

La performance des dispositifs de fermeture de stockages Le projet SEALEX

Jean-Dominique Barnichon
DEI/SARG/LR2S

Visite technique CFMR

Tournemire, le 09/06/2011



Système de management
de la qualité IRSN certifié



Aitemin
Centro Tecnológico



1. Contexte du projet SEALEX
2. Objectifs et phénoménologie considérée
3. Détails du programme *in situ*
4. Installation et premiers résultats
5. Perspectives

Contexte

A l'issue de l'expertise du Dossier 2005, l'IRSN a identifié plusieurs points clés pour la sûreté des stockages, parmi lesquels:

- Evaluer les principales perturbations et leur influence sur les propriétés de confinement des composants du stockage
- Evaluer la faisabilité technique de scellements en regard :
 - De leur fonctions de sûreté
 - De leur niveau de performance requis

Objectifs de l'IRSN :

Réunir des connaissances en vue de construire un jugement indépendant sur la maîtrise technique par l'exploitant de la réalisation d'ouvrages de scellement :

- Difficultés de réalisation *in situ*
- Influence des paramètres de spécifications et de choix technologiques

➔ **Projet SEALEX**

L'architecture de stockage vs. les 3 fonctions de sûreté principales

1. S'opposer à la circulation d'eau le long du stockage

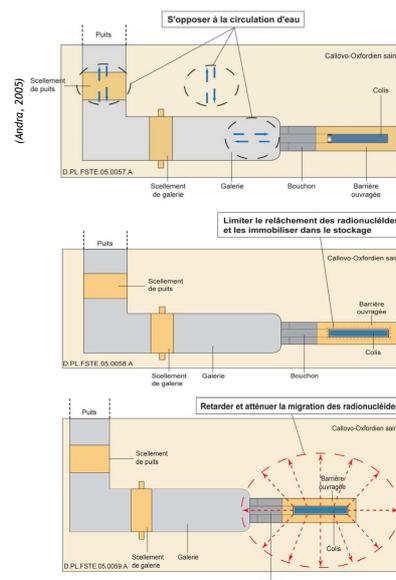
- Architecture 'borgne'
- Scellements (noyaux gonflants)

2. Limiter le relâchement des RN et les immobiliser dans le stockage

- Conditions géochimiques favorables de la roche hôte
- Colis de déchets (aciers bétons)

3. Retarder et atténuer la migration des RN

- Très faible perméabilité de la roche hôte



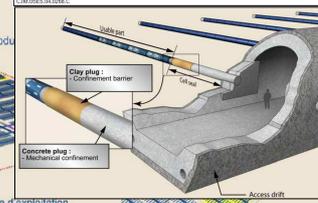
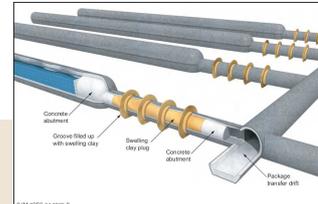
Concept des scellements (Andra, 2005, 2009)

■ Isolation hyd. passive / formations géol.

■ Fractionnement Situations altérées

■ Noyaux à base d'argile gonflante (bentonite, avec ajout éventuel de sable), conditionnée sous forme de blocs précompactés ou de pellets

■ Noyaux encadrés par des massifs d'appui (béton...) → confinement mécanique requis pour le développement de P_g



Les scellements permettent d'assurer que le transfert des radionucléides reste majoritairement diffusif (phase post-fermeture), y.c. en situations altérées

→ Cf. Fonction de Sûreté "S'opposer à la circulation d'eau"

C.IM.0POL.08.0115.B

Visite technique CFMR - Tournemire, le 9 juin 2011

IRSN

5

REX d'essais *in situ* (TSX, FEBEX, EB, RESEAL, KEY)

Challenges et questions ouvertes :

■ La saturation forcée conduit généralement à :

- Un champ de saturation hétérogène à court et moyen terme
- Des hétérogénéités de la porosité finale à l'état saturé
- Voire une érosion du noyau par écoulement chenalisé (roche cristallines)

■ Une part non négligeable de l'eau injectée est "perdue" (fuite et/ou prise par la roche hôte)

→ Difficultés pour réaliser le bilan massique à l'échelle des noyaux

■ Comment évoluent les scellements à long terme après rupture des massifs d'appui ?

