

Modélisation “simple-porosité” des transferts de gaz et d’eau à travers la zone endommagée par excavation de la roche

Luc-Vincent Bénet^a, Étienne Blaud^a,
Jacques Wendling^b

^a SOCOTEC SA / Projets Industriels / AME,
(luc-vincent.benet@socotec.com)

^b ANDRA



SOCOTEC

Le pouvoir d'anticiper

Plan de l'exposé

- **Contexte et objectifs**

- ▶ *La formation de l'EDZ dans les roches du Callovo-Oxfordien*
- ▶ *Les enjeux de sa modélisation*

- **La conceptualisation de l'EDZ**

- ▶ *Caractérisation géo-mécanique et hydraulique*
- ▶ *Cadre de la modélisation*

- **L'approche méthodologique**

- ▶ *Des données expérimentales au modèle de l'EDZ*

- **Le modèle phénoménologique**

- ▶ *propriétés Géométrique et hydraulique du modèle de fracturation explicite*

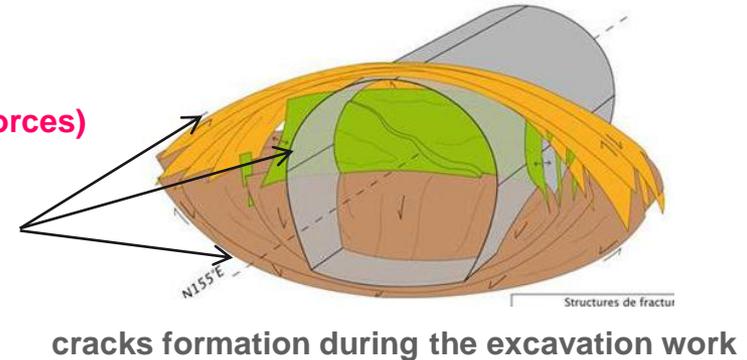
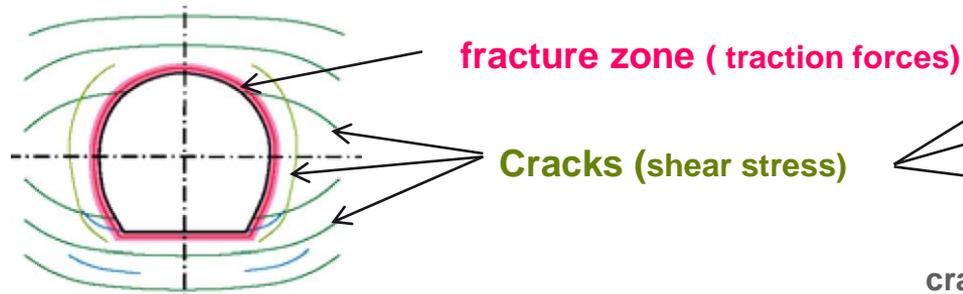
- **Le modèle "milieu poreux équivalent"**

- ▶ *Propriétés physiques en milieu saturé et dé-saturé*
- ▶ *Illustration du comportement hydraulique sur un cas de calcul*

- **Conclusions**

Contexte et objectif de l'étude

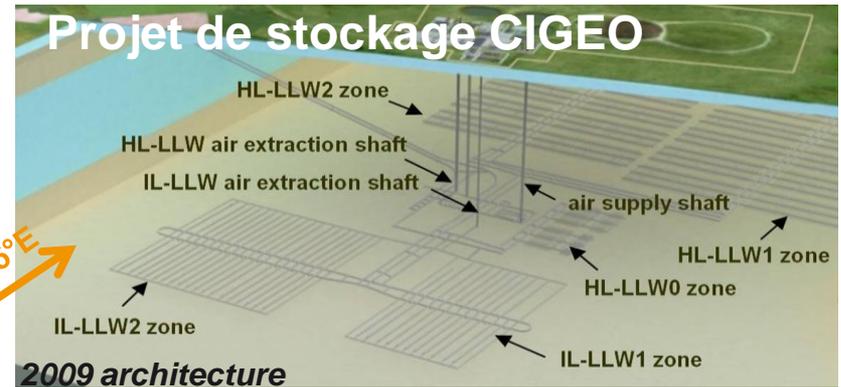
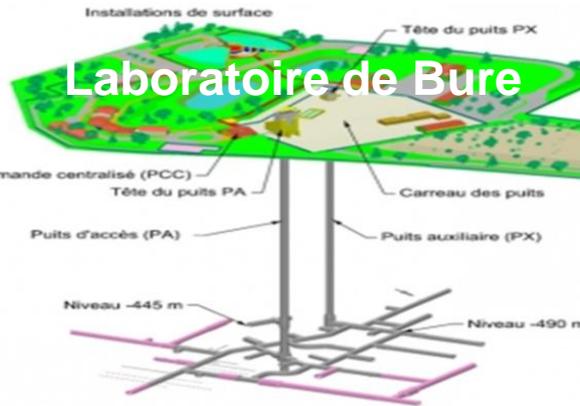
- **La zone endommagée (EDZ):**
 - ▶ *Fractures aléatoires parallèles à l'excavation*
 - ▶ *Fractures longue de grande extension*



