

Modélisation multi-échelle des transferts en milieux fracturés: application au site d'Äspö (Suède)

A. FOURNO

F. Delay (HYDRASA)

C. Grenier (CEA)

H. Benabderrahmane (ANDRA)

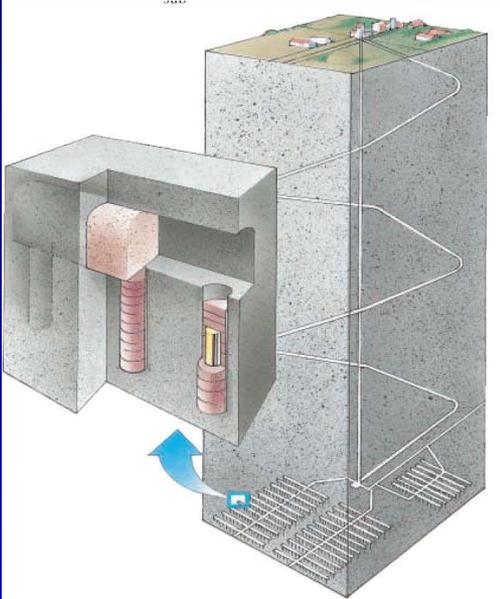


Plan de la présentation

- ✿ Pourquoi étudier les milieux fracturés ?
Qu'est ce qu'un milieu fracturé ?
- ✿ A quels phénomènes physiques s'intéresse t'on ?
Quels sont les modèles associés ?
Quel rôle joue la diffusion matricielle ?
- ✿ Comment sont modélisés les transferts dans ces milieux ?
Quels sont les principes d'une approche Smearred Fractures ?
Comment sont déterminées les propriétés équivalentes ?
- ✿ Comment l'a t'on validée ?
- ✿ Application au site de Äspö

Pourquoi étudier les milieux fracturés ?

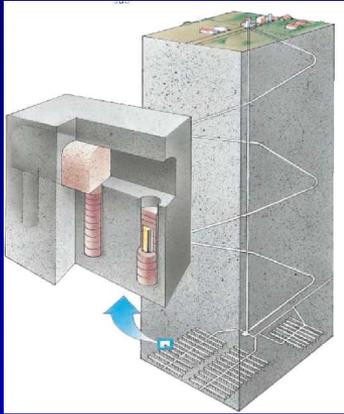
Stockage des déchets nucléaires



Principe : déchets entreposés
en profondeur

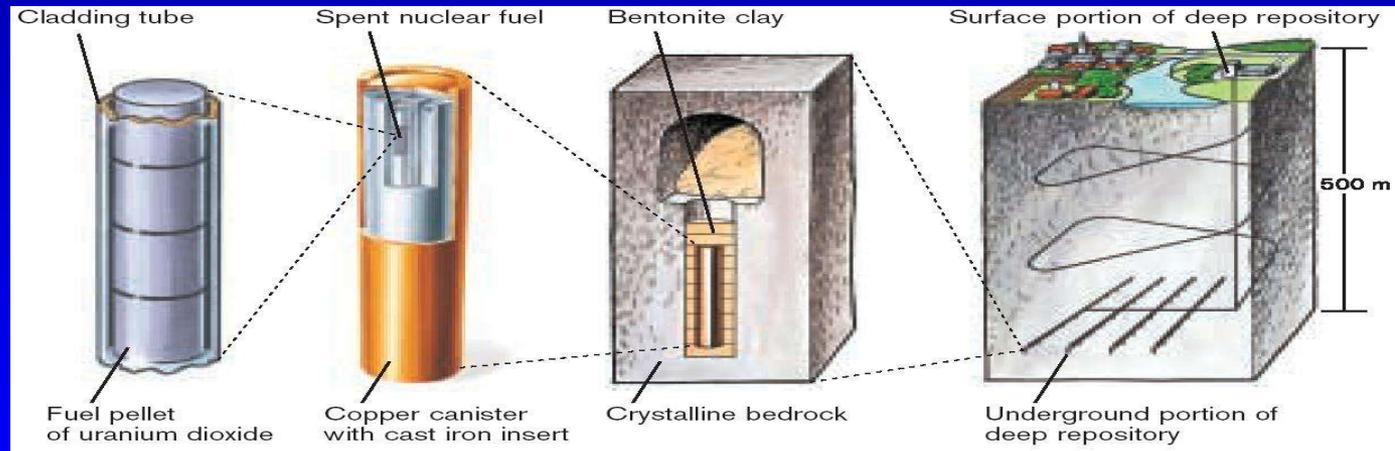
Pourquoi étudier les milieux fracturés ?

Stockage des déchets nucléaires

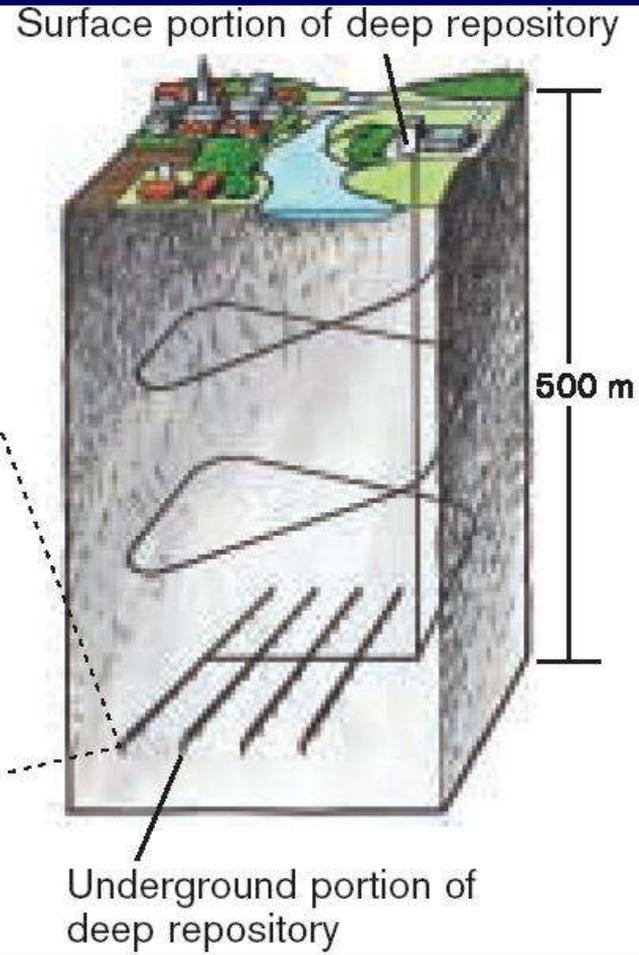


Principe : déchets entreposés en profondeur

Barrières : colis, barrière ouvragée, barrière géologique



Pourquoi étudier les milieux fracturés ?

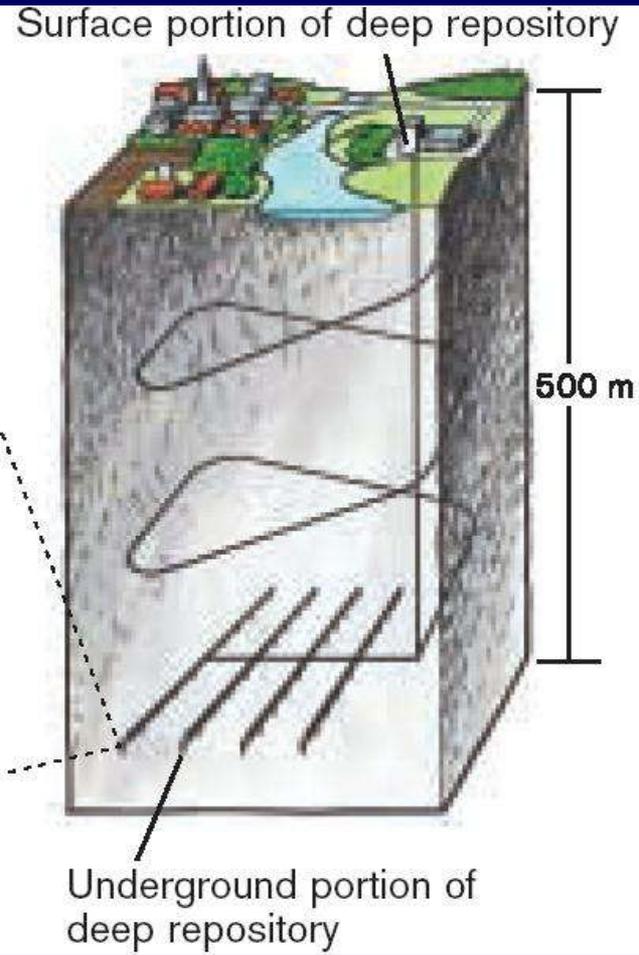


Barrière géologique :

argile : milieu sédimentaire

granite : milieu cristallin

Pourquoi étudier les milieux fracturés ?



Barrière géologique : (argile)

granite

Quelques spécificité :

- Milieu fracturé
- Ecoulements lents

Qu'est ce qu'un milieu fracturé ?

Milieus fracturés = milieux hétérogènes complexes :

→ Géométries complexes

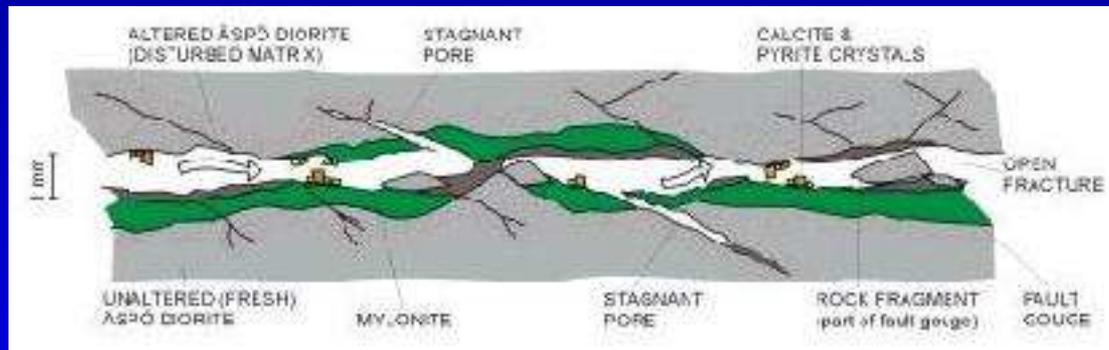


Granite corse :
GR20 après le
cirque de la solitude

Qu'est ce qu'un milieu fracturé ?

Milieus fracturés = milieux hétérogènes complexe :

- Géométries complexe
- Différents types de fracturation
- Forts contrastes de propriétés entre les zones fracturées et la matrice



- Incertitudes sur les propriétés physiques et la localisation des fractures

Plan de la présentation

- ✿ Pourquoi étudier les milieux fracturés ?
Qu'est ce qu'un milieu fracturé ?
- ✿ A quels phénomènes physiques s'intéresse t'on ?
Quels sont les modèles associés ?
Quel rôle joue la diffusion matricielle ?
- ✿ Comment sont modélisés les transferts dans ces milieux ?
Quels sont les principes d'une approche Smeared Fractures ?
Comment sont déterminées les propriétés équivalentes ?
- ✿ Comment l'a t'on validée ?
- ✿ Application au site de Äspö

A quels phénomènes physiques s'intéresse-t-on ?

Écoulement : équation de Darcy
conservation de la masse

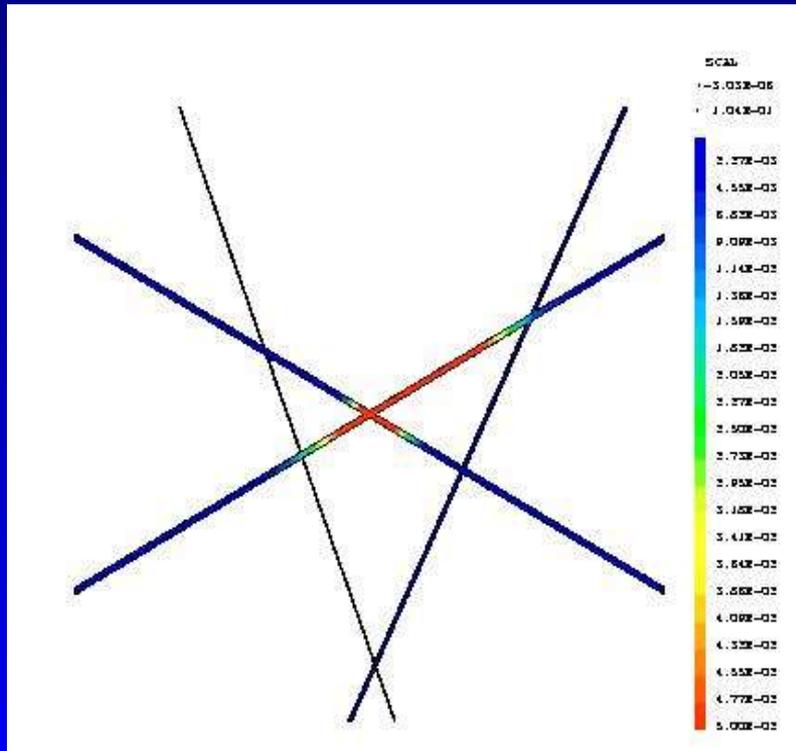
Transport :

- ✿ Dans les fractures (phénomènes rapides) :
Advection/dispersion

A quels phénomènes physiques s'intéresse t'on ?

Animation 1

Convection/Dispersion dans la fracture



Concentration à un temps t

A quels phénomènes physiques s'intéresse t'on ?

Ecoulement : équation de Darcy
conservation de la masse

Transport :

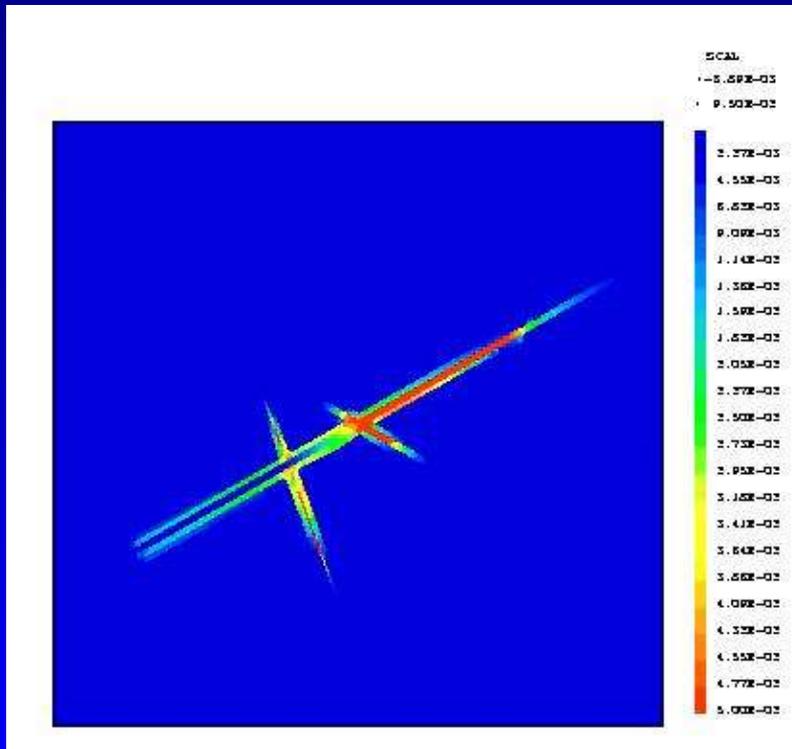
- ✿ Dans les fractures (phénomènes rapides)
Advection/dispersion
- ✿ Dans la matrice (phénomènes de Rétention : lents)
Diffusion matricielle
Autres : absorption, réactions chimiques ...