→ Manque de données expérimentales

Visite technique CFMR - Tournemire, le 9 juin 2011

IRSN

6

Objectifs des essais SEALEX (SEaLing performAnce EXperiment)

... en relation avec la future évaluation de sûreté du concept de l'Andra (2012 & 2015)...

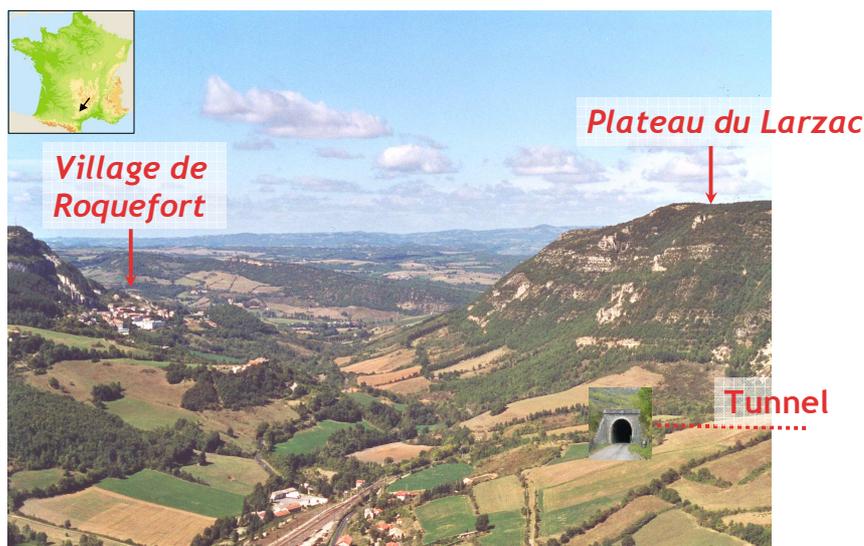
■ Evaluer l'influence de certains paramètres au regard de la performance hydraulique globale des noyaux argileux gonflants à long terme

- En situations nominales
- Pour différents choix technologiques
- En situation altérée (perte du confinement mécanique)

à partir d'essais in situ dans un environnement (conditions) et à une échelle représentatifs

→ Station Expérimentale de Tournemire (SET)

Le site de Tournemire... vue générale



Le site de Tournemire... un environnement touristique



Viaduc de Millau (L 2460 m, H 343 m)



Les caves de Roquefort



Les Gorges de la Jonte

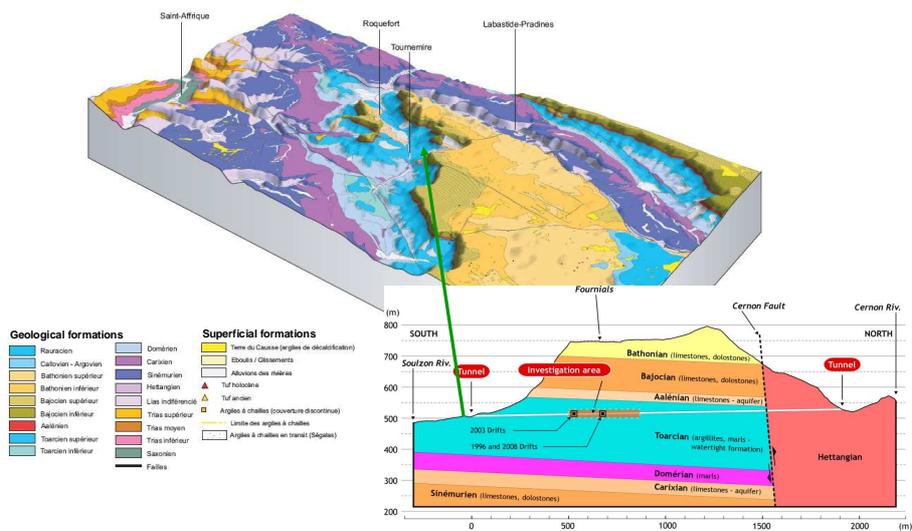


La Cavalerie (village templier)

