 Itasca Consulting Group, Inc.

Step 1036546
20/09/2008 10:27:08

Aperture
2.5000E-06
1.0000E-05
2.0000E-05
3.0000E-05
4.0000E-05
5.0000E-05
6.0000E-05
7.0000E-05
8.0000E-05
9.0000E-05
1.0000E-04
1.1000E-04
1.2000E-04
1.3000E-04
1.4000E-04
1.5000E-04
1.5000E-04

Axes

GPK4_cas9 deltaP = 9MPa
Aperture contours in flowplane n° 8



Ouverture hydraulique
GPK4 – Frac #8
Stimulation test

BRGM
Département Géothermie

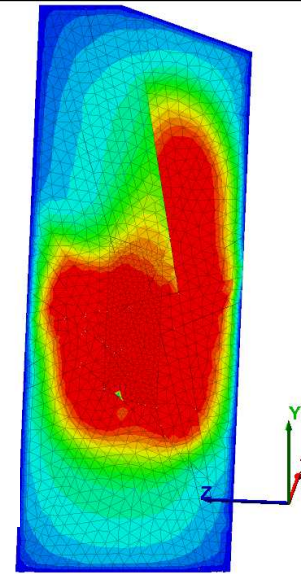
3DEC DP 4.10
©2007 Itasca Consulting Group, Inc.

Step 5796489
20/09/2008 10:46:23

Aperture
2.5000E-06
1.0000E-05
2.0000E-05
3.0000E-05
4.0000E-05
5.0000E-05
6.0000E-05
7.0000E-05
8.0000E-05
9.0000E-05
1.0000E-04
1.1000E-04
1.2000E-04
1.3000E-04
1.4000E-04
1.5000E-04
1.5000E-04

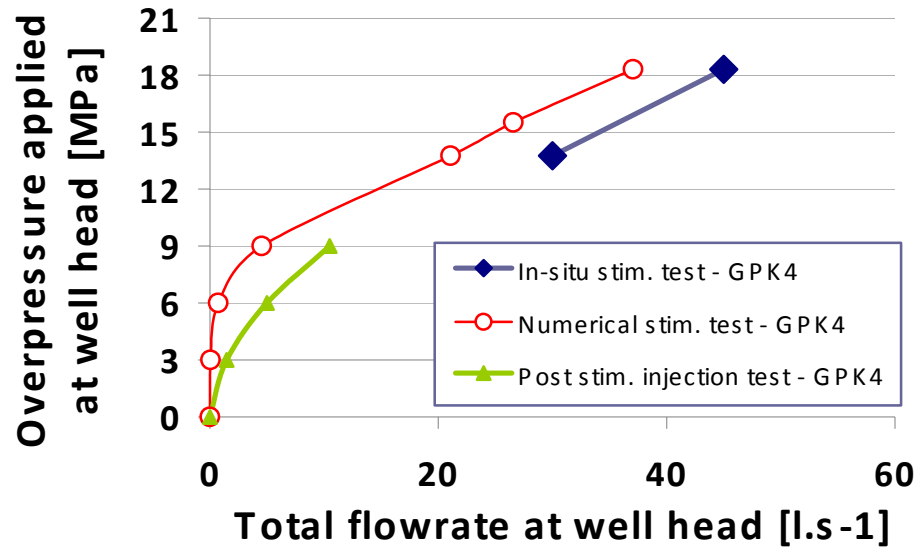
Axes

GPK4_cas9reload deltaP = 9MPa_injection
Aperture contours in flowplane n° 8

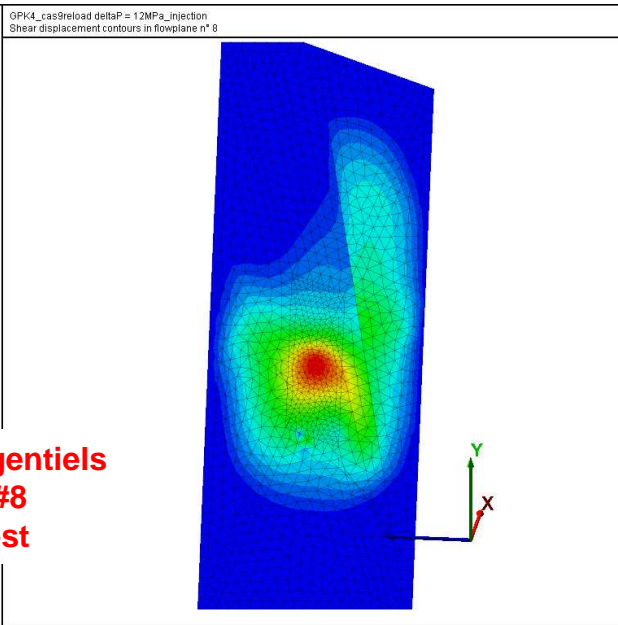
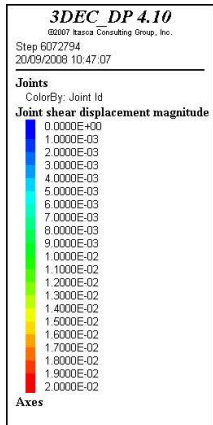


Ouverture hydraulique
GPK4 – Frac #8
Post stim. Injection test

BRGM
Département Géothermie

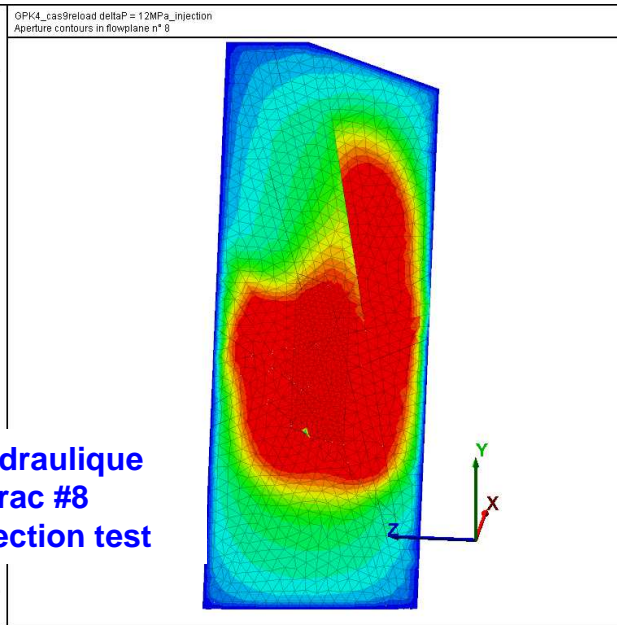
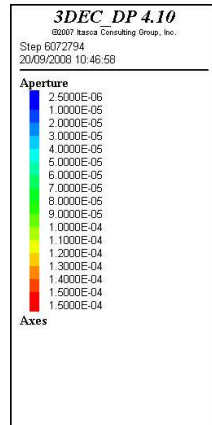