A quels phénomènes physiques s'intéresse t'on ?

Animation 2

Convection/dispersion dans les fractures

Diffusion dans la matrice



Concentration à un temps t

Quels sont les modèles physiques associés ?

Ecoulement :

$$\vec{q} = -\bar{K} \cdot \vec{\nabla} h$$

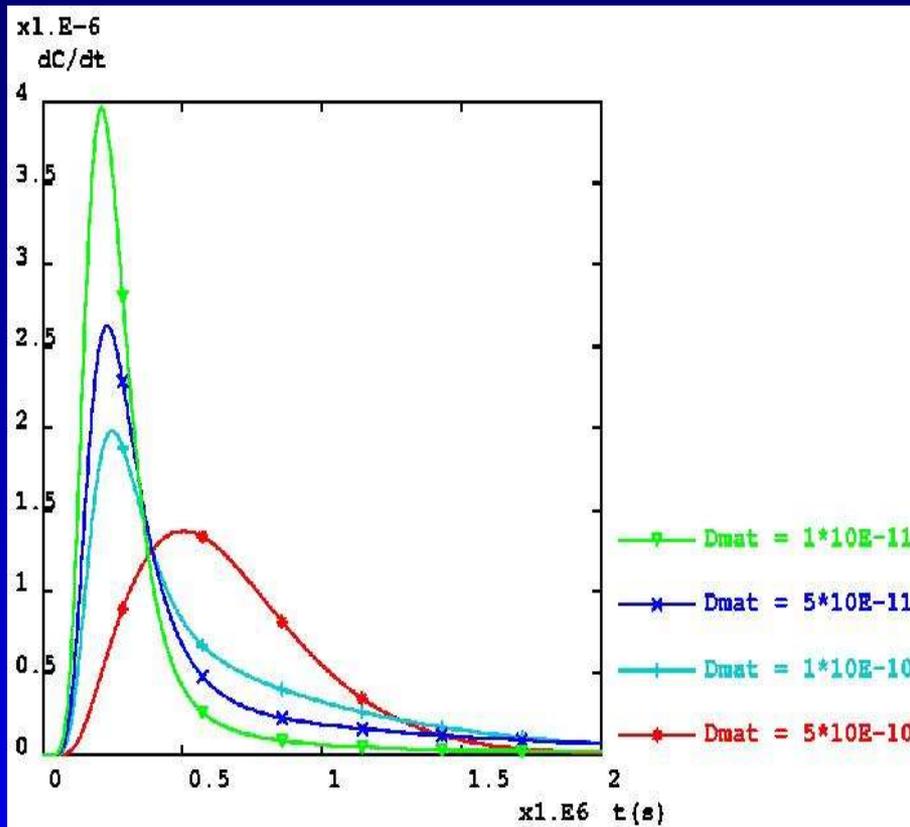
$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{q}) = s$$

Transport (Eulérien):

$$\omega \cdot R \cdot \frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (\omega \cdot \bar{D} \cdot \vec{\nabla} C - C \cdot \vec{q})$$

Quels rôle joue la diffusion matricielle ?

Etude numérique



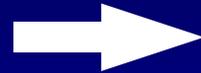
Influence :

- ✿ Le maximum des flux
- ✿ Le temps d'arrivée du pic
- ✿ La queue des courbes

Quels rôle joue la diffusion matricielle ?

Etude analytique

Solution (Neretnieks) :
injection continue,
matrice infinie



Temps d'arrivée du pic
de concentration :

$$\tau_{max} = R_p \cdot \tau_w$$

$$R_p = R_a + \frac{2}{3} \frac{\omega_m^2 \cdot d \cdot R_d}{\omega_{fr}^2 \cdot e^2} \tau_w$$

Fracture :

$$L_{fr} = 230 \text{ m} \quad e_{fr} = 6 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

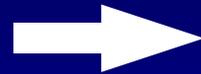
$$T_{fr} = 1.26 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad \omega_{fr} = 1$$

$$\tau_w = \frac{L_{fr} \cdot e_{fr}}{T_{fr} \cdot \nabla h} = 72 \text{ ans}$$

Quels rôle joue la diffusion matricielle ?

Etude analytique

Solution (Neretnieks) :
injection continue,
matrice infinie



Temps d'arrivée du pic
de concentration :

$$\tau_{max} = R_p \cdot \tau_w$$

$$R_p = R_a + \frac{2}{3} \frac{\omega_m^2 \cdot d \cdot R_d}{\omega_{fr}^2 \cdot e^2} \tau_w$$

Fracture : $L_{fr} = 230 \text{ m}$ $e_{fr} = 6.10^{-4} \text{ m}$
 $T_{fr} = 1.26.10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$ $\omega_{fr} = 1$ $\Rightarrow \tau_w = \frac{L_{fr} \cdot e_{fr}}{T_{fr} \cdot \nabla h} = 72 \text{ ans}$

Fracture : $T_{fr} = 1.26.10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$ $\omega_{fr} = 0.21$
 Matrice : $d = 5.10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ $\omega_m = 6.10^{-3}$ $\Rightarrow \tau_s = R_p \cdot \tau_w = 522 \text{ ans}$

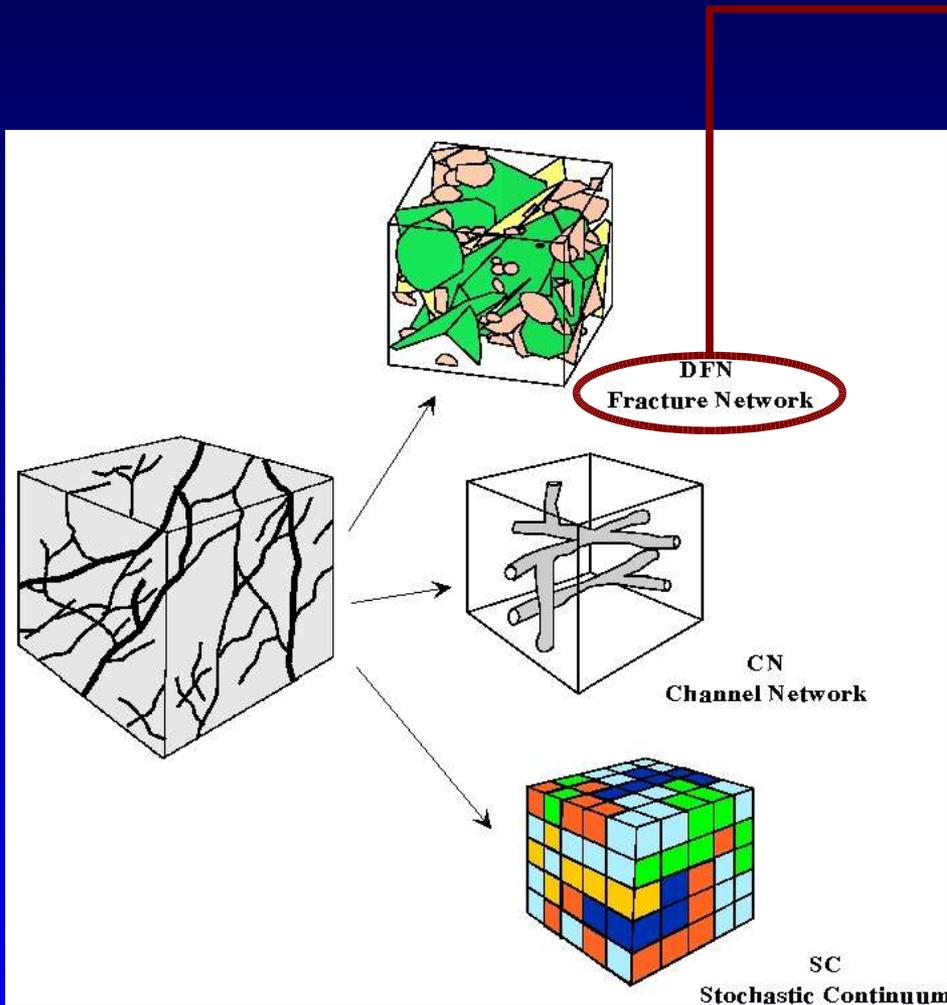
Définition du problème

- ✿ Objectif : modéliser l'écoulement et le transport dans les milieux fracturés
- ✿ Conditions naturels : **écoulements lents**
⇒ diffusion matricielle importante
- ✿ Modéliser les fractures et la matrice

Plan de la présentation

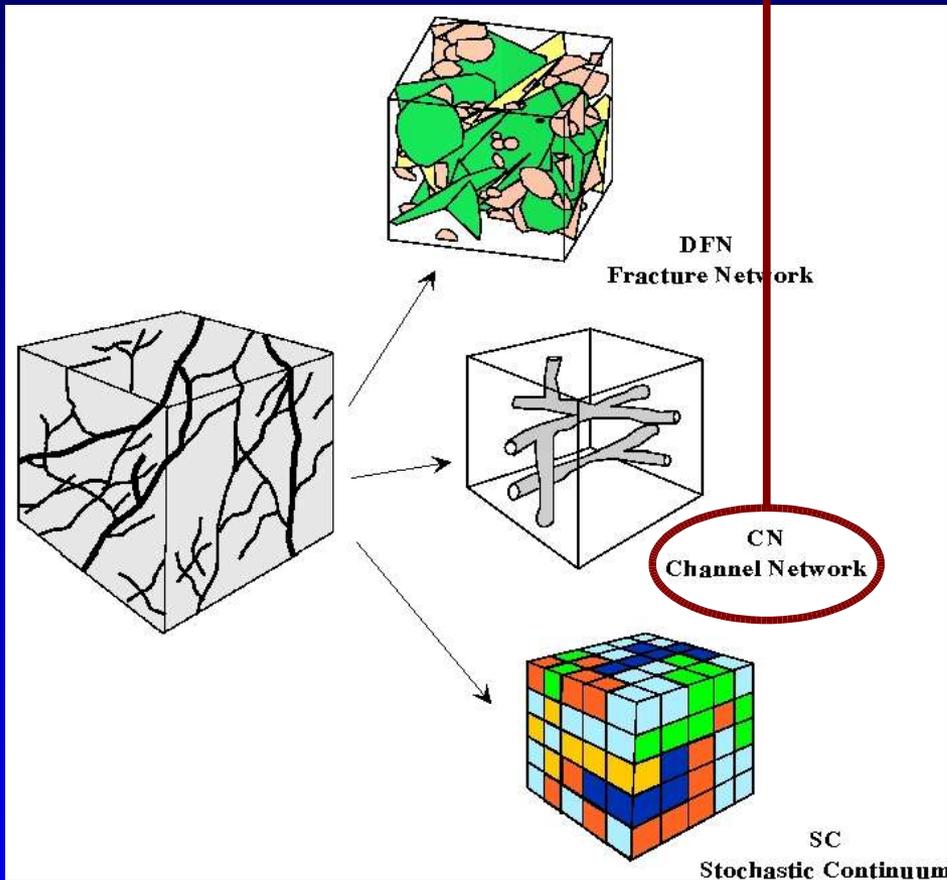
- ✿ Pourquoi étudier les milieux fracturés ?
Qu'est ce qu'un milieu fracturé ?
- ✿ A quels phénomènes physiques s'intéresse t'on ?
Quels sont les modèles associés ?
Quel rôle joue la diffusion matricielle ?
- ✿ Comment sont modélisés les transferts dans ces milieux ?
Quels sont les principes d'une approche Smearred Fractures ?
Comment sont déterminées les propriétés équivalentes ?
- ✿ Comment l'a t'on validée ?
- ✿ Application au site de Äspö

Comment sont modélisés les transferts dans ces milieux ?



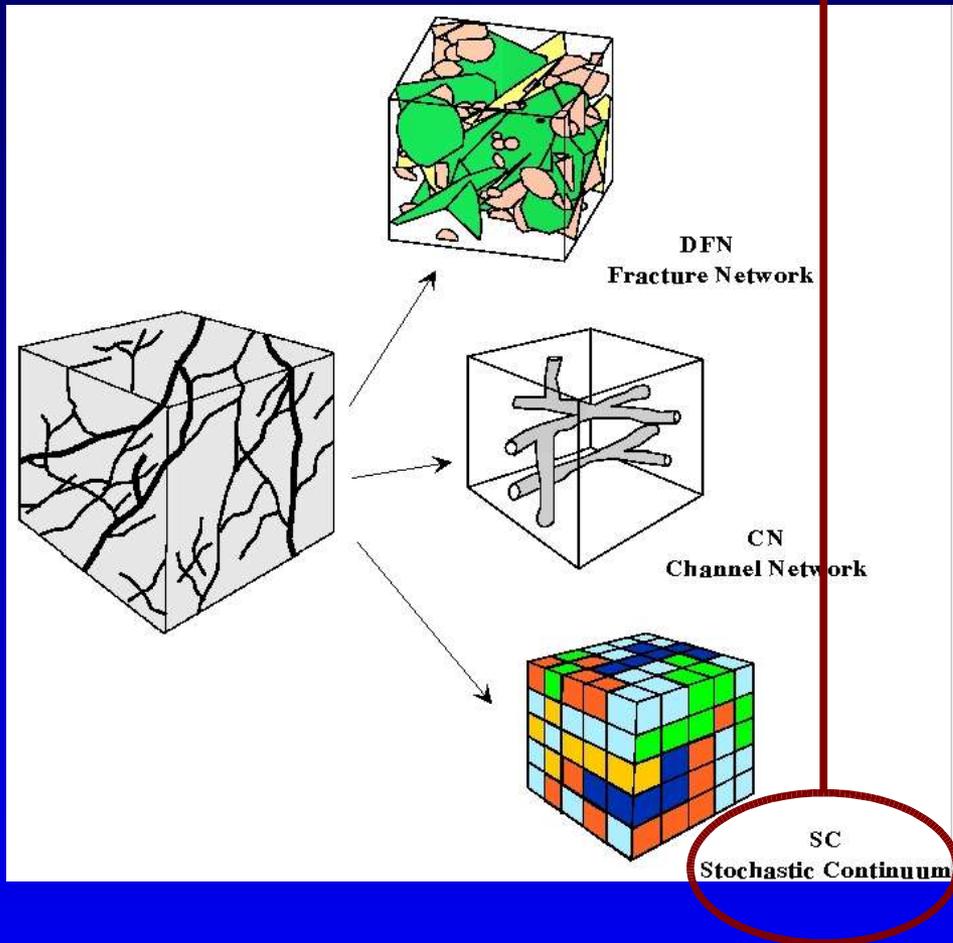
- ✿ Modèles 'Discret Fracture Network'
- ✿ Les fractures sont représenté de manière discrète
- ✿ Dershowitz
- ✿ Couteux

Comment sont modélisés les transferts dans ces milieux ?