- **2 sous-zones distinctes :**
 - ▶ *EDZ-c = fractures hétérogènes bien connectés*
 - ▶ *EDZ-d = fractures homogènes peu connectés*
- **Fractures et fissures changent les propriétés hydrauliques:**
 - ▶ *Plus perméable...*
 - ▶ *Moins capillaire.*
- **Elles peuvent jouer un rôle clé sur les transferts de masse :**
 - ▶ *Durant l'exploitation* : désaturation par échange de vapeur entre roche et ventilation
 - ▶ *Après la fermeture* : elles favorisent les écoulements le long des galeries

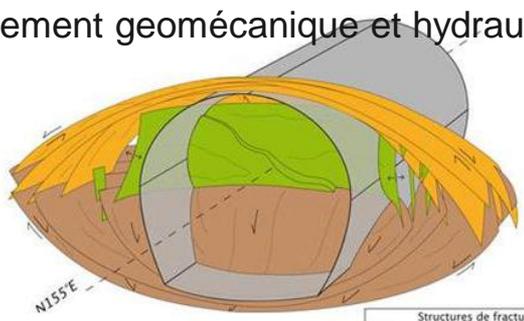
La conceptualisation de l'EDZ dans le contexte du stockage profond

- L'objectif : définir un modèle cohérent avec les mesures
 - ▶ Même comportement capillaire et de perméation que l'EDZ réel
 - ▶ Dans le cadre d'un modèle "Milieu Poreux Equivalent"

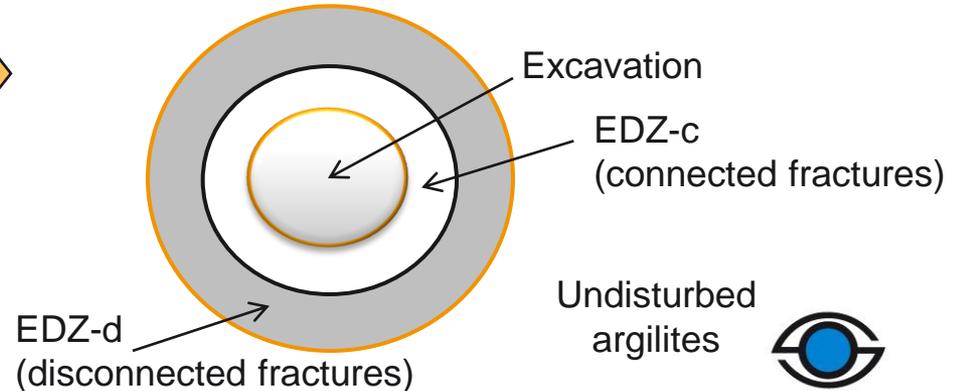


● Caractérisation de l'EDZ

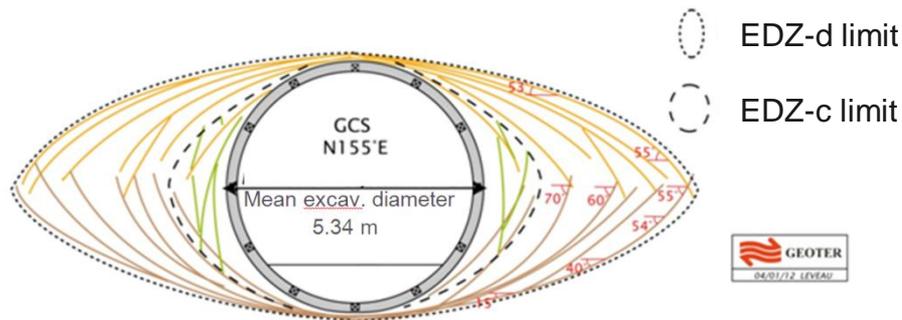
Fonctionnement géomécanique et hydraulique