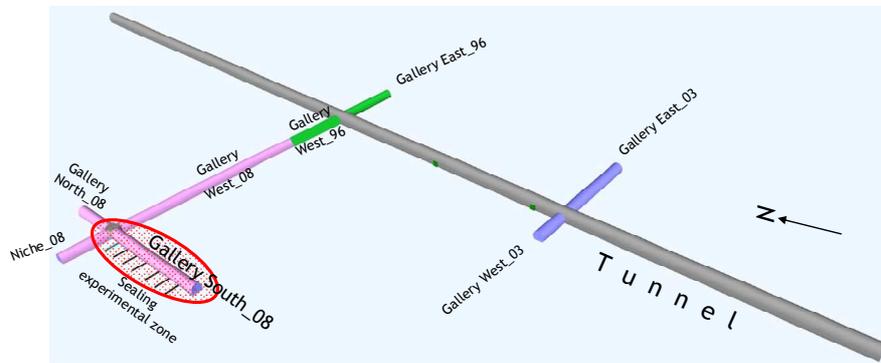


St Jean d'Alcas (village templier)

Le site de Tournemire... un tunnel de 120 ans creusé dans les argilites toarciennes



Le site de Tournemire... progressivement développé en URL depuis 1992



Phénoménologie & hypothèses sous-jacentes

Conditions propres au site de Tournemire (σ , R_c)...

→ EDZ limitée en terme d'étendue & Δk (ouvrages récents)...

- Performance H du scellement essentiellement contrôlée par le noyau et l'interface bentonite/roche-hôte

Accent mis sur le noyau/interface et son comportement hydraulique à long terme (i.e. après saturation complète)

→ Phénomènes considérés :

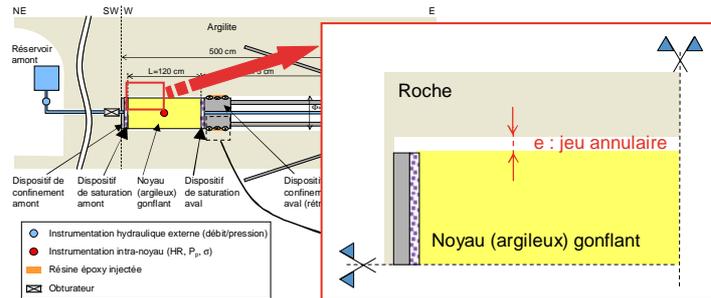
- Saturation forcée
- Gonflement du noyau
- Colmatage de l'interface noyau/roche hôte

→ Phénomènes négligés (simplification en première approche) :

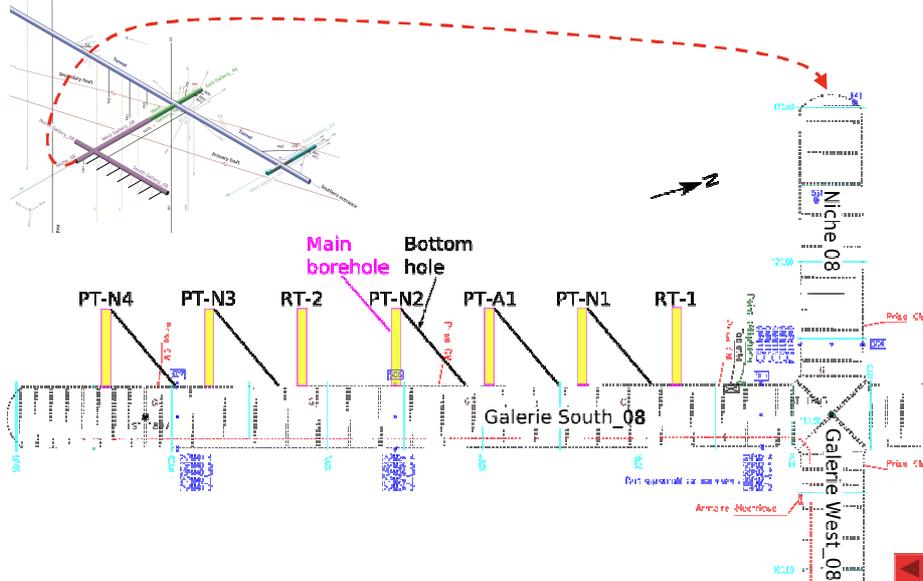
- Production et transfert d' H_2 gazeux
 - Cycle thermique (alvéoles HA)
- } + Hypothèses implicites...