- ❁ Modèles 'Chenal Network'
- ❁ Les fractures sont représentées par différents chenaux
- ❁ Moreno, Cacas
- ❁ En condition naturelle l'écoulement n'est peut être pas chenalisé

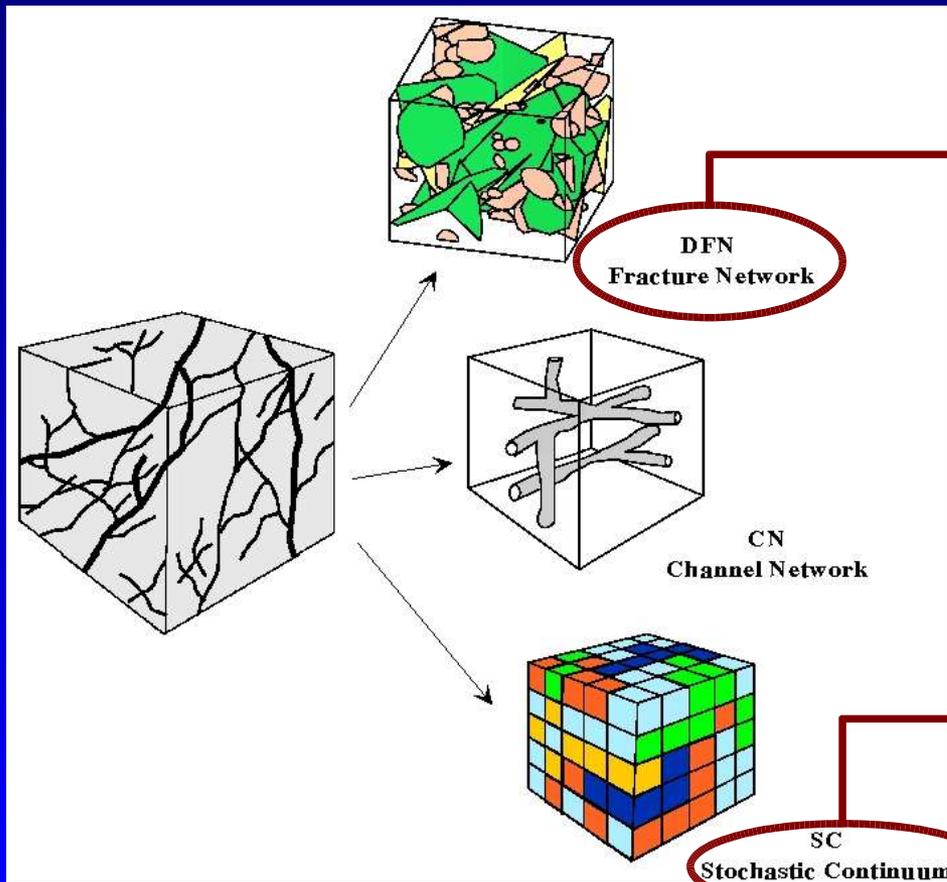
Comment sont modélisés les transferts dans ces milieux ?



- ❁ Modèles 'Stochastic Continuum'
- ❁ Les fractures sont décrites en termes de paramètres physiques répartis suivant des fonctions aléatoires
- ❁
- ❁ La géométrie discrète du réseau n'est pas respectée

Quels sont les principes d'une approche Smeared Fractures ?

Représenter les fractures par des champs hétérogènes de propriétés sur un maillage régulier



Représentation discrètes des fractures principales

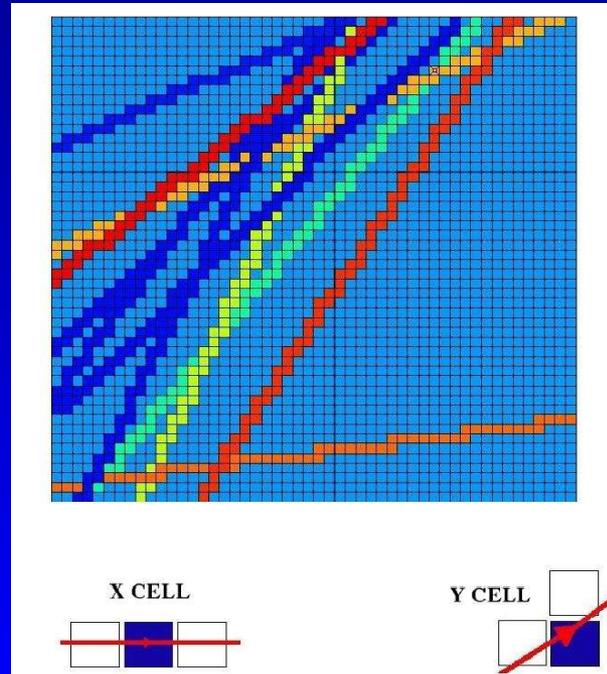
Smeared Fractures

Les fractures sont définis en terme de paramètres physiques

Approche Smearred Fractures : points forts points faibles

Avantages

- ✿ pas de problème de maillage
- ✿ blocs matriciels modélisés
- ✿ faibles coûts informatiques



Contraintes

- ✿ déterminer des propriétés équivalentes
- ✿ choix de la discrétisation

Approche Smearred Fractures : avant après

- ✿ Svensson 2001, Tannaka 1996, Gomez-Hernandez 1999

- ✿ Éléments finis

- ✿ Écoulement permanent

- ✿ Propriétés équivalentes : rapport de volumes

- ✿ Mon approche

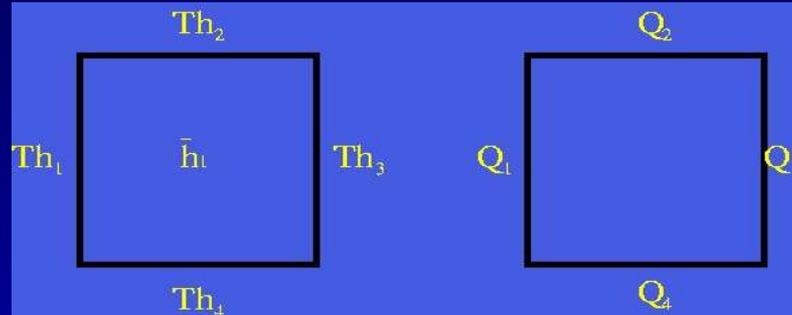
- ✿ Éléments finis mixtes hybrides (CAST3M)

- ✿ Écoulement et transport (2D&3D)

- ✿ Propriétés équivalentes : contraintes de conservation du flux

Comment sont déterminées les propriétés équivalentes ?

Shéma EFMH



Le flux en EFMH

$$Q_i^\omega = \bar{h}_\omega \left(\sum_j M_{ij}^{\omega^{-1}} \right) - \sum_j \left(M_{ij}^{\omega^{-1}} \cdot Th_j^{\omega^{-1}} \right) \quad i=1..4$$

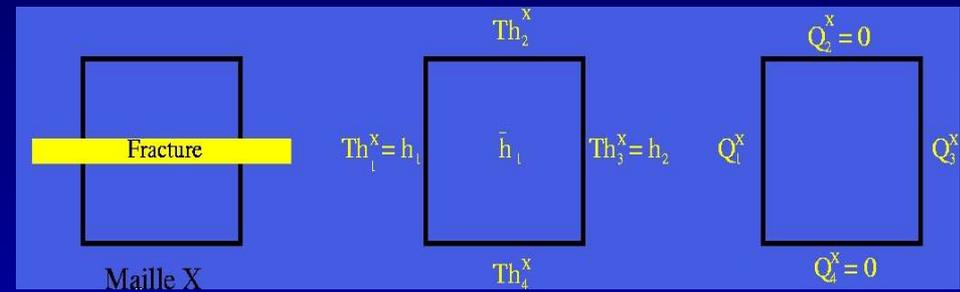
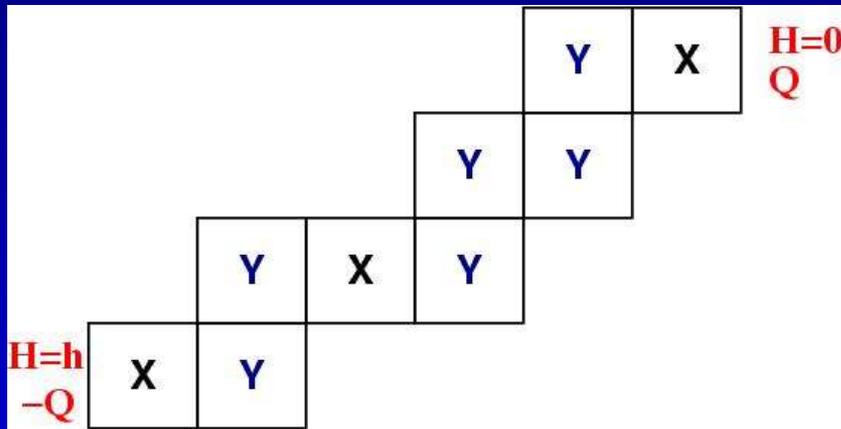
Pour des mailles carrés

$$\bar{h}_\omega = \frac{\sum_i (Th_i)}{4} \quad M^{\omega^{-1}} = K \begin{matrix} 4 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 4 & 0 & 2 \\ 2 & 0 & 4 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 4 \end{matrix}$$

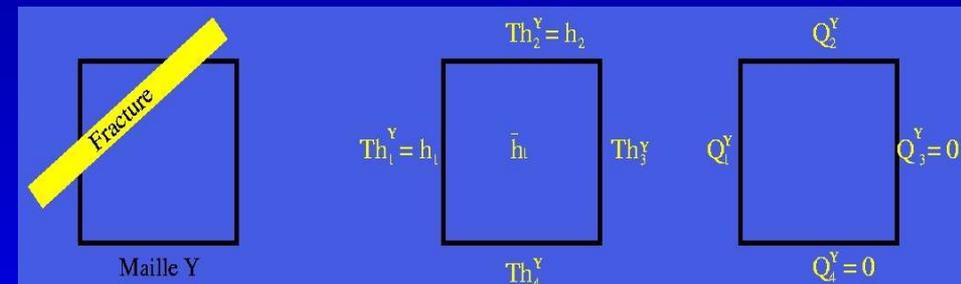
Comment sont déterminées les propriétés équivalentes ?

Expression du flux

Flux numérique pour une fracture unique



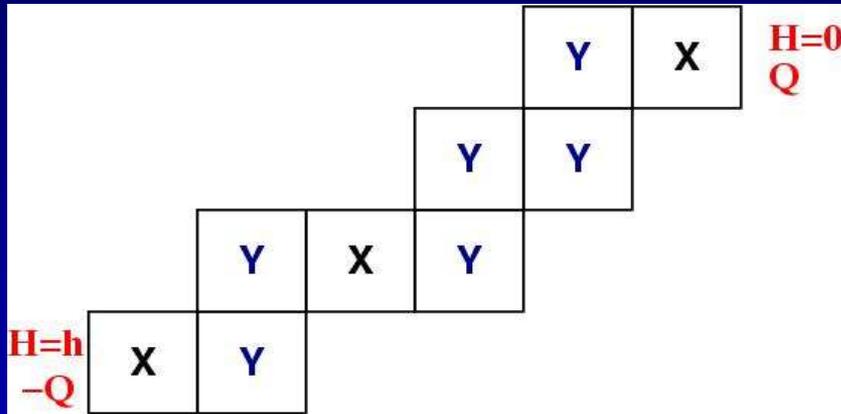
$$Q_1^1 = -Q_3^1 = -K \Delta h$$



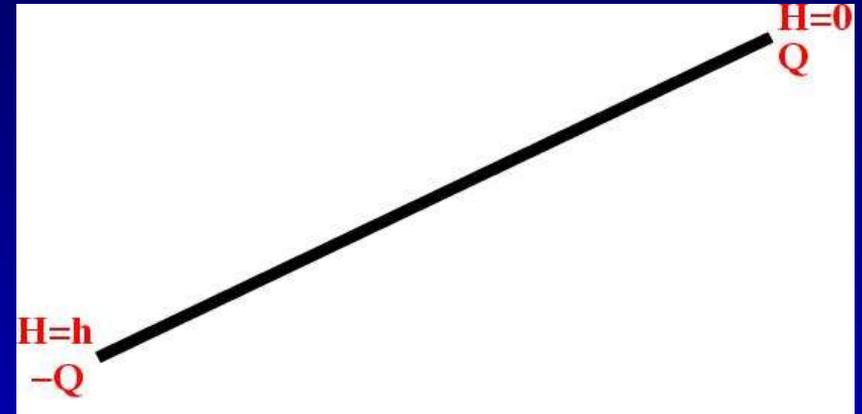
$$Q_1^1 = -Q_2^1 = \frac{-3}{2} K \Delta h$$

Comment sont déterminées les propriétés équivalentes ?