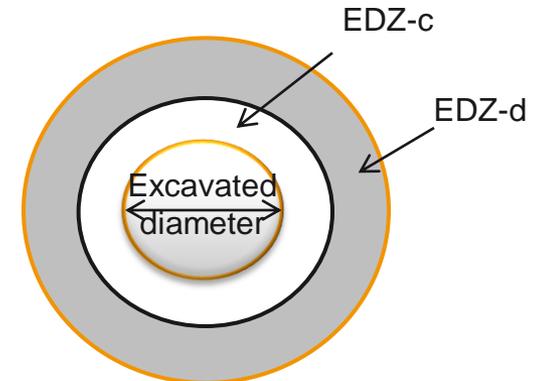
● Modèle simplifié « Milieu Poreux Equivalent »



Des mesures *in situ* au modèle simplifié « Milieu Poreux Equivalent »



Analyse géo-mécanique



Modèle « milieu poreux équivalent »

● caractérisation EDZ-c et EDZ-d :

- ▶ Espacement et orientation fractures
- ▶ Épaisseur (données qualitative),
- ▶ Interconnexion (données qualitative),
- ▶ Extension horizontale et verticale,
- ▶ Perméabilité latérale
- ▶ Perméabilité verticale

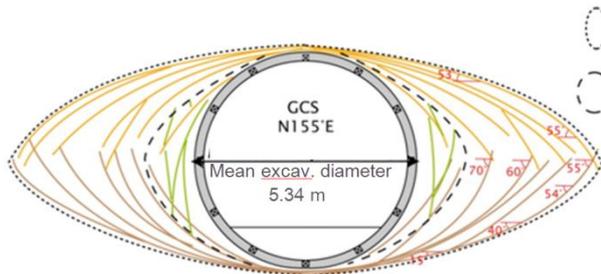
● Modèle simplifié :

Dans chaque sous-zones EDZ-c et EDZ-d,

- ▶ porosité uniforme,
- ▶ Épaisseur constante,
- ▶ paramètres capillaires uniformes,
- ▶ paramètres de perméation uniformes.

Modèle phénoménologique
(fractures explicites)

La stratégie

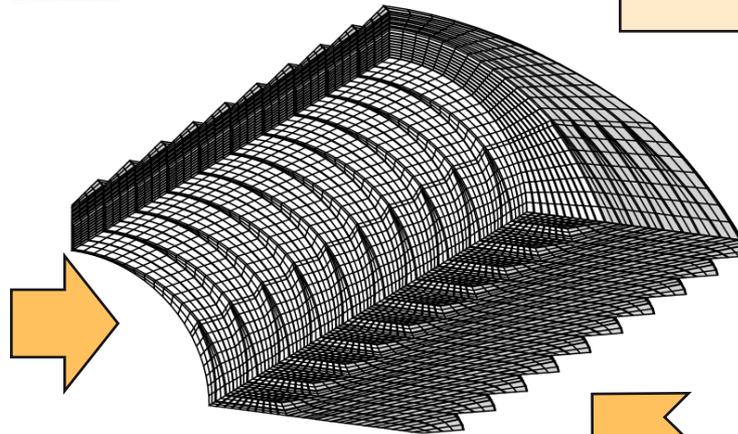


○ EDZ-d limit
 ○ EDZ-c limit

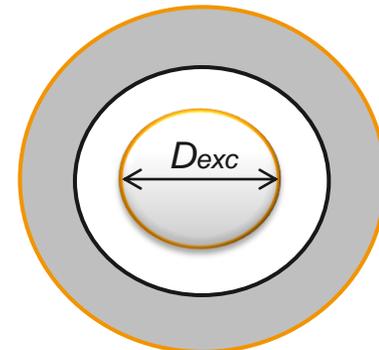
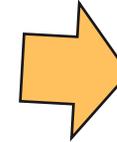


Mesures géométriques

- Same
 - ▶ EDZ Horiz. Extension / D_{exc} ,
 - ▶ EDZ Vert. extension / D_{exc} ,
 - ▶ Mean Crack Horiz. Spacing,
 - ▶ Mean Crack Long. Spacing.