CFMR



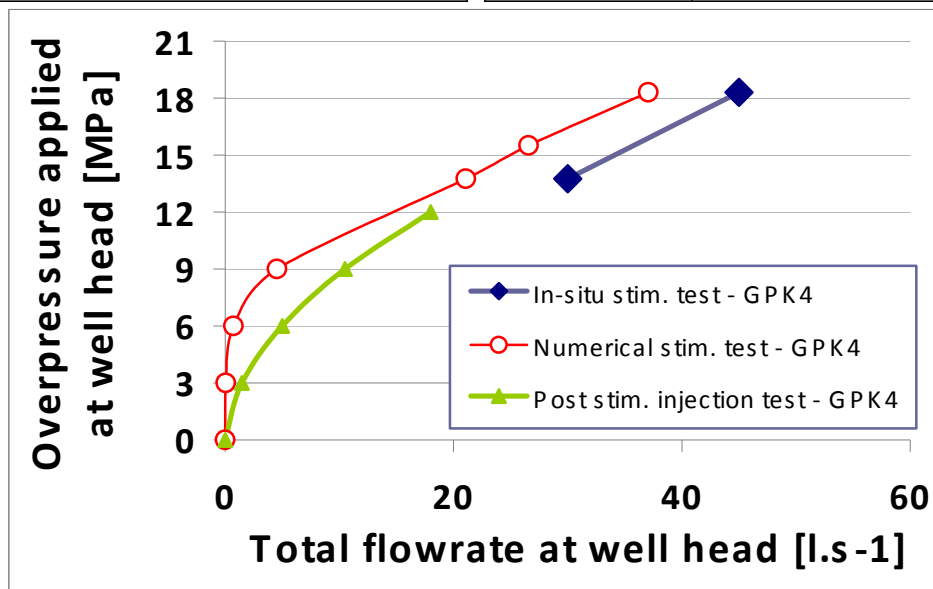
**Déplacements tangentiels
GPK4 – Frac #8
Stimulation test**

BRGM
Département Géothermie

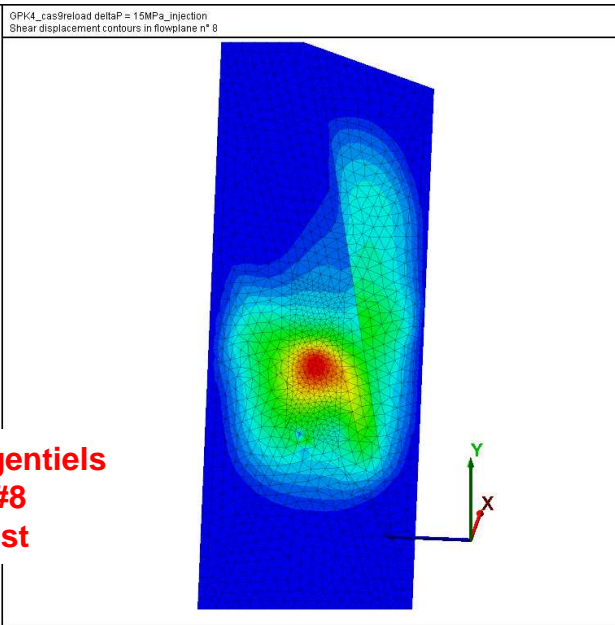
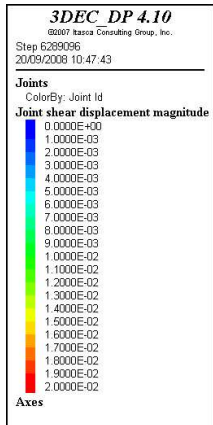


**Ouverture hydraulique
GPK4 – Frac #8
Post stim. Injection test**

BRGM
Département Géothermie

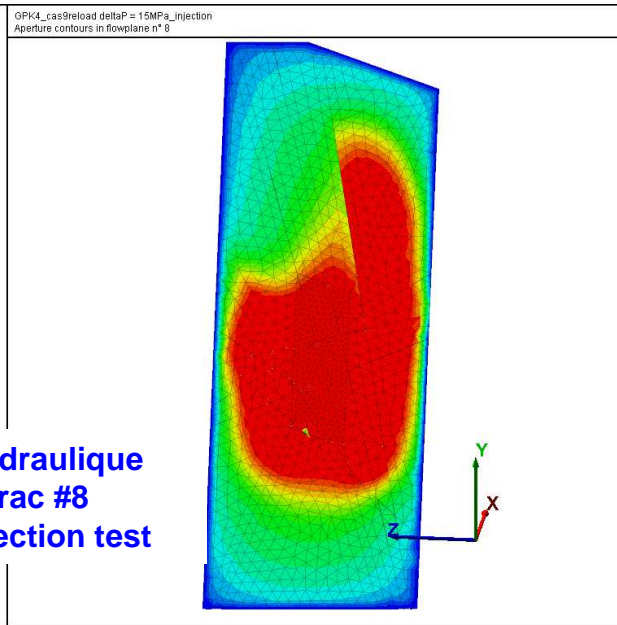
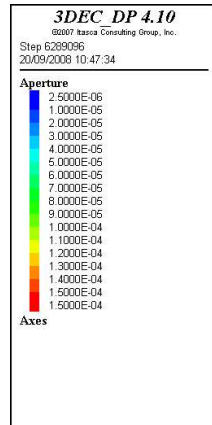