Expression du flux



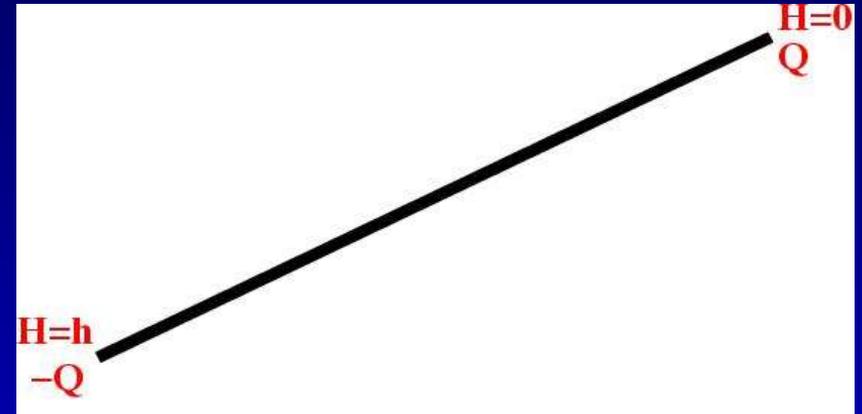
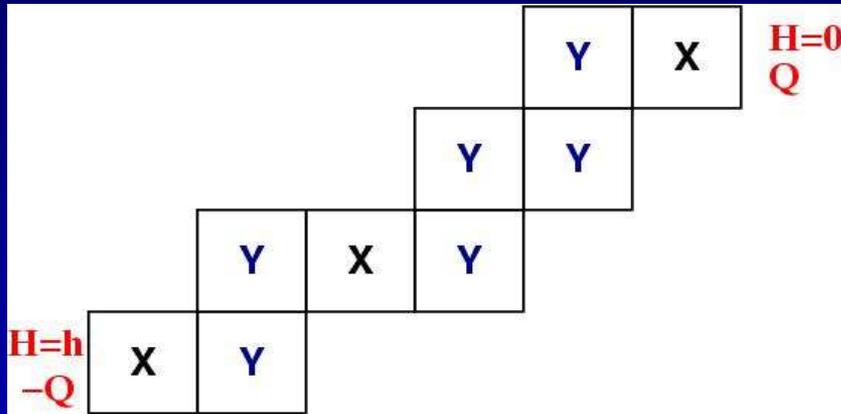
$$Q_{sf} = K_{sf} \frac{\Delta h}{\left(\frac{3N_X + 2N_Y}{3} \right)}$$



$$Q_r = K_r e \frac{\Delta h}{L_r}$$

Comment sont déterminées les propriétés équivalentes ?

Expression du flux



$$Q_{sf} = K_{sf} \frac{\Delta h}{\left(\frac{3N_X + 2N_Y}{3}\right)}$$

$$Q_r = K_r e \frac{\Delta h}{L_r}$$

$$K_{sf} = \frac{(3 \cdot N_X + 2 \cdot N_Y) e}{3 \cdot L_r} \cdot K_r$$

Comment sont déterminées les propriétés équivalentes ?

	Conservation du	Propriétés équivalentes
Perméabilité	Flux d'eau	$K_{sf} = \frac{(3.N_x + 2.N_y)e}{3.L_r} \cdot K_r$
Dispersion	Flux massique	$D_{sf} = \frac{(3.N_x + 2.N_y)e}{3.L_r} \cdot D_r$
Porosité	Masse	$\omega_{sf} = \frac{V_{fr}^r}{V_{fr}^{sf}} \cdot \omega_r$

Comment sont déterminées les propriétés équivalentes ?

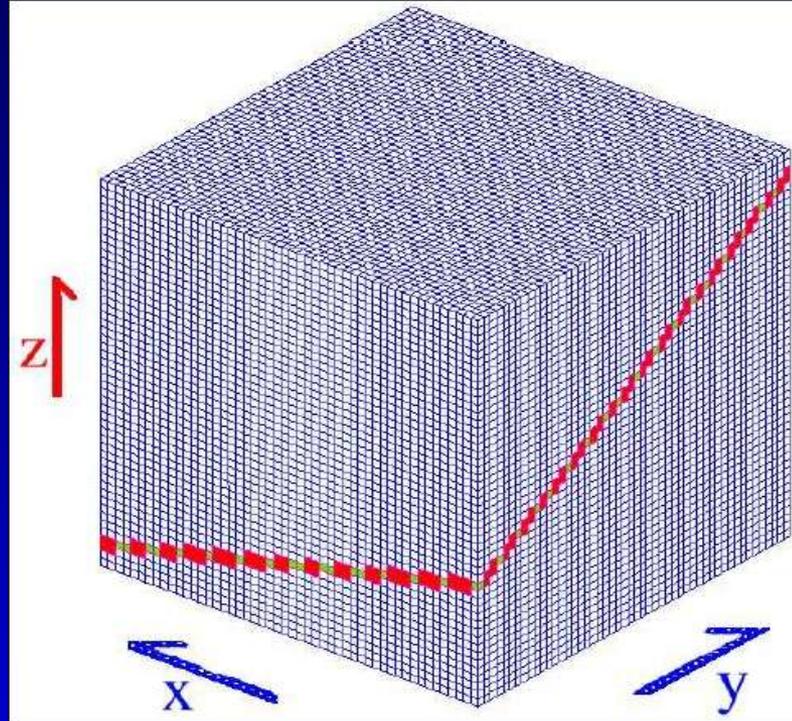
Tenseur de perméabilité 3D

- Flux exact :

$$\vec{x} \rightarrow K_1$$

- Connexion des mailles : \vec{z}

$$\bar{K} = \begin{pmatrix} K_1 & 0 & 0 \\ 0 & K_2 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \end{pmatrix}$$



- Flux exact :

$$\vec{y} \rightarrow K_2$$

- 2 Types de mailles

Par exemple

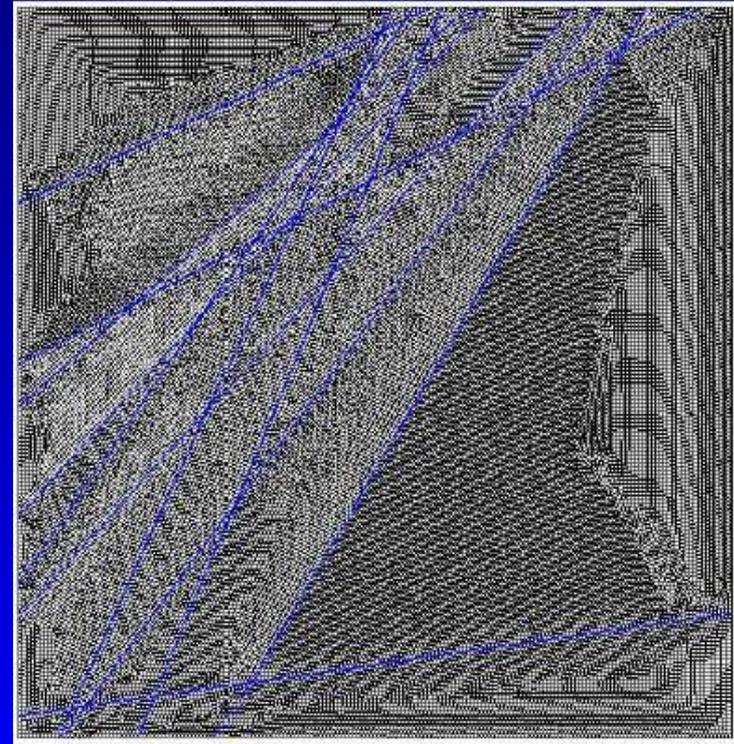
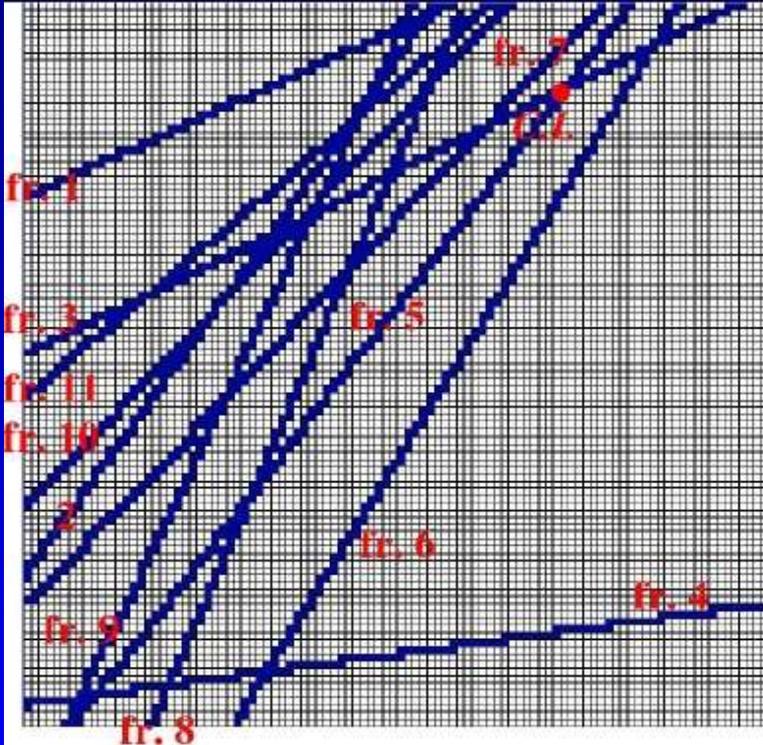
$$K_1^{sf, y} = \frac{e \cos \theta}{\Delta \cos \beta} \frac{\left(1 + \frac{1 \tan \theta}{3 \tan \beta}\right)}{\left(2 - \frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \beta}\right)} K^r$$

Plan de la présentation

- ✿ Pourquoi étudier les milieux fracturés ?
Qu'est ce qu'un milieu fracturé ?
- ✿ A quels phénomènes physiques s'intéresse t'on ?
Quels sont les modèles associés ?
Quel rôle joue la diffusion matricielle ?
- ✿ Comment sont modélisés les transferts dans ces milieux ?
Quels sont les principes d'une approche Smearred Fractures ?
Comment sont déterminées les propriétés équivalentes ?
- ✿ Comment l'a t'on validée ?
- ✿ Application au site de Äspö

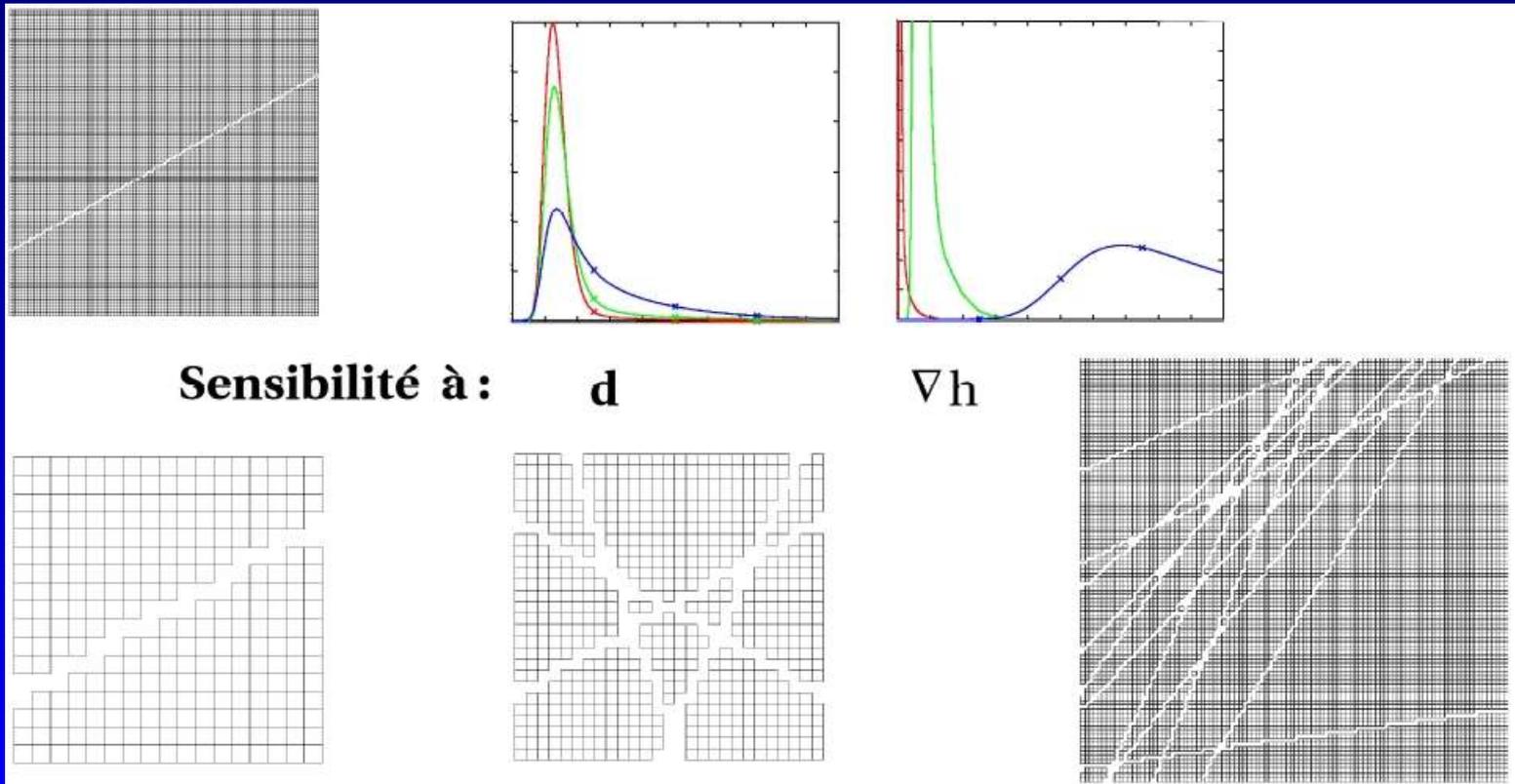
Comment l'a t'on validée ?

Comparer les résultats de l'approche Smeared Fractures à ceux obtenus avec un maillage dédié



Comment l'a t'on validée ?