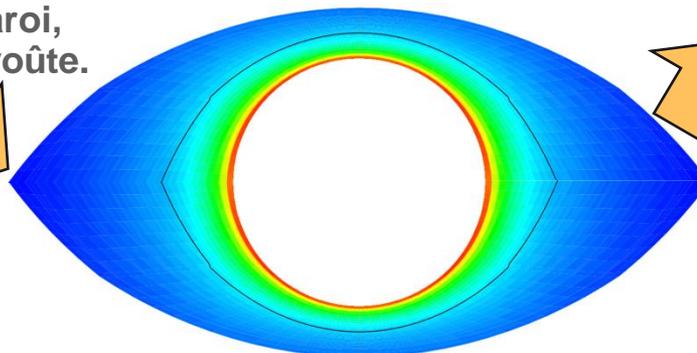


Modèle de fractures explicites



Modèle simplifié

- Epaisseur des fractures
 (déduite par processus itératif)

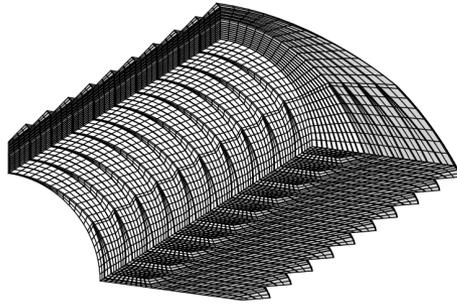


Extrapolation des perméabilités

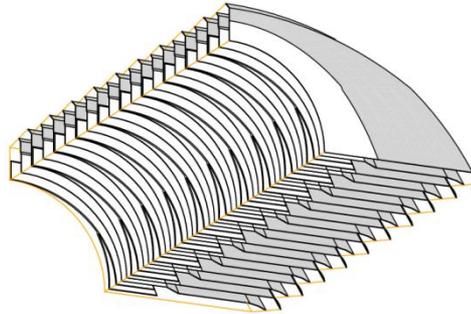
- Same
 Longitudinal Permeation

Hyp : Homothetic permeation profiles

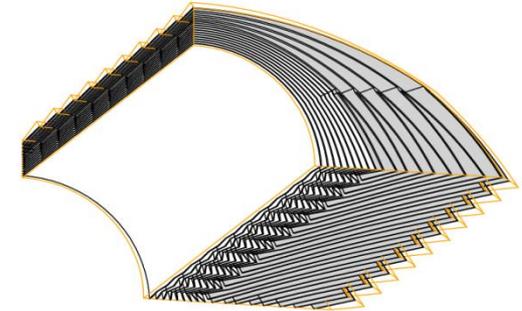
Le modèle de fractures explicites : cas d'une galerie courante



Fractures + undisturbed host-rock



Transverse fractures



Longitudinal and oblique fractures

● Dimensions for an access Gallery

- ▶ Excavation diameter: 7.5 m
- ▶ EDZ-c horizontal extension: ~ 1.5 m
- ▶ EDZ-d horizontal extension: 6.0 m
- ▶ EDZ-c vertical extension : 0.75 m
- ▶ Model length: 18.8 m