CFMR



Déplacements tangentiels
GPK4 – Frac #8
Stimulation test

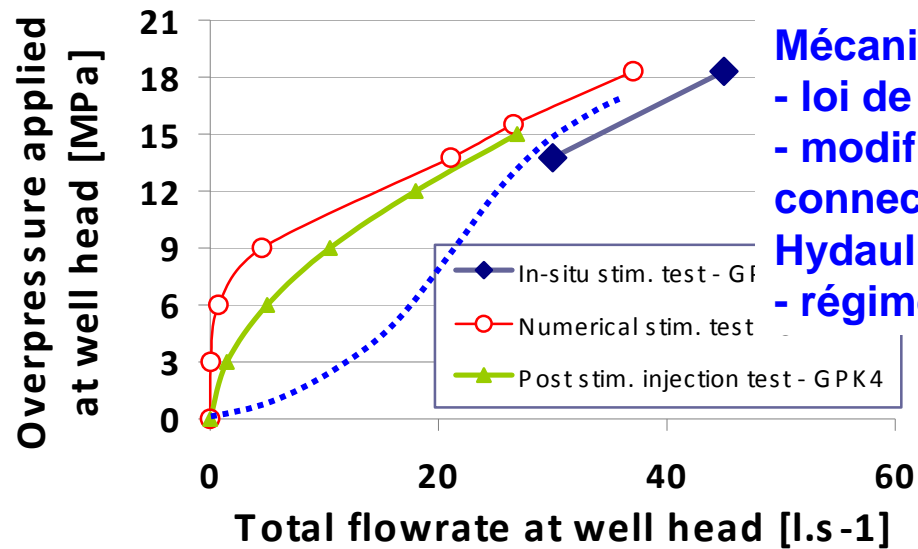
BRGM
Département Géothermie



Ouverture hydraulique
GPK4 – Frac #8
Post stim. Injection test

BRGM
Département Géothermie

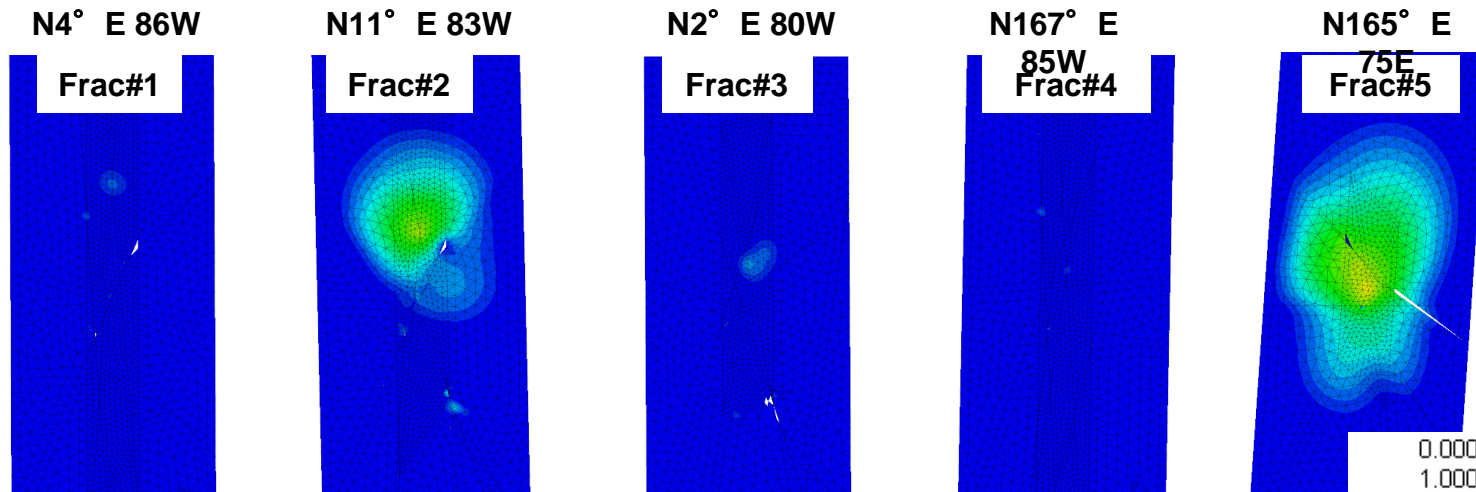
- 1) Test de stimulation hydraulique,
 - 2) Test d'injection post stimulation
- création d'une perméabilité irréversible



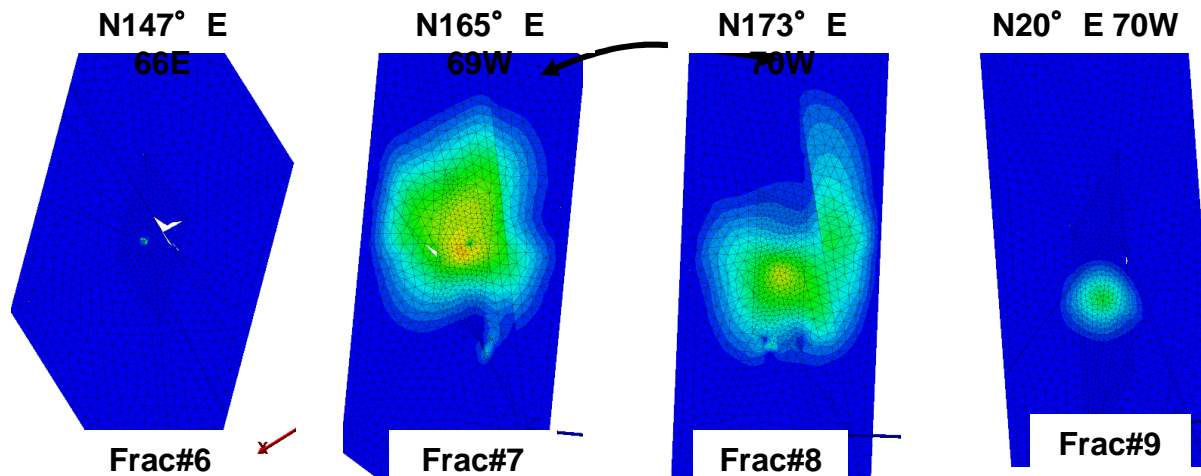
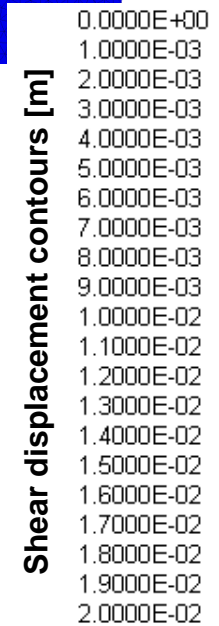
- Mécanique :
- loi de comportement ?
 - modification de la connectivité du réseau ?
- Hydraulique :
- régime écoulement ?

CFMR



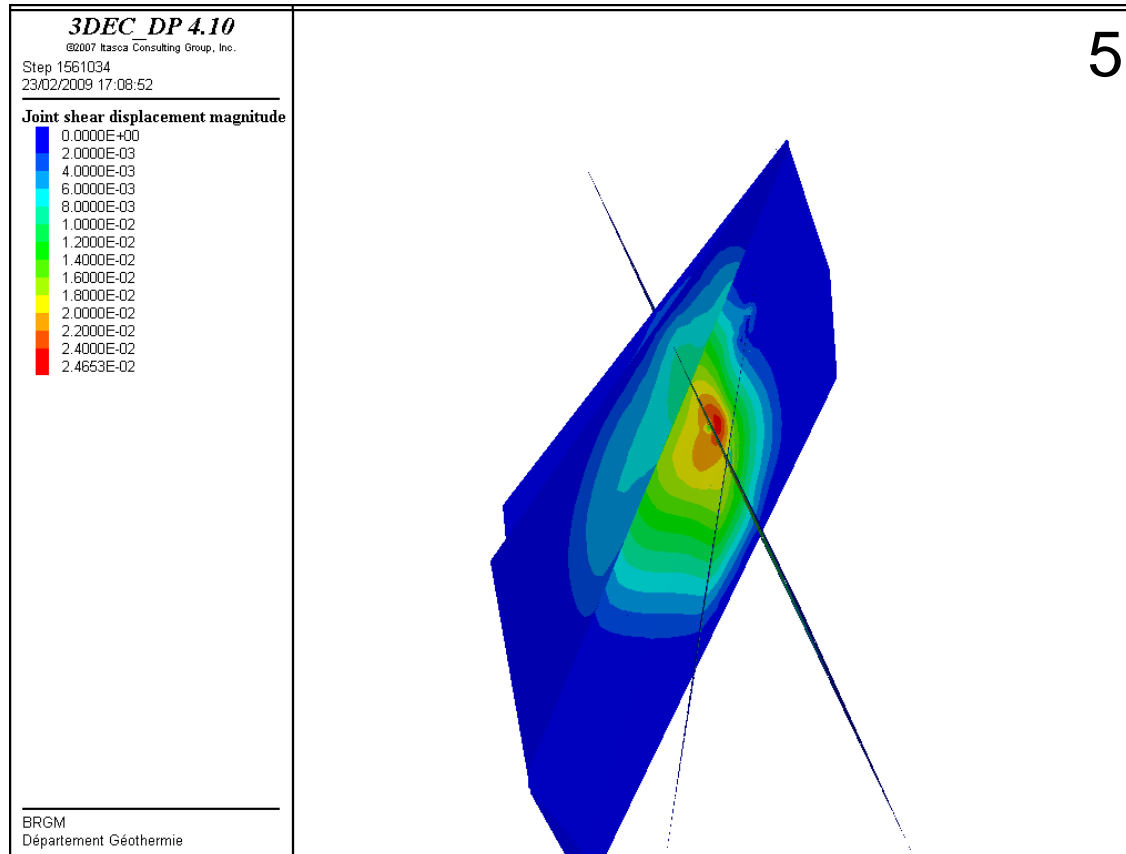


- > La perméabilité n'est pas augmentée dans toutes les zones de faille
- > Dépend des caractéristiques des zones et de l'état de contraintes