Schéma de principe des essais *in situ*

- Essais de scellement mis en place en forages gros diamètre
- Noyau argileux gonflant confiné → performance hydraulique
- Jeu annulaire de mise en place (e)
- Dispositif de saturation 'forcée' aux faces amont et aval (très faible k_{arg})
- Dispositif d'étanchéité du forage de fond (packer)
- Instrumentation intra-noyau (pas dans la roche hôte) des champs HHM
- Conception non perturbante / objectif performance hydraulique (instrumentation sans fil, saturation artificielle)
- Essais de performance : gradient amont → aval (pulse, injection...)



Localisation des essais



Éléments de pré-dimensionnement

■ Géométrie vs. cinétique (optimisation durée essais) :

- Paramètres d'entrée [k_{arg} , k_{MX80} , $S_r(s)$, $k_r(S_r)$] et conditions aux limites réalistes
- Evaluation de la cinétique de resaturation en regard des paramètres dimensionnels : L(120-180 cm), R(20-30 cm), e(0-2 cm)

■ Géométrie vs. représentativité des essais :

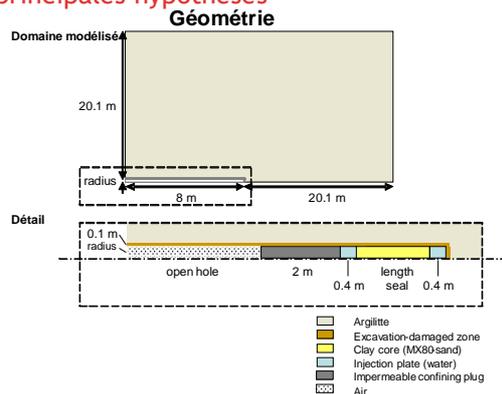
R=30 cm

- dimension proche noyau d'alvéole HA (p.m.)
 - plus faible impact des tolérances (géométriques) sur P_g
 - densité sèche initiale plus faible (optimisation de la force de pressage)
- L=120 cm (4R), p.m. représentatif des noyaux d'alvéoles HA 'sains' à 10^6 ans (i.e. hors perturbation alcaline, cf. Dossier 2005)

➔ Dimensionnement retenu :

Longueur L=120 cm ; Rayon R=30 cm ; Jeu annulaire e=2 cm

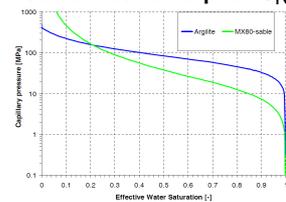
Modélisation HH de la phase de saturation : principales hypothèses



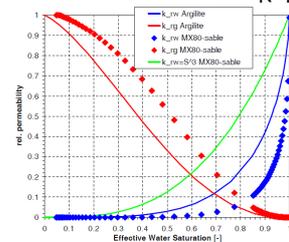
Conditions initiales et aux limites, chargements

- Argillites : $S_r=1$, $P_{p0}=800$ kPa, $k_{arg}=10^{-21}$ à 10^{-20} m²
- EDZ forage : 10 cm extension radiale, $S_r=0,9$, $k_{EDZ}=10^{-20}$ m²
- Noyau argileux : $S_r=0,7$, $k_{MX80}=2,4 \cdot 10^{-21}$ m²
- Jeu annulaire : e = 0 cm ou 2 cm
- Chambres de saturation : $S_r=1$, $P_{p0}=P_{atm}$
- Forage ouvert avec variations saisonnières de HR