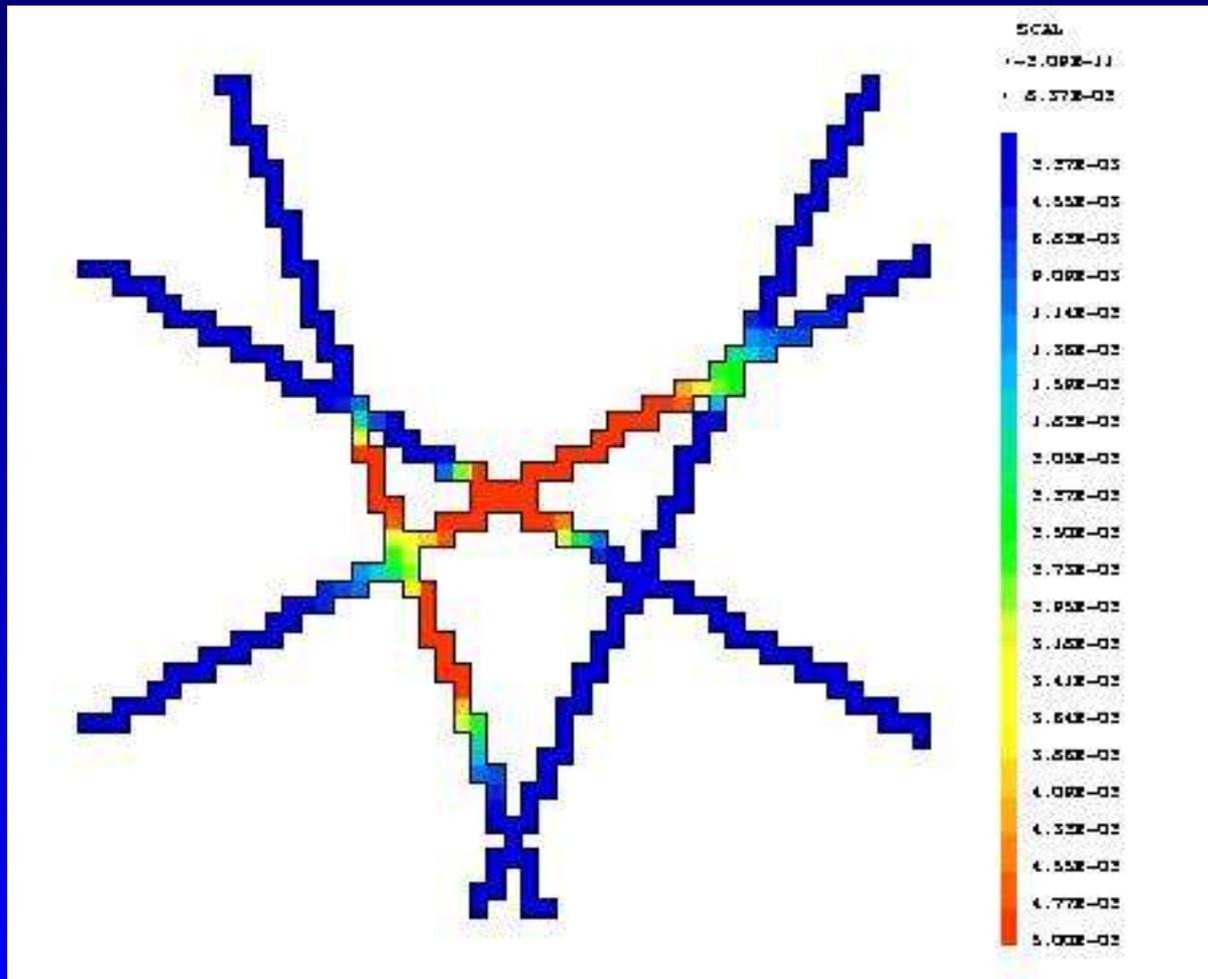
Comparer les résultats de l'approche Smeared Fractures à ceux obtenus avec un maillage dédié



Comment l'a t'on validée ?

Animation 3

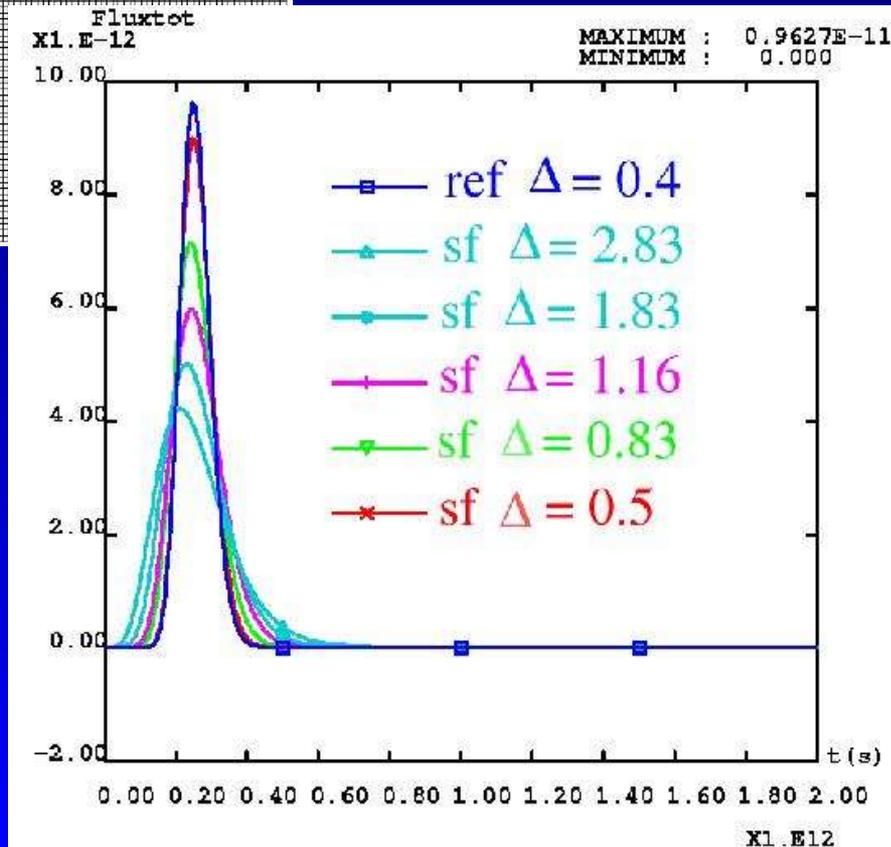
Validation sans diffusion matricielle



Concentration à un
temps t

Comment l'a t'on validée ?

Sans diffusion matricielle sur une fracture

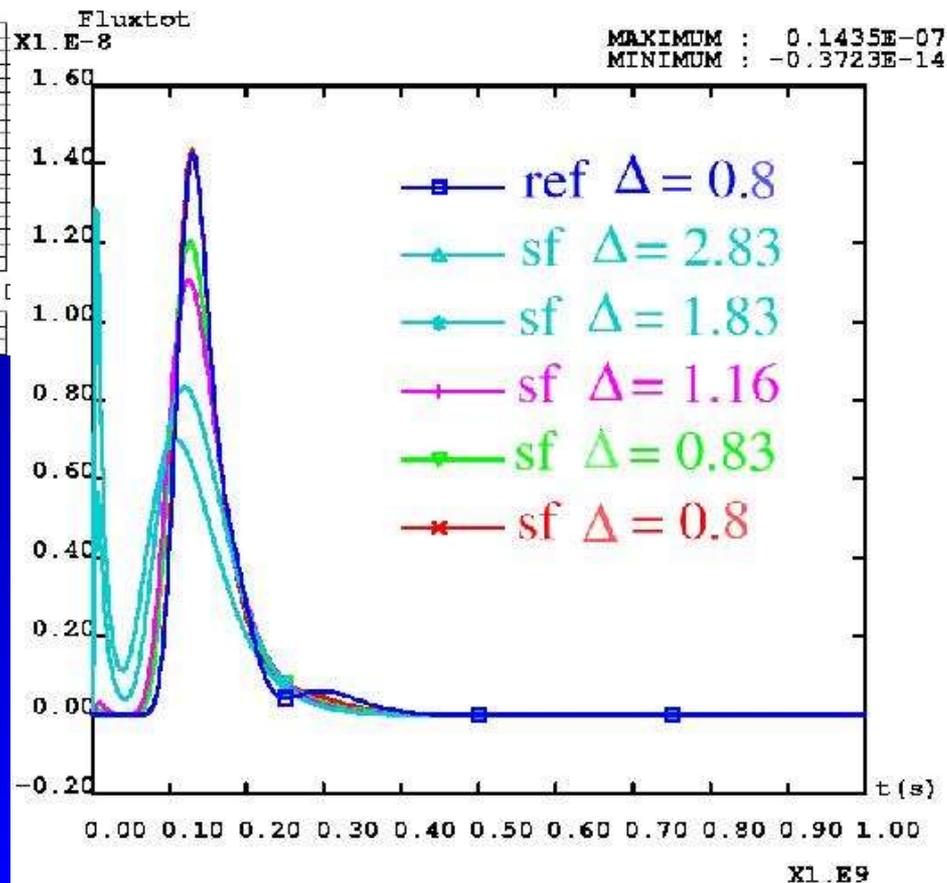


- Bon temps d'arrivée du pic
- Dispersion numérique augmente avec Δ

Comment l'a t'on validée ?

Sans diffusion matricielle sur quatre fractures

- Δ doit respecter la géométrie du réseau

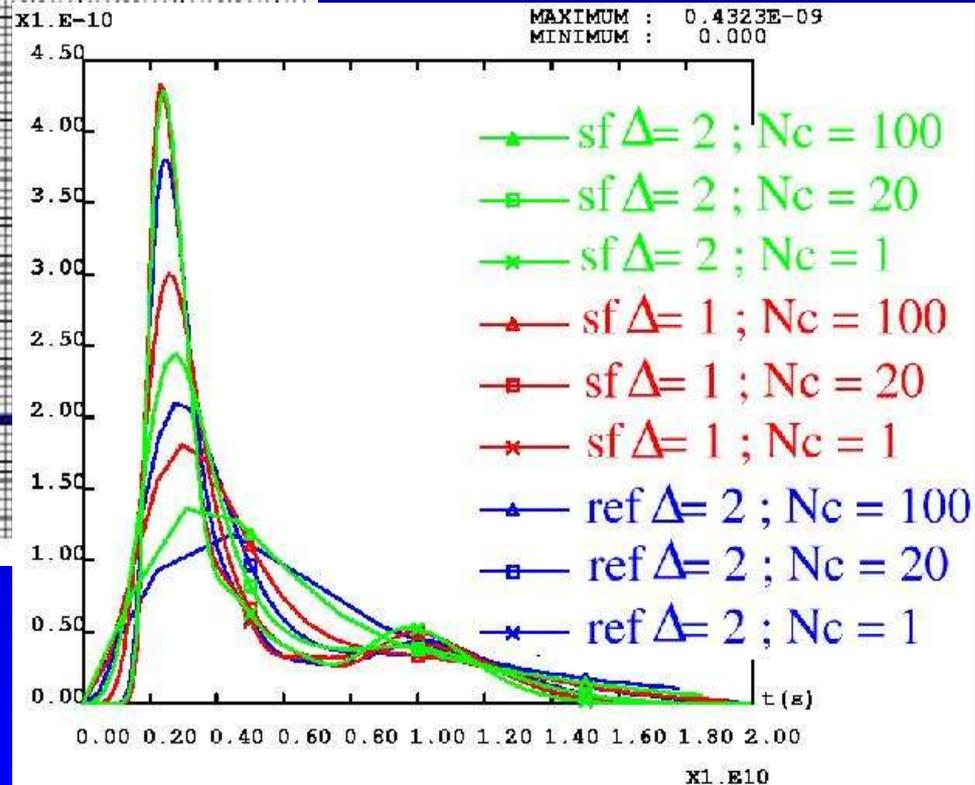
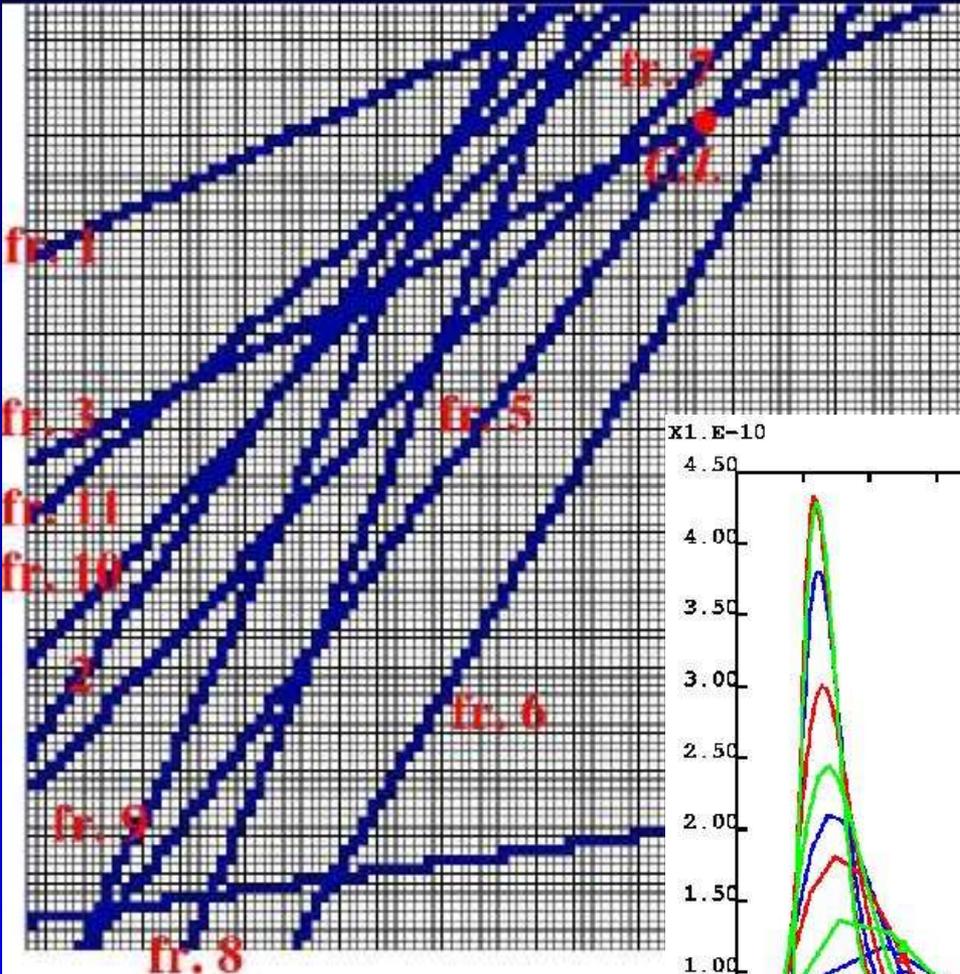


Comment l'a t'on validée ?