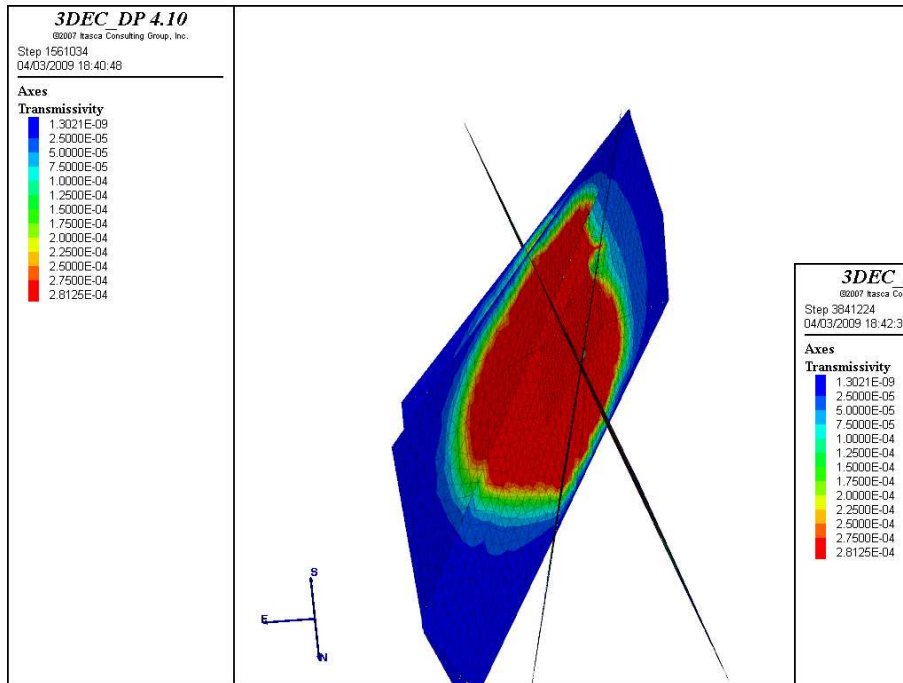


Déplacements tangentiels – GPK4 – Test de stimulation $t \Delta P = 13.75\text{MPa}$

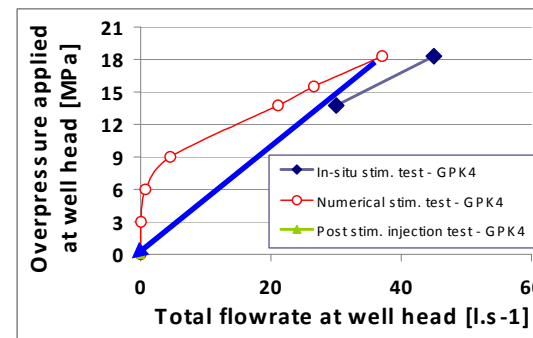
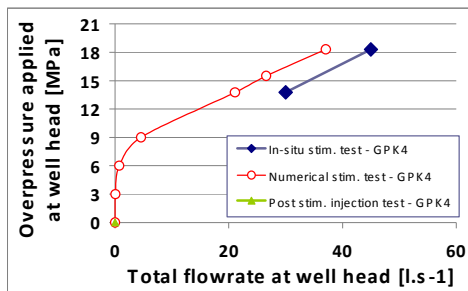
Influence du réseau 3D sur la distribution des déplacements tangentiels dans une zone de faille



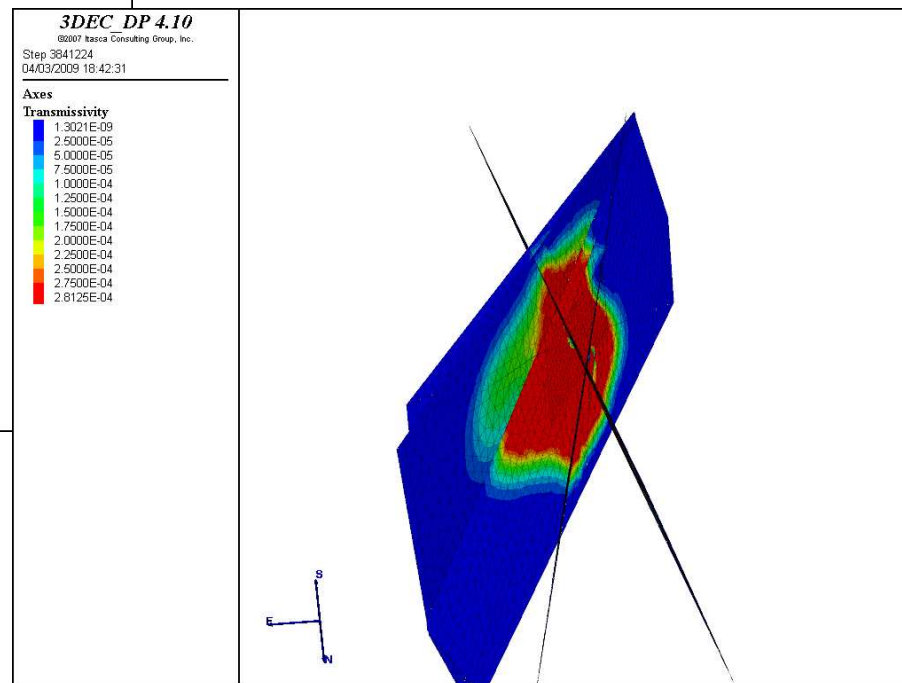
En terme de transmissivité



Fin de la stimulation

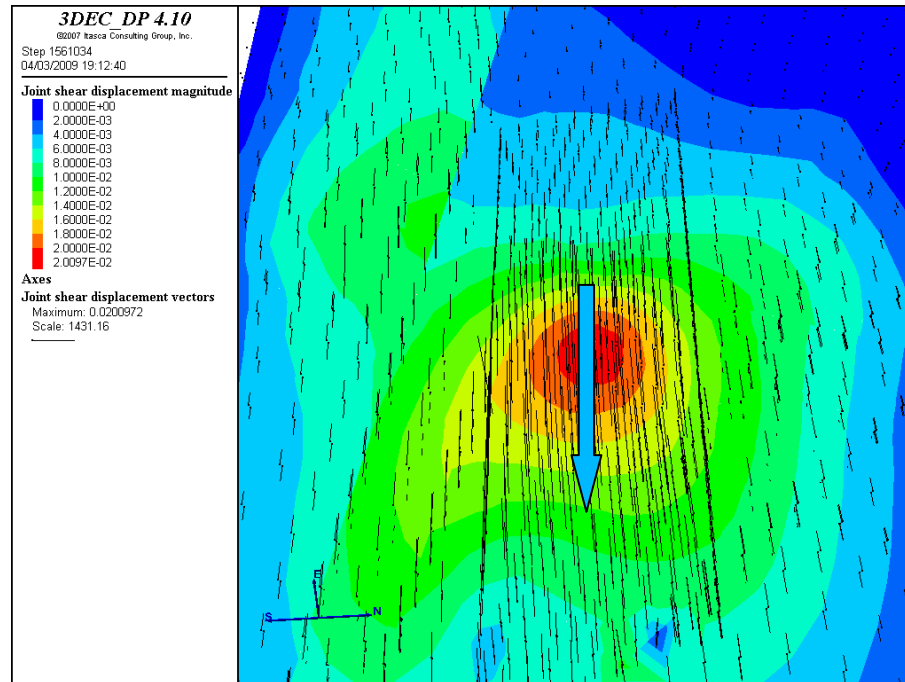
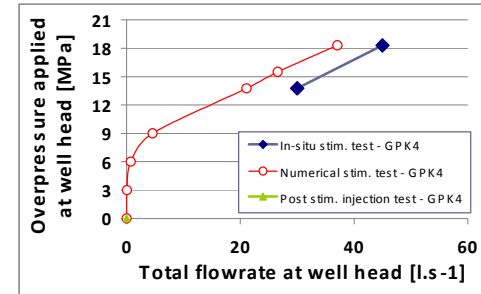