Isothermes de sorption $S_r(s)$

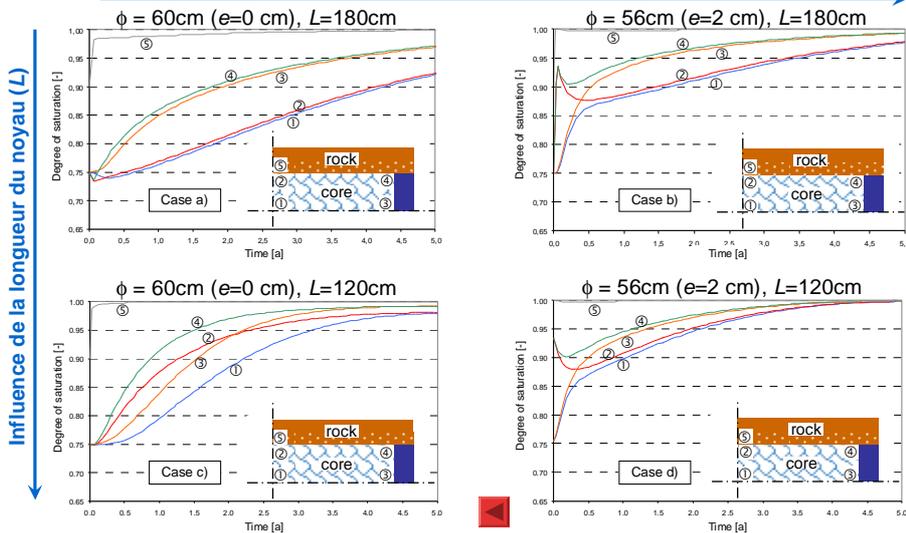


Perméabilités relatives $k_r(S_r)$



Modélisation HH de la phase de saturation : évolution temporelle de $S_r(r,z)$

Influence du vide radial (e)

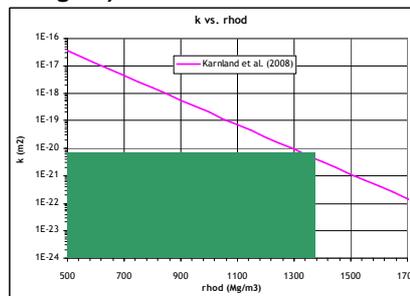
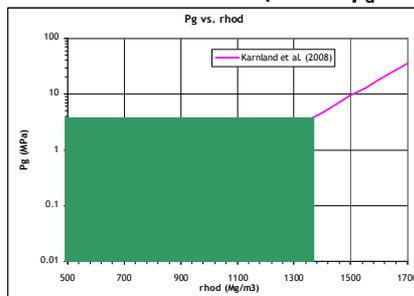


Spécifications initiales des noyaux à base de bentonite (MX80)

Valeurs dérivant du concept de stockage et des conditions propres à la SET

	Valeur cible	Minimum	Maximum
Pression de gonflement P_g	3-4 MPa	1 MPa	8 MPa
Conductivité hydraulique K	$< 10^{-11}$ m/s	-	-
Perméabilité k	$< 10^{-18}$ m ²	-	-

Spécifications (P_g et k) déduites d'études antérieures
($1335 < \rho_d < 1375$ Mg/m³)



Principales propriétés des argilites de Tournemire

Données pétrophysiques

Porosité : 7 à 8%
teneur en eau : 3,5 à 4%

Paramètres mécaniques

Comportement anisotrope
(isotropie transverse)

$E_1 = 24,2$ GPa

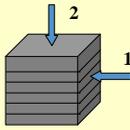
$E_2 = 9,3$ GPa

$R_c = 20$ à 57 MPa

$R_t = 3,6$ MPa

$\phi = 20^\circ$

$c = 6,7$ à 10,8 MPa

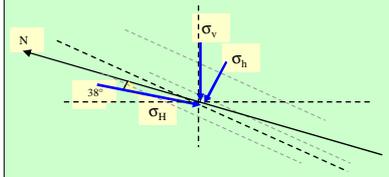


Contraintes *in situ*

$\sigma_v = 3,8 \pm 0,4$ MPa, N72°E (dip 80°)

$\sigma_h = 2,1 \pm 1,0$ MPa, N72°E (dip 10°)

$\sigma_H = 4,0 \pm 2,0$ MPa, N162°±15°E



Paramètres hydrauliques

$P_{\text{pore}} \approx 0,5$ MPa

Perméabilité : $k \approx 10^{-21}$ m²

Description du programme des essais

Choix de conception (p.m.)