● Fracture physical properties

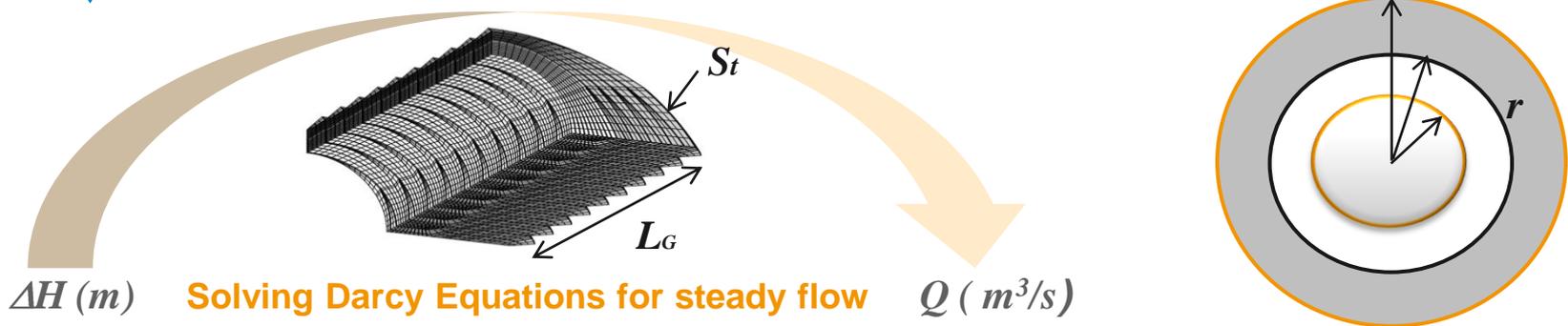
- ▶ Intrinsic permeability: $k_i = \frac{e_h^2}{12}$
- ▶ Water relative permeability: $k_{r=Sw}$
- ▶ Ref. capillary pressure: $P_r = \frac{2 \cdot \gamma_w}{e_h \cdot \rho_w \cdot g}$
- ▶ Geometric thickness: $e_g = 2e_h$

e_g supposed uniform in each subzone

Fractures	Pr (m)	e_h (μm)	ω_F/ω_{EDZ} (%)
EDZ-c	3.44	2.45	0.67
EDZ-d (oblique)	13.27	1.1	0.18
EDZE-d (transverse)	26.54	0.55	0.0

Fracture properties

Le modèle « milieu poreux équivalent » de la galerie courante



● Calculation options:

- ▶ EDZ-c or EDZ-d,
- ▶ Transverse or longitudinal flow,
- ▶ Air or water,
- ▶ Uniform capillary pressure over $-5000\text{ m} > P_c > 0\text{ m}$

● Permeation parameters:

- ▶ Transmissivity: $T = \frac{Q}{\Delta H}$
- ▶ Mean effective permeability :
 - Longitudinal $K_L = T_L \cdot \frac{L_G}{S_t}$
 - transverse $K_T = T_T \cdot \frac{\ln \epsilon_{outer} - \ln \epsilon_{inner}}{2 \cdot \pi \cdot L_G}$
- ▶ Relative permeability k_r defined via: $K = \frac{k_i \cdot k_r}{\mu}$

● Physical properties – “equivalent porous media” model

Parameters	symbols	EDZ-c 2009	New EDZ-c	EDZ-d 2009	New EDZ-d
Porosity	ω (%)	20	18	18	18
Long. Permeability	K_L (m/s)	10^{-9}	2.1×10^{-10}	10^{-11}	4.7×10^{-12}
Trans. Permeability	K_T (m/s)	10^{-9}	5.2×10^{-11}	10^{-11}	1.1×10^{-12}
Ref. pressure	P_r (m)	200	1.500	800	1.500
Zone thickness	E_p (xDexc)	-	0.14	-	0.27