Après la décharge

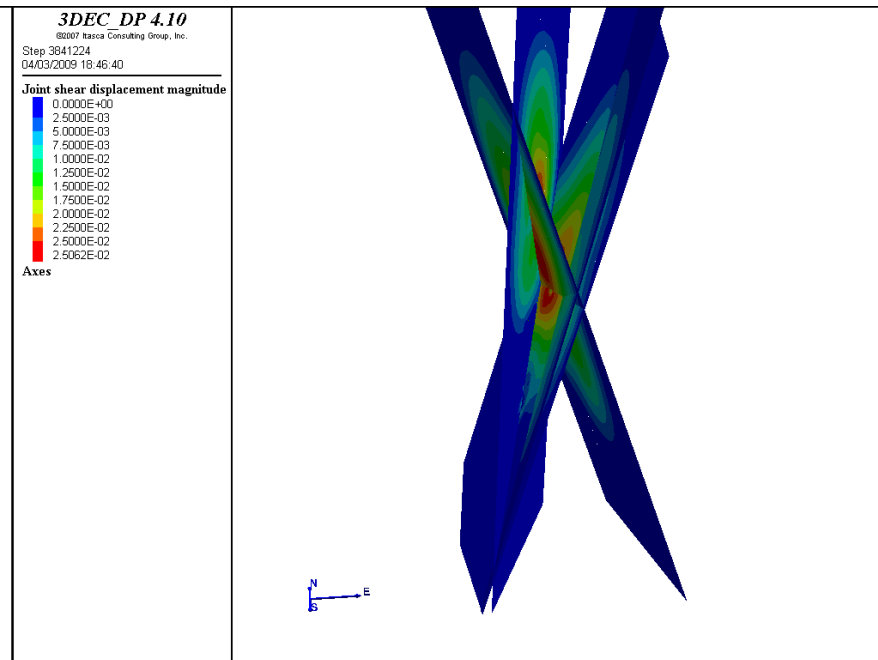
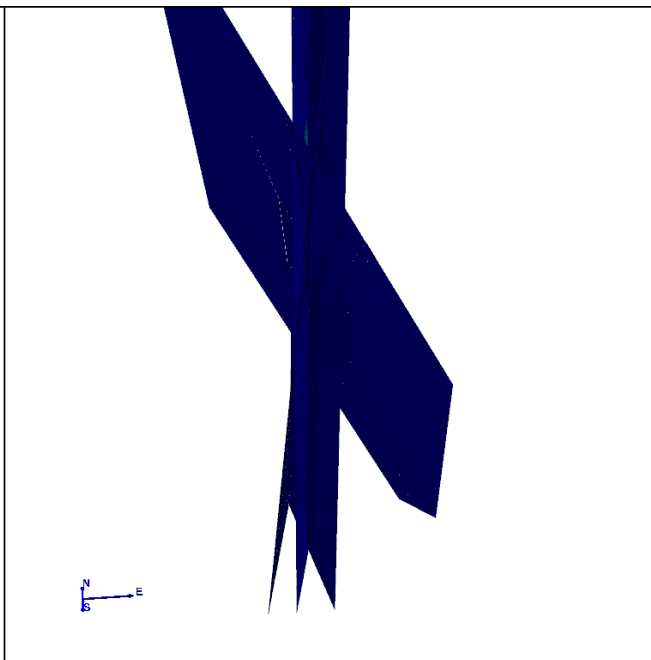
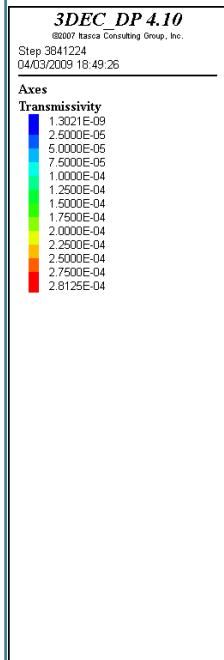
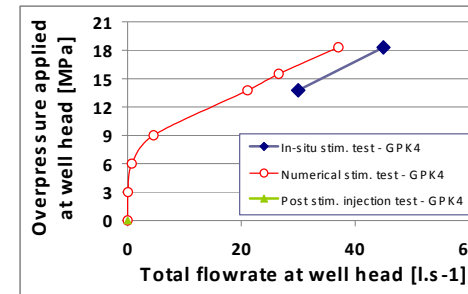


CFMR

En terme de direction de cisaillement



En terme de réseau de failles stimulées

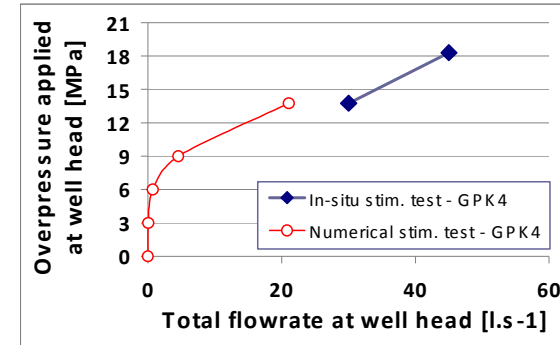
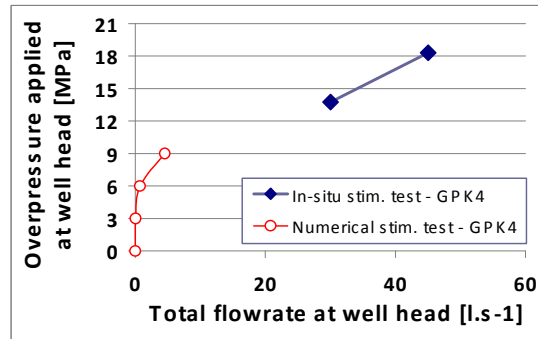


Réseau non stimulé

Réseau initial

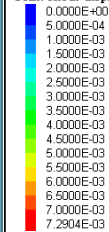
Réseau stimulé

En terme de rupture dans les plans de faille



3DEC DP 4.10
©2007 Itasca Consulting Group, Inc.
Step 1036546
04/03/2009 18:57:06

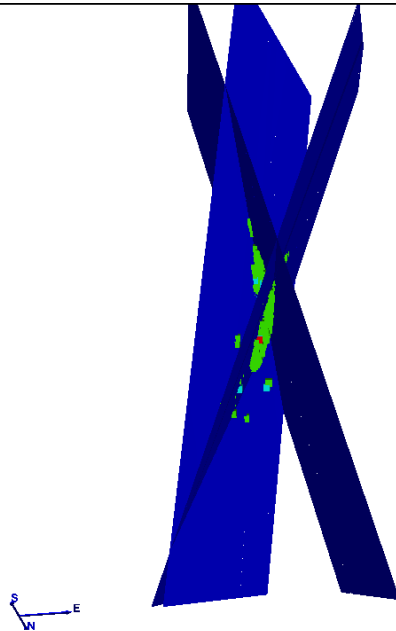
Joint shear displacement magnitude



Axes

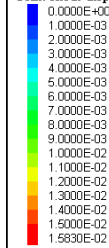
Joint Slip

Symbol: cube
Slipping now
Slipped (past)
Tensile failure



3DEC DP 4.10
©2007 Itasca Consulting Group, Inc.
Step 1313915
04/03/2009 18:59:09