Sans diffusion matricielle : monotonie

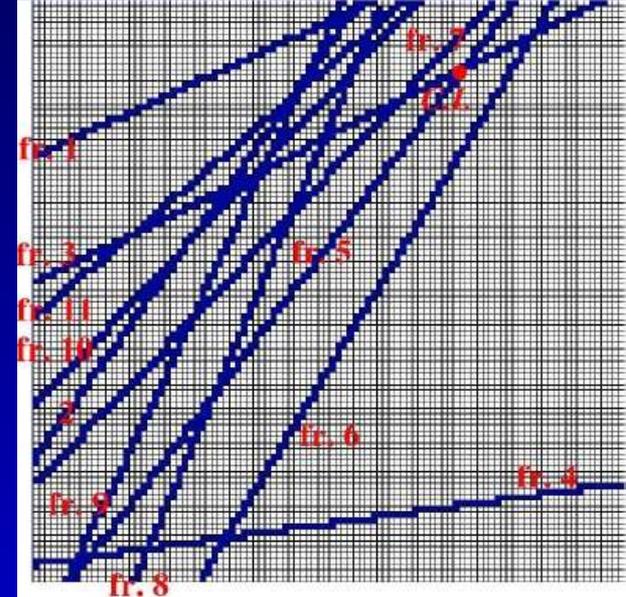
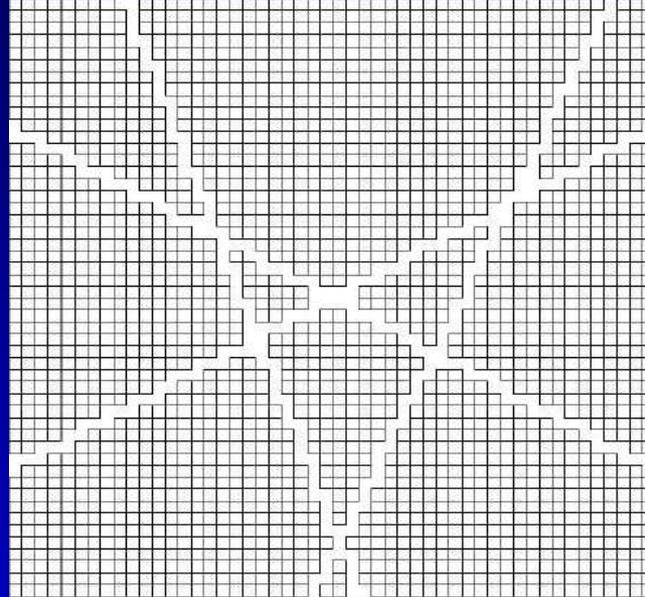
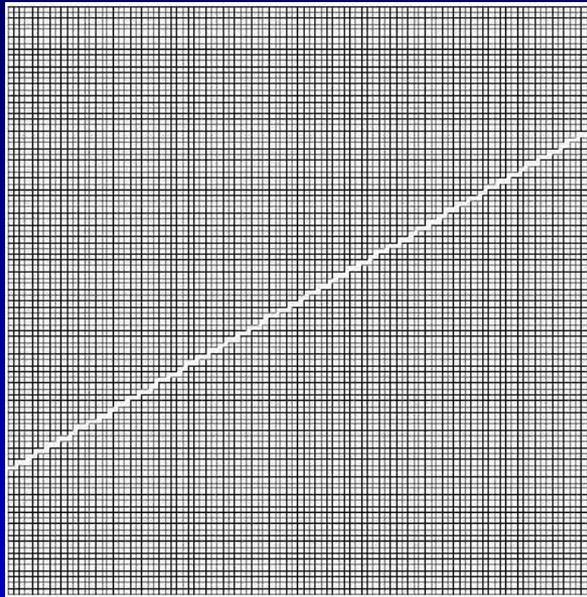
- Monotonie :

$$\frac{\Delta}{\alpha} < 2$$



Comment l'a t'on validée ?

Sans diffusion matricielle : bilan



- Bon temps d'arrivée du pic
- Dispersion numérique augmente avec Δ

- Δ doit respecter la géométrie du réseau

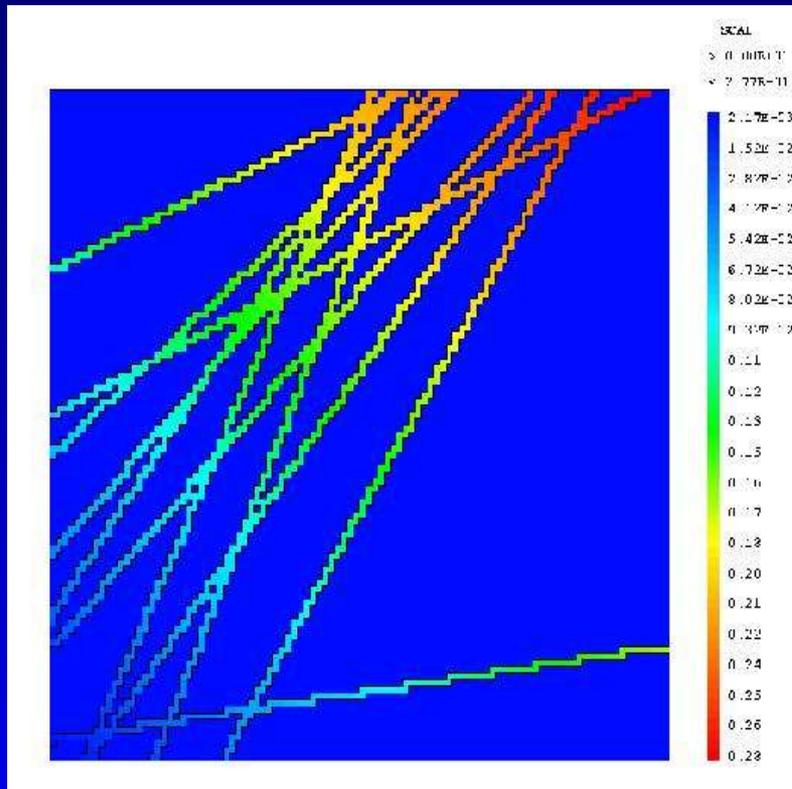
- Monotonie :

$$\frac{\Delta}{\alpha} < 2$$

Comment l'a t'on validée ?

Animation 4

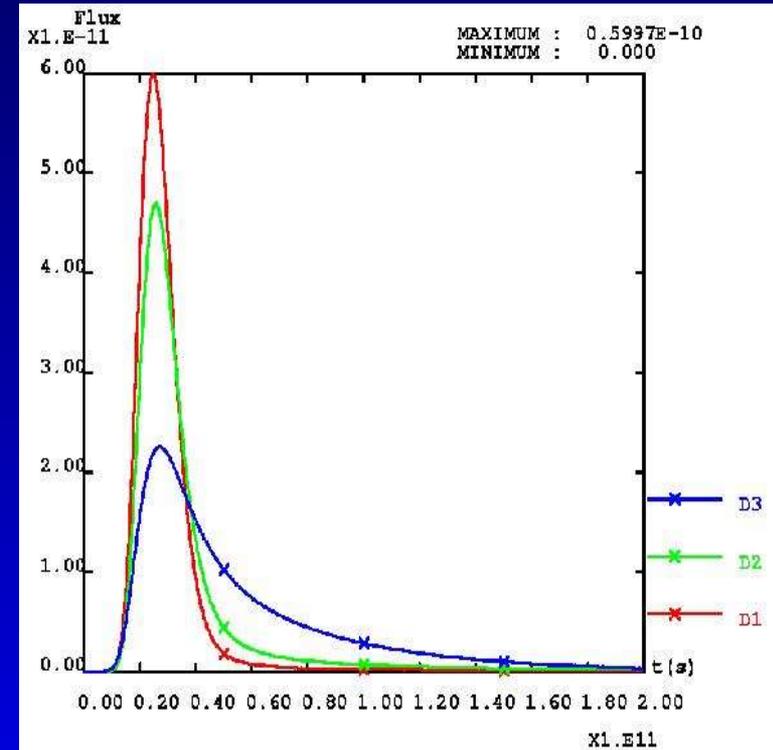
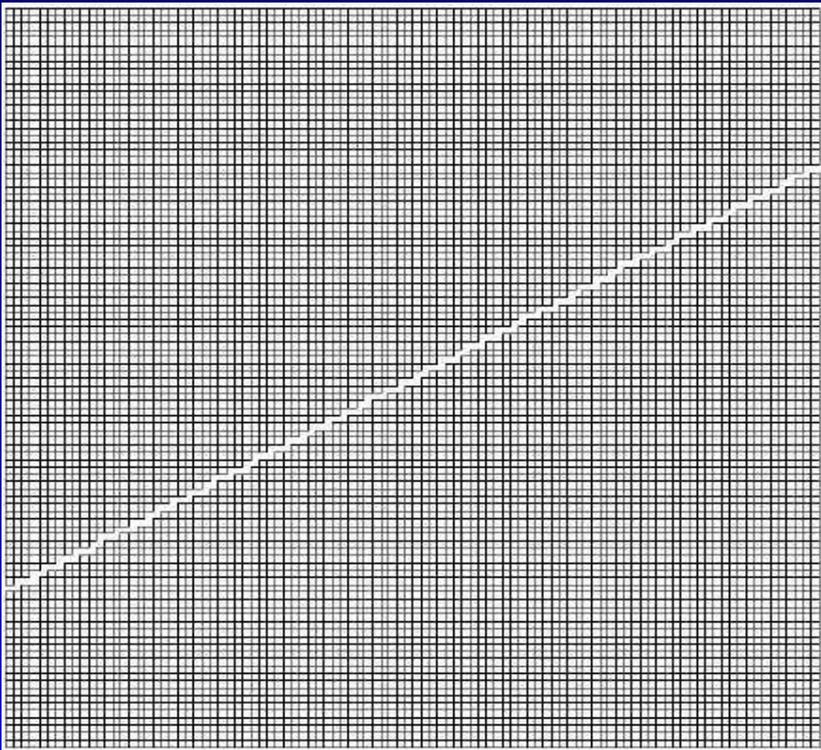
Validation avec diffusion matricielle



Concentration à un temps t

Comment l'a t'on validée ?

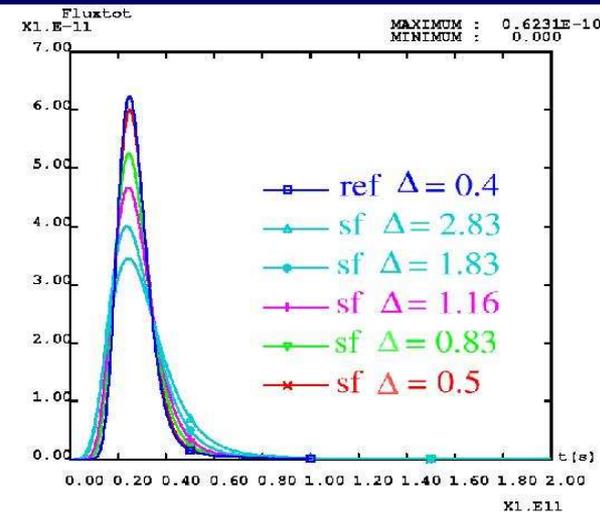
Avec diffusion matricielle sur une fracture



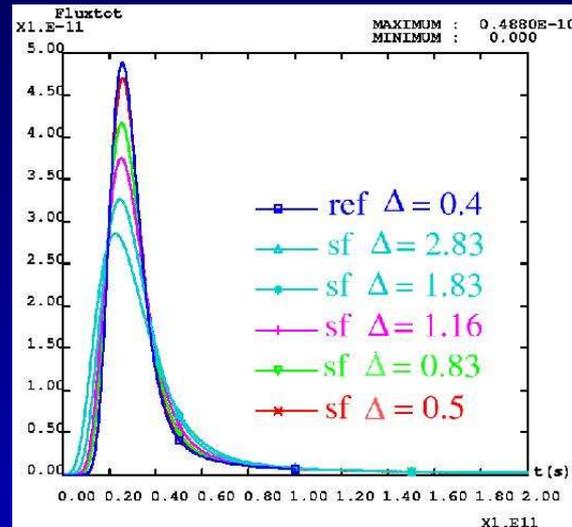
Variation du coefficient de diffusion matricielle

Comment l'a t'on validée ?

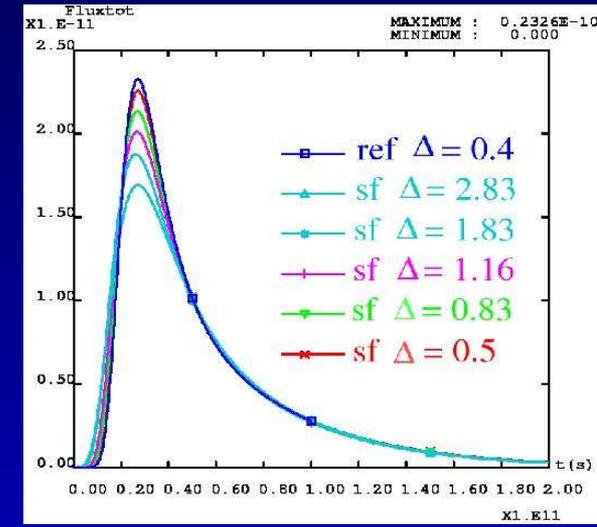
Avec diffusion matricielle sur une fracture



D_1



D_2

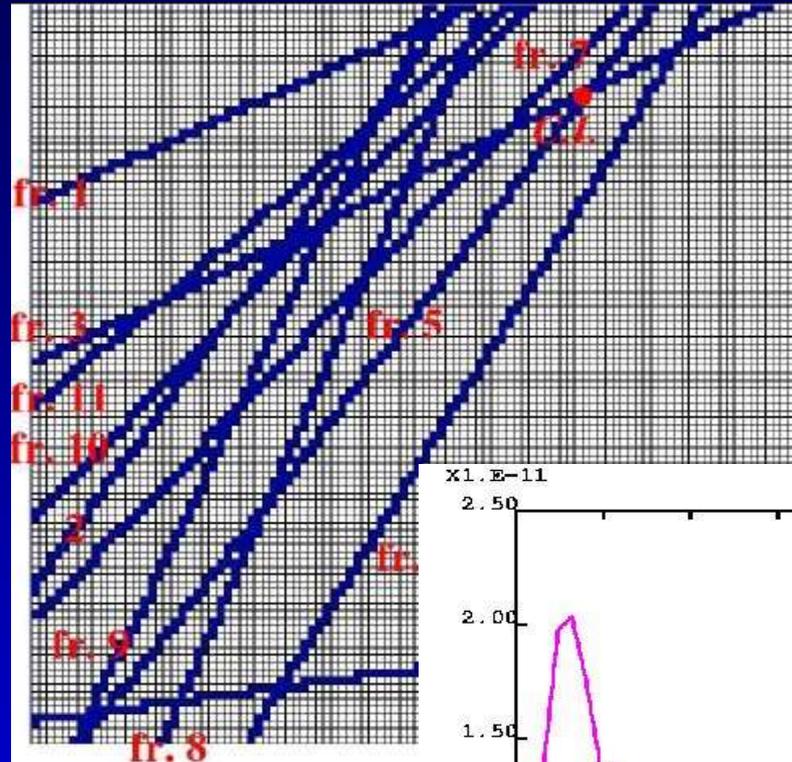


D_3

- Mêmes bilans que pour les cas sans diffusion matricielle
- La précision augmente avec la diffusion matricielle