Comportement du nouveau modèle en milieu poreux non saturé

- **Loi de rétention de l'EDZ:**

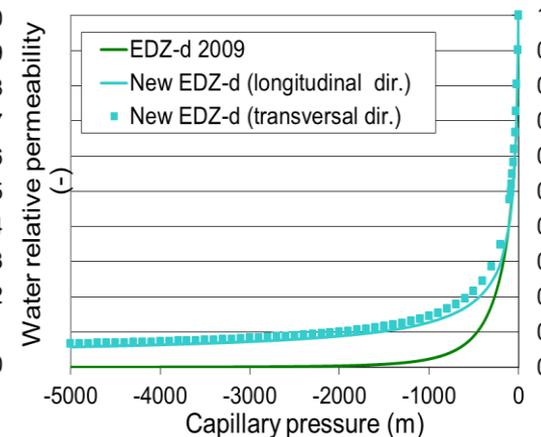
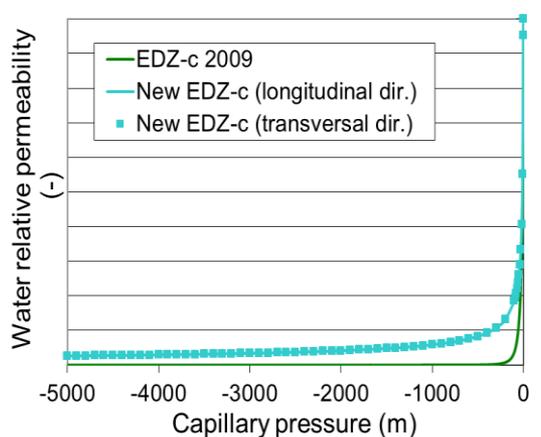
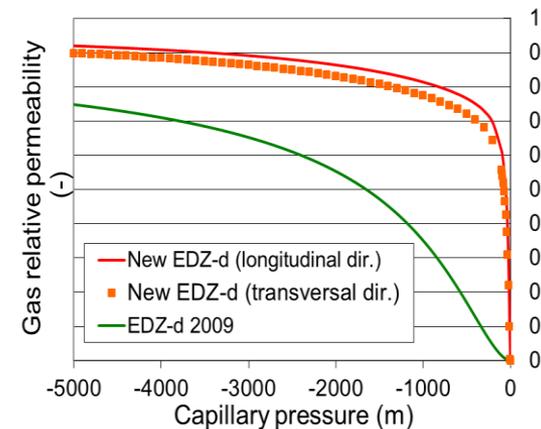
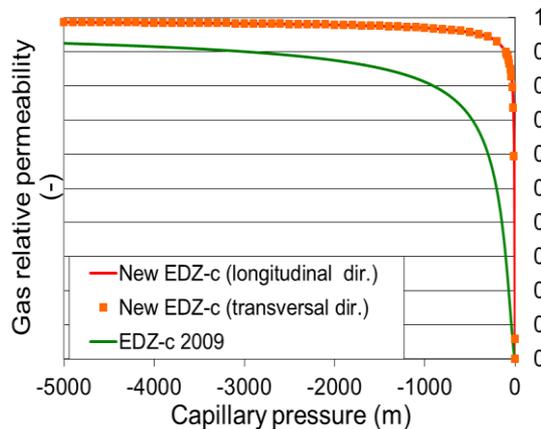
- ▶ Identique à celle de la roche