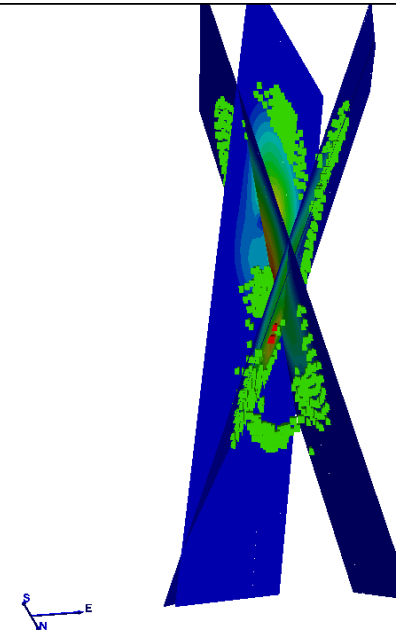
Joint shear displacement magnitude



Axes

Joint Slip

Symbol: cube
Slipping now
Tensile failure



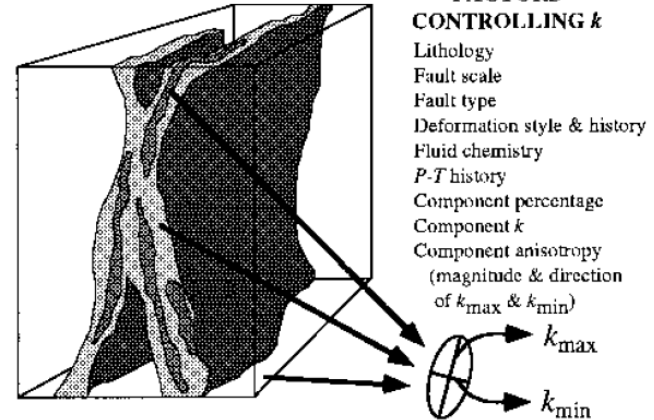
Comment définir les propriétés des zones de faille

> Structures complexes non échantillonnables pour essai en laboratoire : définition d'un modèle conceptuel

- Littérature générale
- Données dans des forages profonds

FAULT ZONE ARCHITECTURAL COMPONENTS

- FAULT CORE
Gouge
Cataclasite
Mylonite
- DAMAGE ZONE
Small faults
Fractures
Veins
Folds
- PROTOLITH
Regional structures



> Simulation d'essais « numériques »

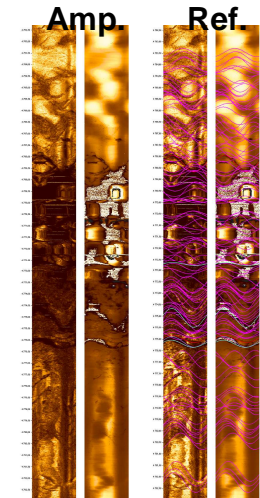
- Essais mécaniques → estimation des propriétés macros
- Etude de sensibilité (orientation des fractures internes, espacement, raideurs, etc.)

> Retour au 2D :

- Difficulté d'élaborer un modèle en 2D
- Isotropie au niveau des propriétés des zones de failles dans modèles numériques

Définition du modèle conceptuel

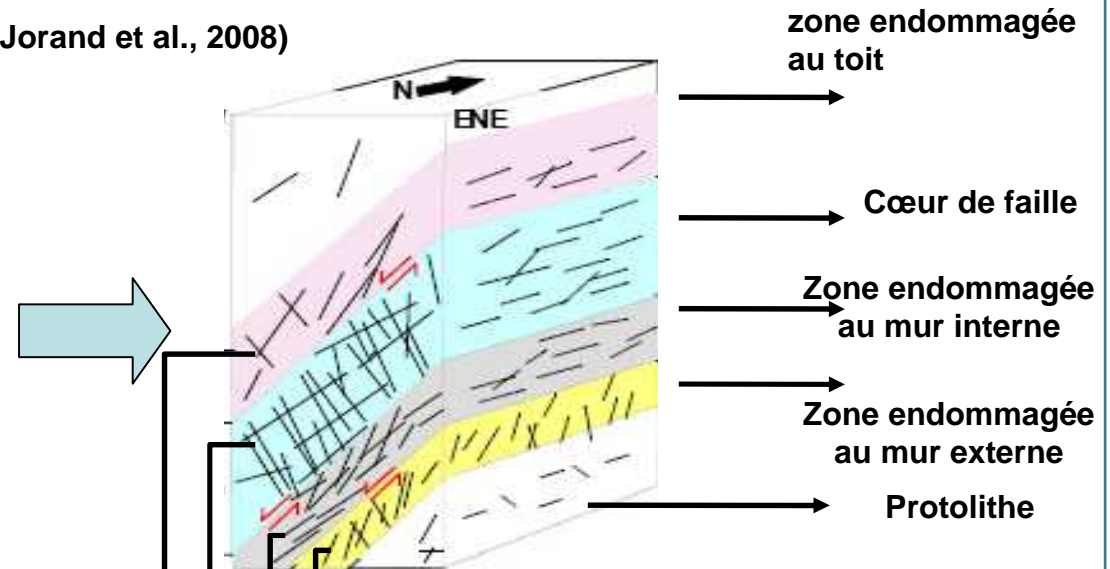
Diagraphies brutes



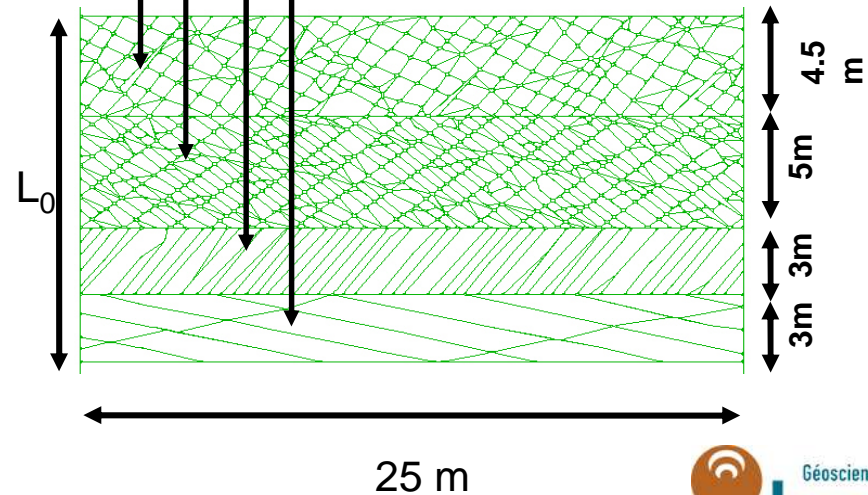
interprétées



(Jorand et al., 2008)