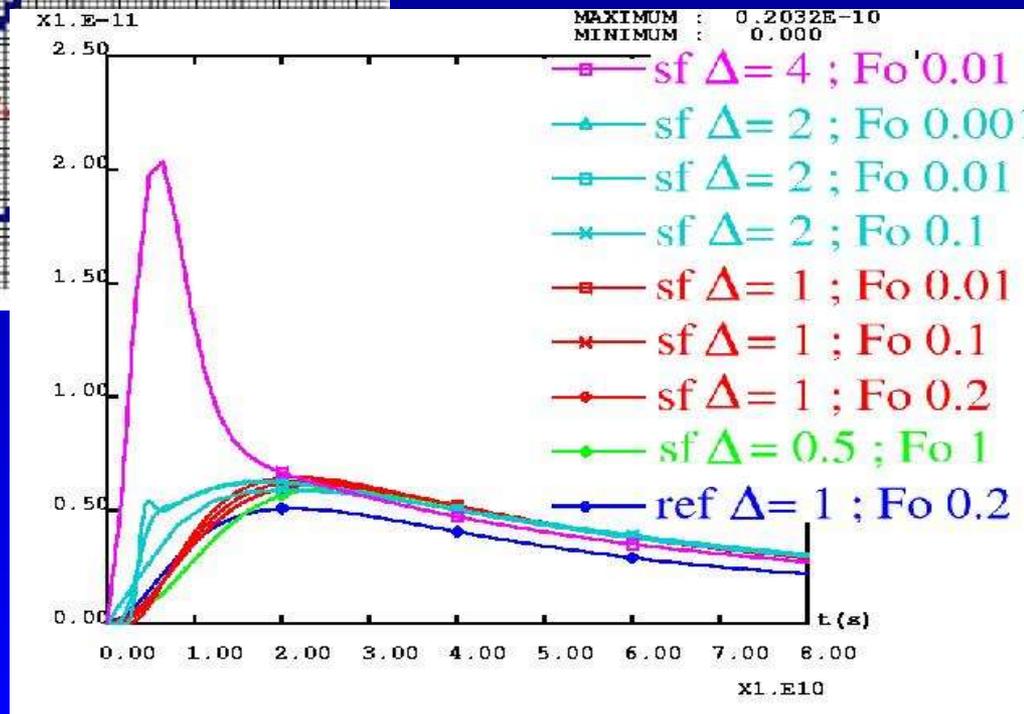
Comment l'a t'on validée ?

Avec diffusion matricielle : monotonie



- EFMH : $F_o = \frac{d \Delta t}{\Delta^2} > \frac{1}{6}$

- Critère : $\Delta < \sqrt{\frac{3}{10} d.R_p. \tau_w}$



Comment l'a t'on validée ?

Bilan globaux

- Bon temps d'arrivée du pic
- Dispersion numérique
- Conservation de la géométrie du réseau

Sans diffusion matricielle

Critère : $\frac{\Delta}{\alpha} < 2$

Avec diffusion matricielle

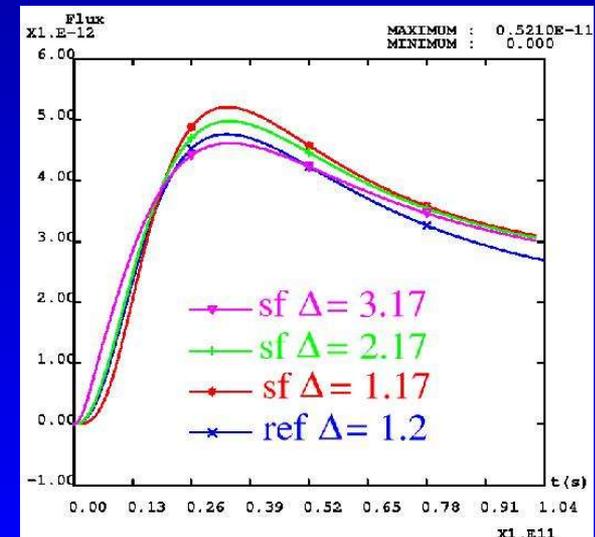
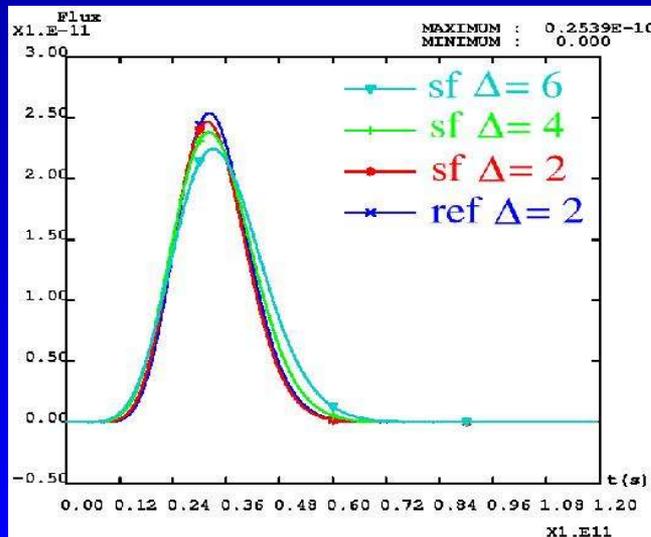
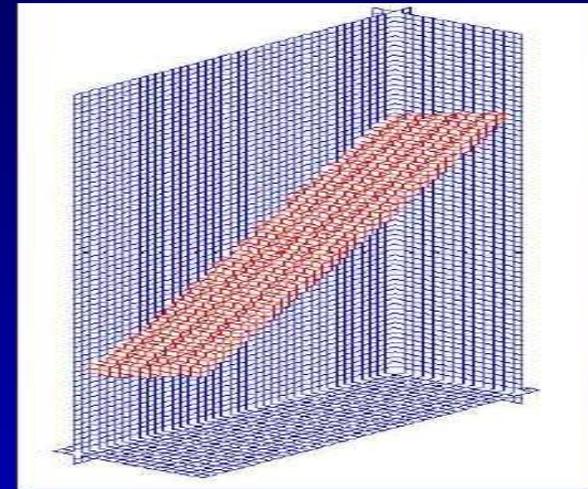
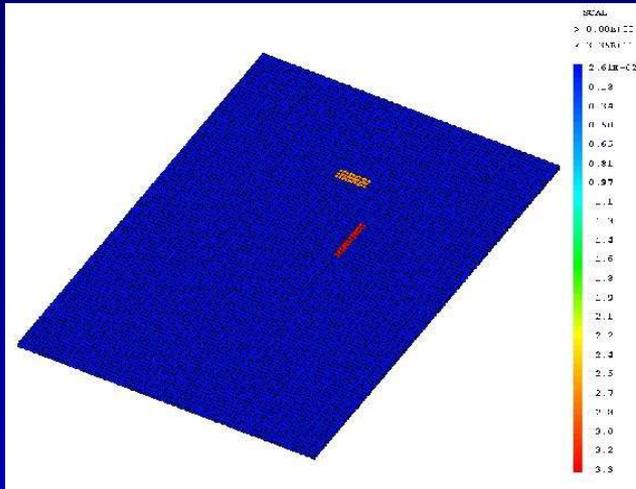
Critère : $\Delta < \sqrt{\frac{3}{10} d \cdot R_p \cdot \tau_w}$

La précision augmente avec l'importance de la diffusion matricielle

Comment l'a t'on validée ?

3D

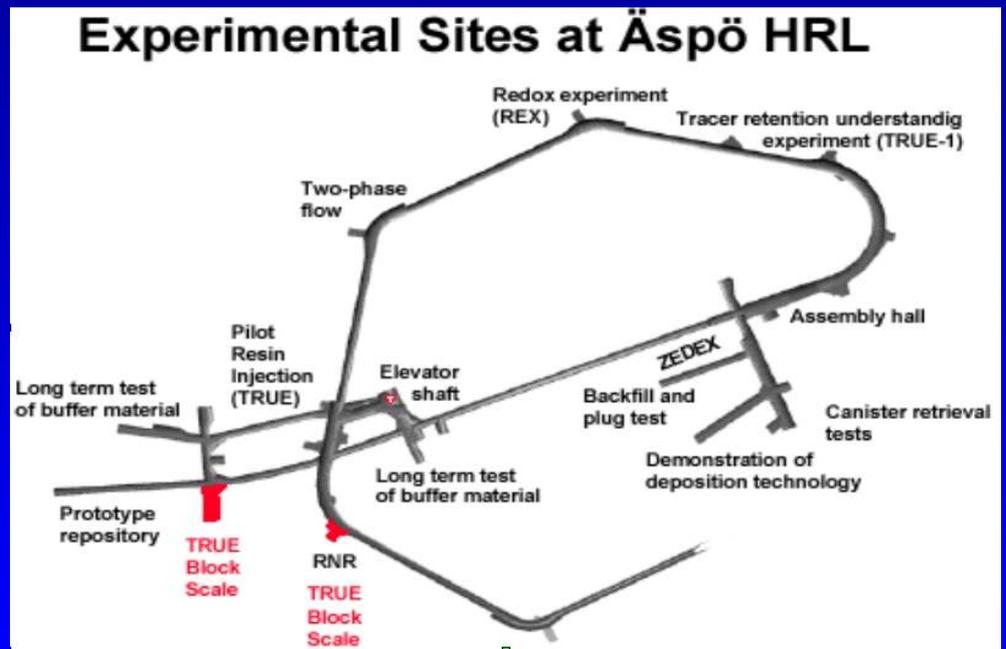
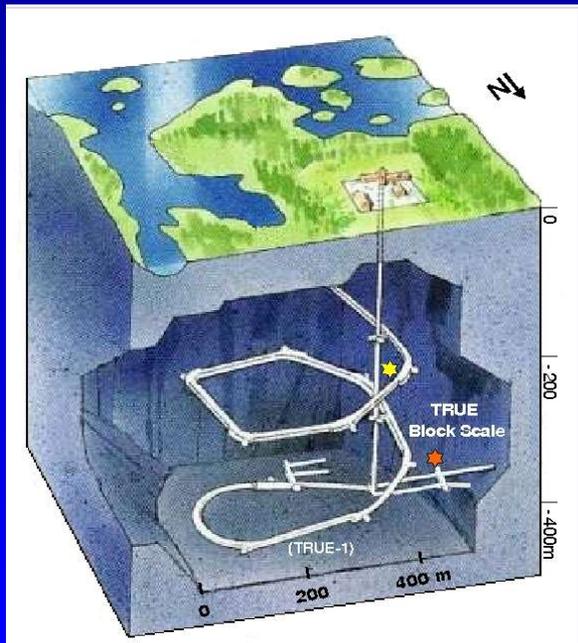
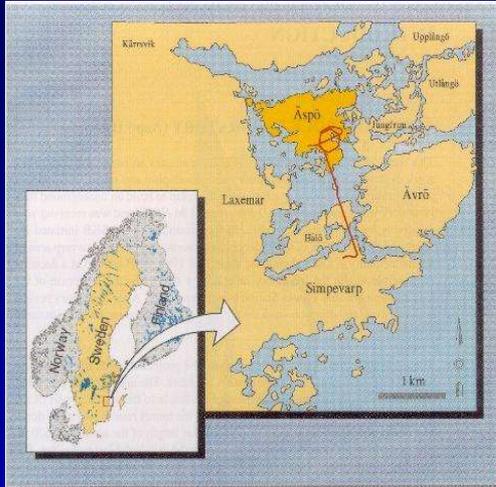
Même conclusions que pour le 2D (précision inférieure)



Plan de la présentation

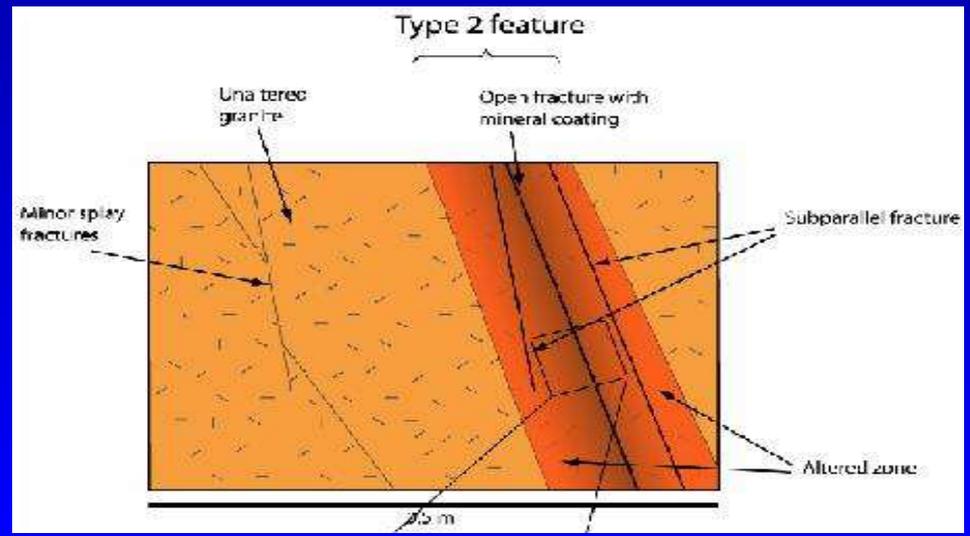
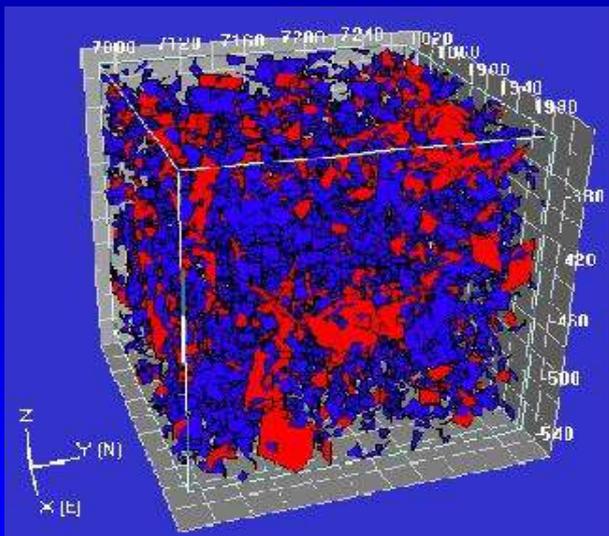
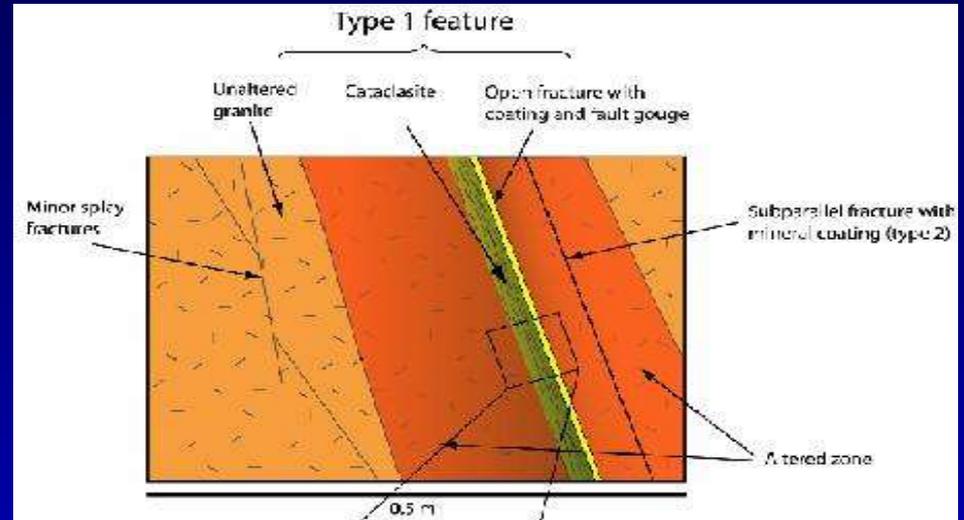
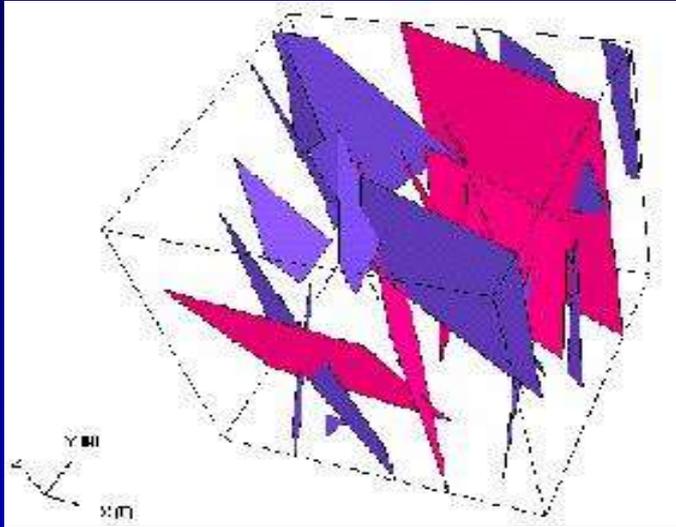
- ✿ Pourquoi étudier les milieux fracturés ?
Qu'est ce qu'un milieu fracturé ?
- ✿ A quels phénomènes physiques s'intéresse t'on ?
Quels sont les modèles associés ?
Quel rôle joue la diffusion matricielle ?
- ✿ Comment sont modélisés les transferts dans ces milieux ?
Quels sont les principes d'une approche Smearred Fractures ?
Comment sont déterminées les propriétés équivalentes ?
- ✿ Comment l'a t'on validée ?
- ✿ **Application au site de Äspö**