- **Perméabilité relative gaz:**

- ▶ Supérieure au modèle 2009

> *Effet de la désaturation des fractures*

> *Vol. libre interne des fractures négligeable / vol. poreux roche*

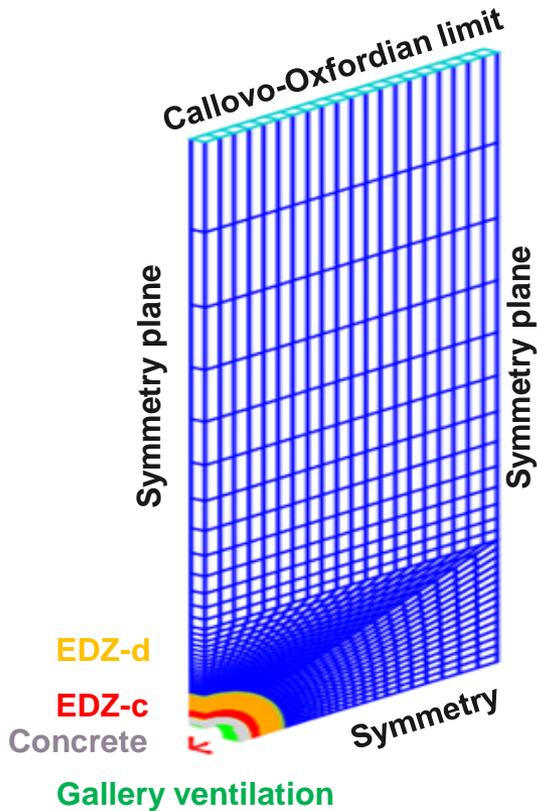


- **Perméabilité relative eau :**

- ▶ Supérieure au modèle 2009

> *Loi linéaire utilisée*

Exemple : de-saturation / re-saturation de l'EDZ d'une galerie

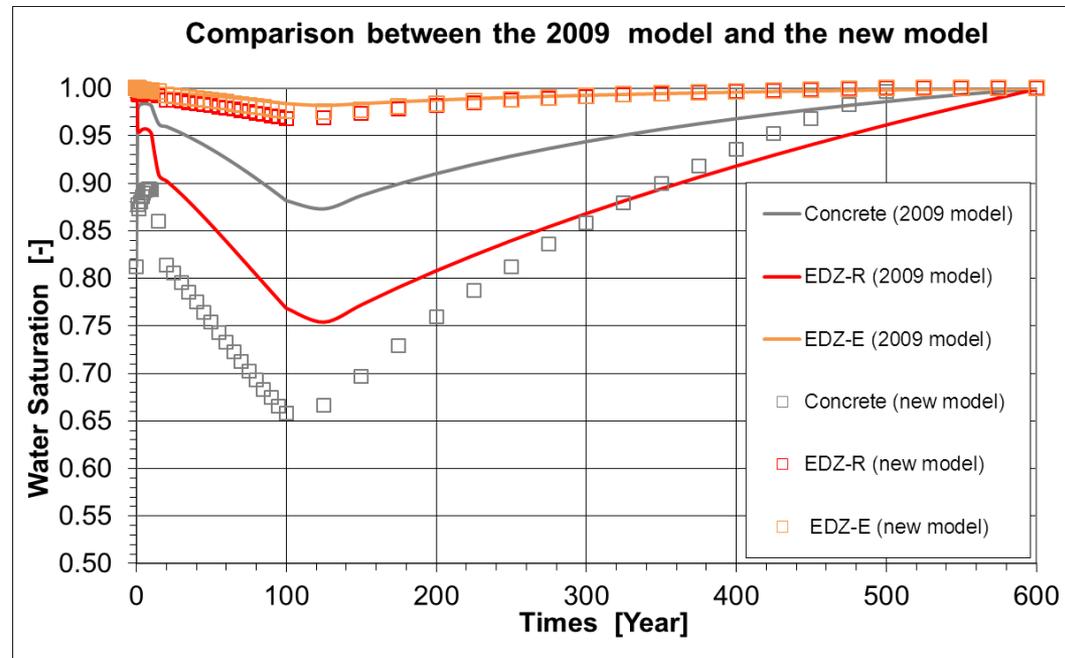


● Scenario:

- ▶ Galerie ventilée sur 100 ans (période d'exploitation)
- ▶ Ventilation stoppée après (pas d'échange d'eau avec l'air)

● Résultats du nouveau :

- ▶ Désaturation inférieure dans l'EDZ-c, supérieure dans le béton ;
- ▶ Re-saturation plus rapide de 100 ans
..... due aux différences avec la loi de saturation 2009



Conclusions

- **Développement du nouveau modèle de l'EDZ :**
 - ▶ Construction d'un modèle de Fractures Explicites basée sur les données expérimentales
 - ▶ Calibration du nouveau modèle « Equivalent Milieu Poreux » basée sur le comportement double-porosité du modèle FE.
- **Applications :**
 - ▶ Cas de la galerie courant (diamètre 7,5 m)
*Étude de sensibilité à la variation spatiale de l'épaisseur des fractures ;
Étude de sensibilité au degré de connexion des fractures au sein de l'EDZ-d.*
 - ▶ Cas de l'alvéole de stockage HA (diamètre 0,7 m)
*Pas de donnée expérimentale, observation d'ordre qualitative ;
> construction homothétique au modèle de la galerie.*
- **Les propriétés du nouveau modèle EMP :**
 - ▶ Moins perméable en milieu saturé que le modèle 2009 ;
 - ▶ Perméabilité relative plus élevée en non saturée ;
 - ▶ Même porosité et même comportement capillaire que la roche saine.
- **Quelques données expérimentales utiles pour aller de l'avant...**
 - ▶ Données expérimentales géométriques et hydrauliques pour l'EDZ des alvéoles HA

Le travail de modélisation géométrique, physique et de résolution numérique a été réalisé avec Cast3M



Merci de votre attention