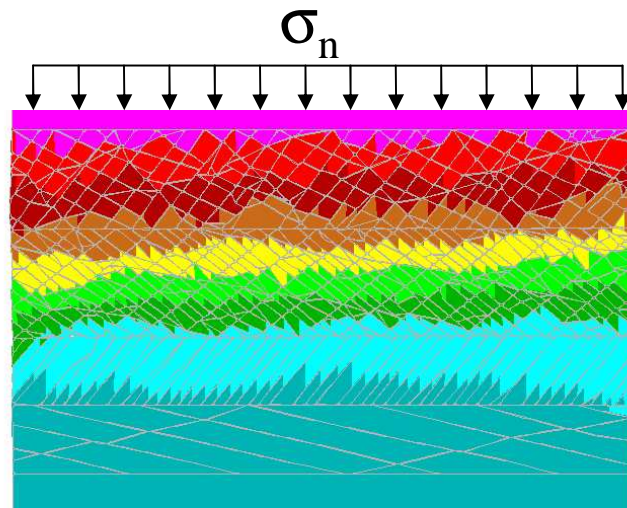
Modèle conceptuel de zone de faille avec 4 familles de fractures



Essais numériques

- > Estimer les prop. macro à partir des prop. des éléments constitutifs

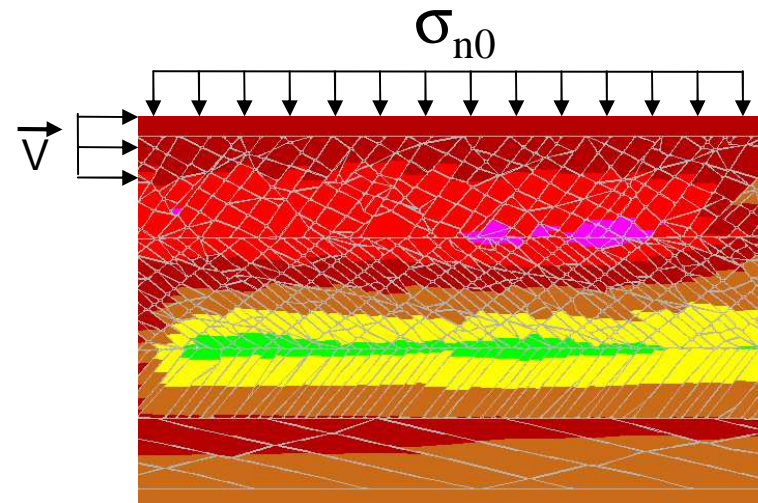
Essai compression normale simple



Contours de déplacements verticaux

→ Rigidité normale
équivalente K_n

Essai de cisaillement

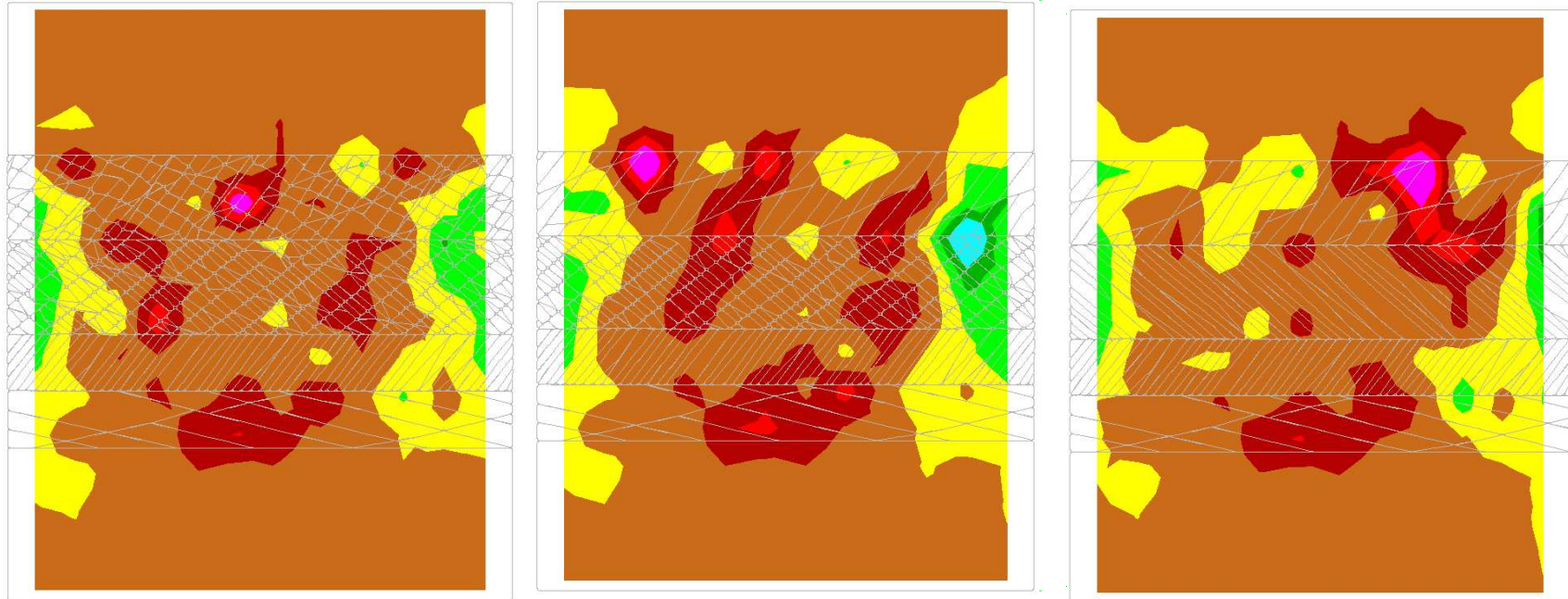


Contours des déplacements horizontaux

→ Rigidité tangentielle
équivalente K_s

- > Etude paramétrique sur cas simples à une ou deux familles de fractures (géométries, propriétés)