Application au site d'Äspö



Application au site d'Äspö

True Block Scale : données



Application au site d'Äspö

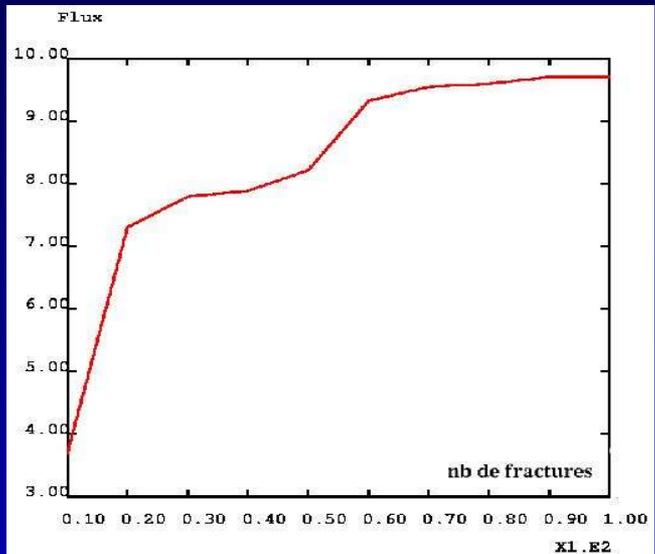
True Block Scale : démarche de travail

Objectif :
modéliser l'écoulement et le transport en conditions
naturelles

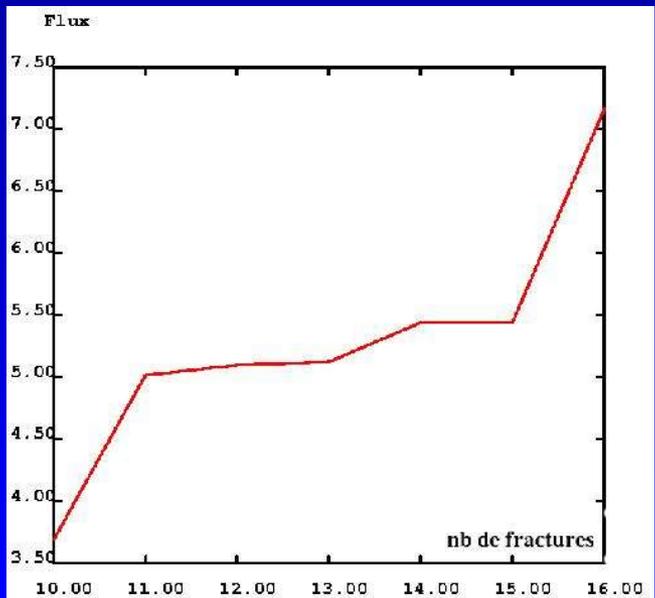
- Ecoulement : sensibilité au nombre de fractures
- Transport d'un Dirac de concentration

Application au site d'Äspö

True Block Scale : écoulement

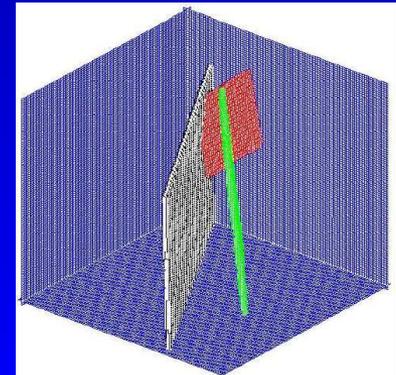
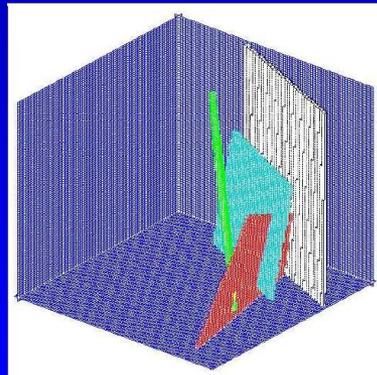


- ✿ Classification des fractures par surface décroissante
- ✿ Variation du nombre de fractures de 10 en 10
- ✿ A 50 fractures le flux représente 89% du flux total



Etude plus fine

Variation unitaire du nombre de fractures



Application au site d'Äspö

True Block Scale : transport

Transport d'un Dirac de concentration:

- modélisation sur un réseau de 50 fractures
- pour différents traceur (plus ou moins sorbants)

Adsorption modélisée par un coefficient de retard

Hélas

la pénétration des traceurs dans la matrice reste trop faible

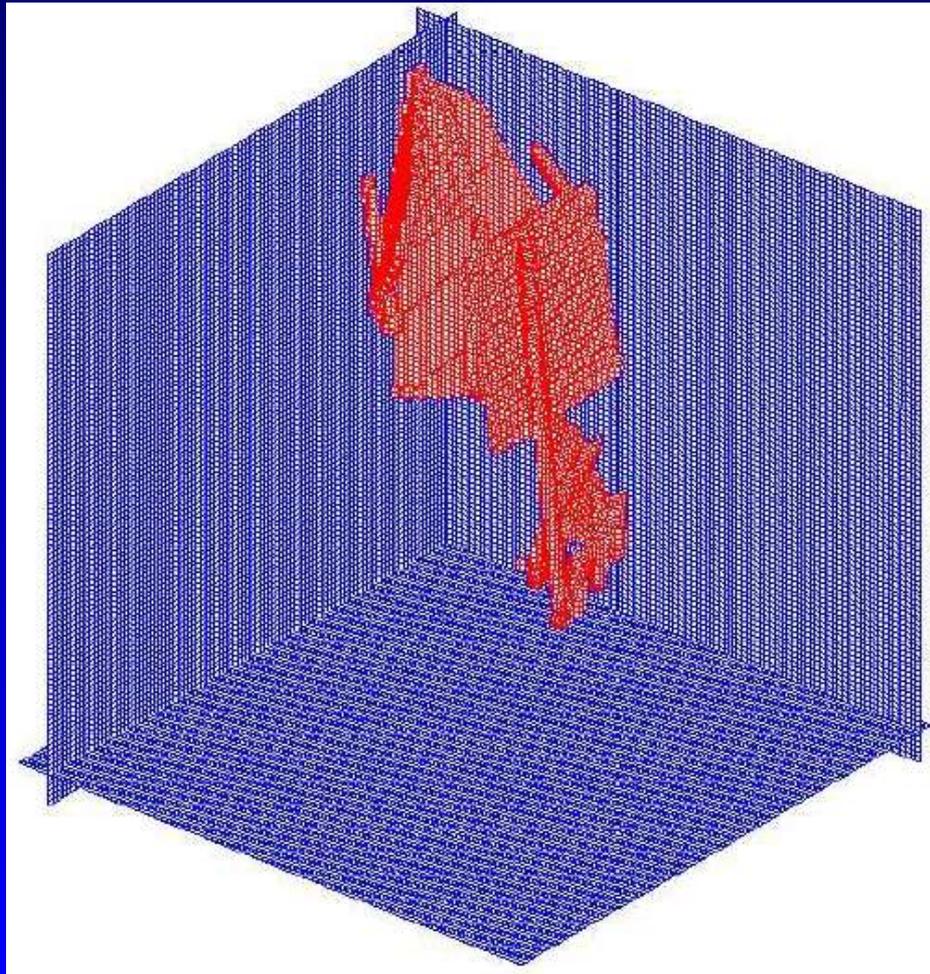
le respect des critères de monotonie impose une discrétisation trop fine

→ Les roches saines et altérées ne sont pas modélisées

Application au site d'Äspö

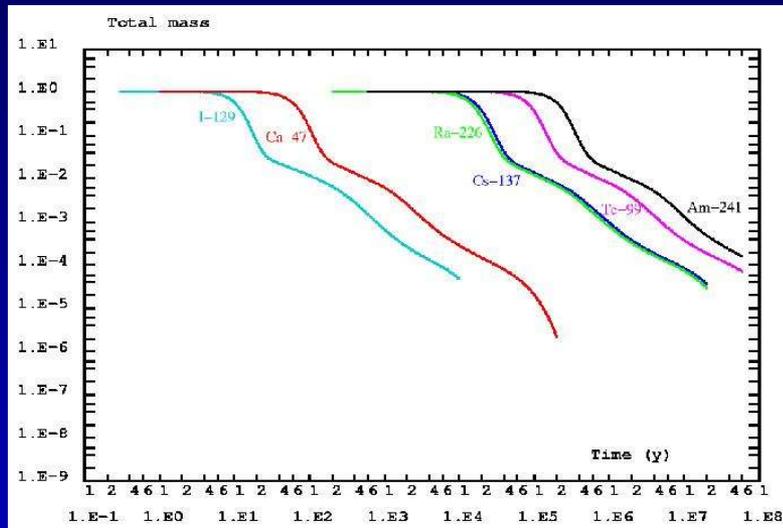
Animation 5

Cheminement du traceur dans les fractures

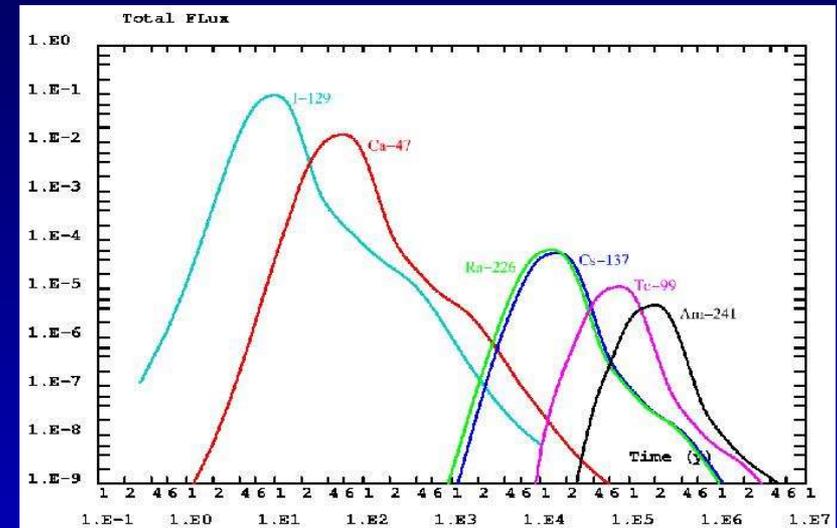


Application au site d'Äspö

True Block Scale : transport



Masse sortante



Flux massique sortant

- Le temps d'arrivée du pic dépend des propriétés plus ou moins sorbantes des traceurs
- Le traceur parcourt 16 fractures des 50 modélisées

Conclusions

Approche qualifiée et validée

Comparaisons par rapport aux :

- ✿ Modèles discrets :

 - Facilité du maillage de la géométrie

 - Prise en compte de la géométrie des blocs matriciels

- ✿ Modèles continus :

 - Prise en compte explicite des fractures principales

- ✿ Autres modèles Smeared Fractures :

 - Propriétés équivalentes déterminées pour un bon contrôle des flux

 - Etendue au transport

Conclusions

Critères d'utilisation

✿ Géométrique :

Respecter la géométrie du milieu fracturé

✿ Numérique :

Sans diffusion matricielle : $\frac{\Delta}{\alpha} < 2$

Avec diffusion matricielle : $\Delta < \sqrt{\frac{3}{10} d \cdot R_p \cdot \tau_w}$

Perspectives

✿ *Notre approche n'est pas adaptée à modéliser l'influence d'une faible diffusion matricielle*

Traiter les cas où la pénétration dans la matrice est faible

✿ *La fracturation de fond peut engendrer des écoulements dans la matrice*

Modéliser les écoulements faibles dans la matrice

✿ Envisager une approche chenalisée

✿ Regarder les apports des autres schémas numériques : Volume finis, différences finis

Application à :

✿ des simulations de **Monte Carlo**

✿ des hétérogénéités de fractures ou matrice