Influence de l'organisation interne en terme de densité de fracturation



Contours de déformations verticales – $\sigma_n = 35 \text{ MPa}$

Fract -10%

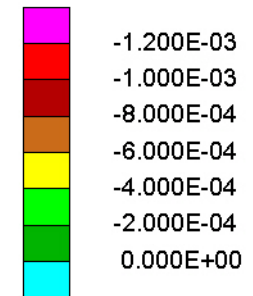
-15%

-25%

K_{n_equiv} +5%

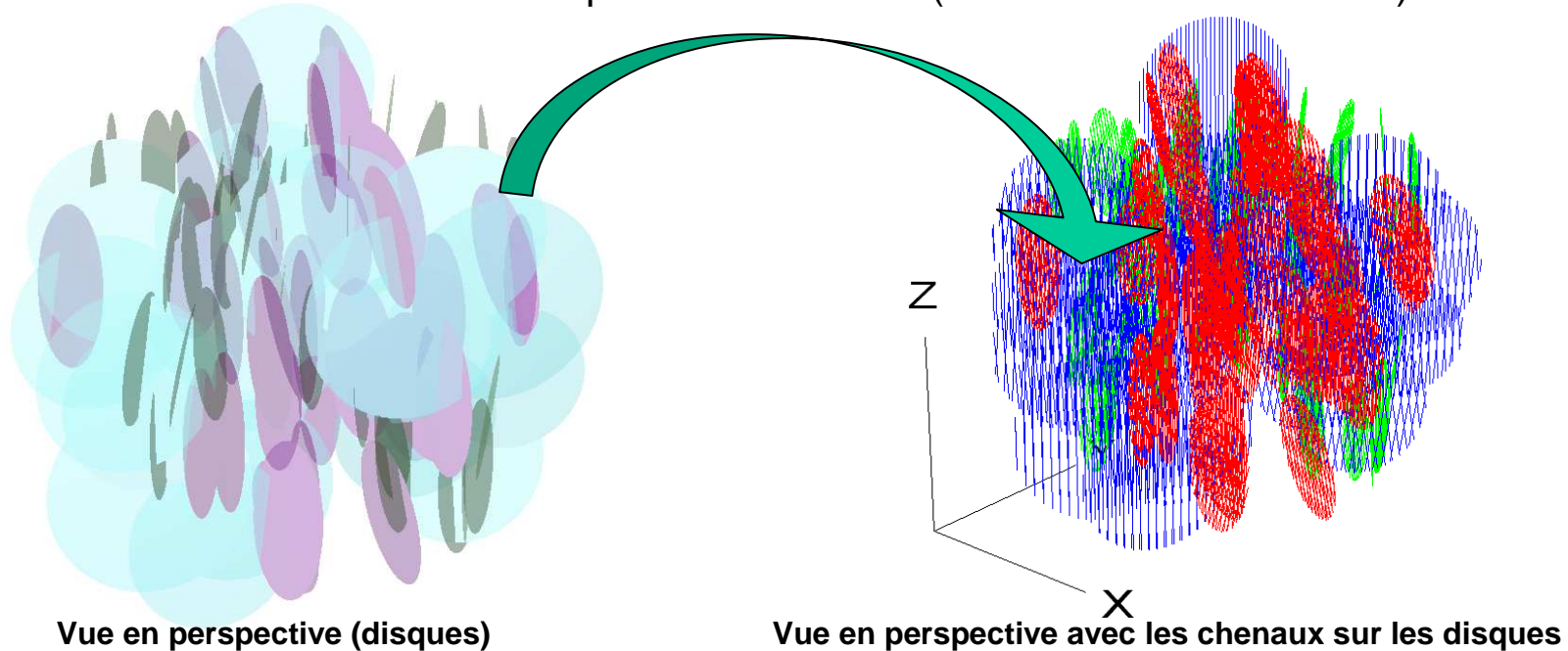
+30%

+80%



Relation avec le modèle hydraulique de l'échangeur et du réservoir

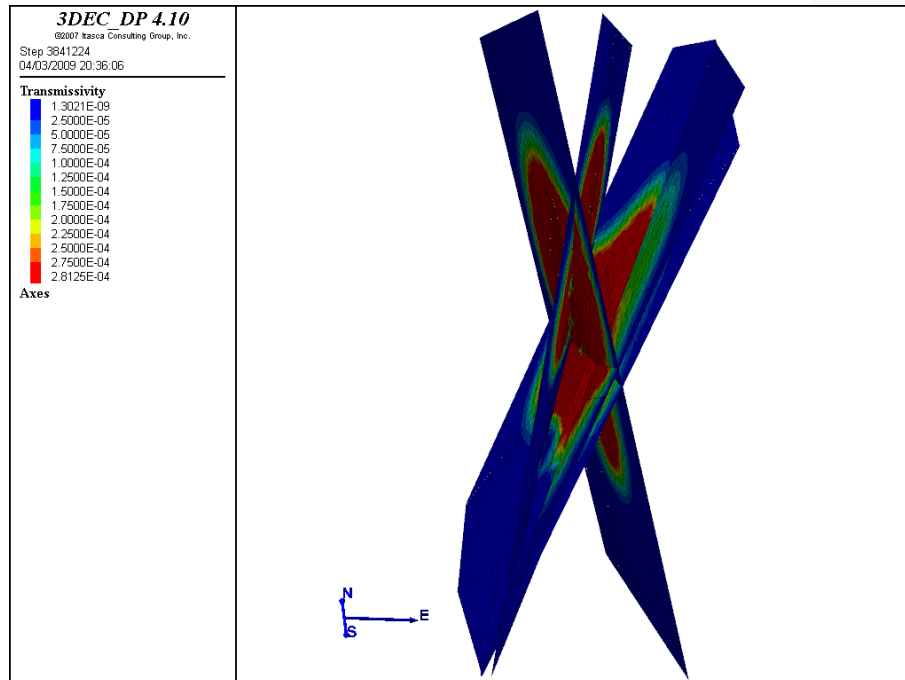
1. Les zones de failles sont introduites de manière déterministe (cf. modèle de stimulation)
2. Fractures sont générées selon une loi statistique définie à partir des données de forages
Ecoulement est chenalisé dans les plans de fractures (chenaux = éléments 1D)



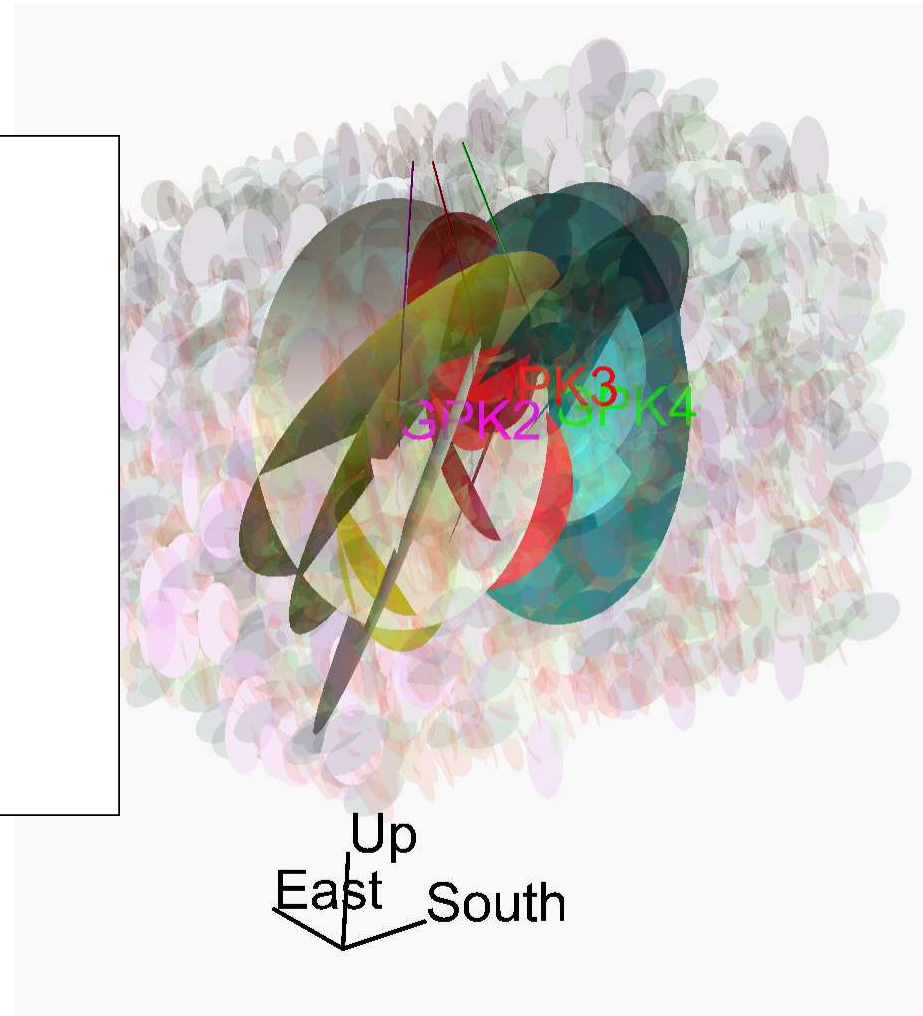
Anisotropie peut être introduite dans les fractures :

cf. direction de cisaillement liée à la stimulation

Modification des propriétés du réseau de failles déterministes



(T)HM



Modification de certains paramètres dans le modèle hydraulique