- L'influence des paramètres est testée au regard des propriétés hydrauliques (essais de performance)
- Aucun capteur à fil n'est installé dans le noyau afin de limiter les écoulements préférentiels (chemins de câbles)

→ Essais de référence

- Quantifier les champs Hydriques-Hydro-Mécaniques (S_r , P_{pore} , σ - P_g) au sein du noyau argileux (phase de saturation) avec une instrumentation intra noyau 'classique' et abondante

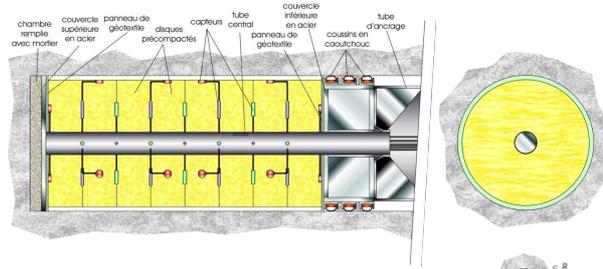
→ Essais de performance

- Instrumentation intra noyau 'sans fils' réduite pour suivre les champs HHM + instrumentation classique à la frontière aval
- Tests hydrauliques pour déterminer les propriétés hydrauliques globales (perméabilité, présence de fuites) des scellements correspondants et pour différentes conditions représentatives

Schémas de principe de l'instrumentation intra noyau

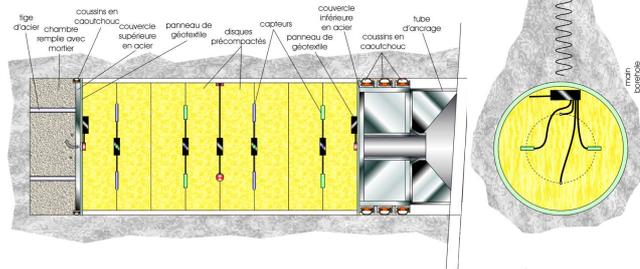
Pour chaque essai de référence

44 capteurs à fils :
16 σ , 14 P_p , 14 HR



Pour chaque essai de performance

21 capteurs sans fils :
5 σ , 8 P_p , 8 HR

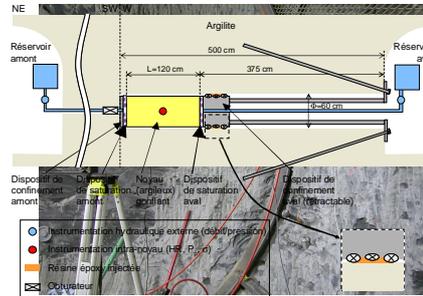
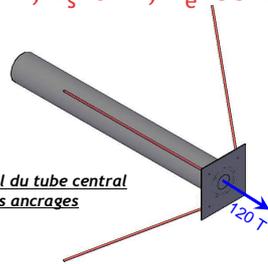


Le programme expérimental est basé sur une approche paramétrique progressive

	Tests de référence	Tests de performance	Géométrie intra-noyau Conditionnement du noyau Composition (MX80/sable)	Schéma du noyau	Conditions altérées	Date de mise en place
Cas de base	RT-1	PT-N1	Disques monolithiques Précompacté (70/30)		Non	01/2011
						06/2011
	-	PT-N2	Disques + joints internes (4/4) Précompacté (70/30)		Non	12/2011
	-	PT-A1	Disques monolithiques Précompacté (70/30)		Perte du confinement	06/2012
	RT-2	PT-N3	Pellets/poudre Compacté in situ (100/0)		Non	12/2012
-	PT-N4	Disques monolithiques Précompacté (20/80)		Non	06/2012	
						12/2013

Essai d'arrachement (traction) sur ancrages scellés ($\phi 32$ mm, $L_s = 3$ m, $F_e = 88$ T)

Détail du tube central
et des ancrages

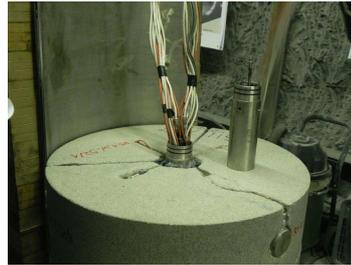
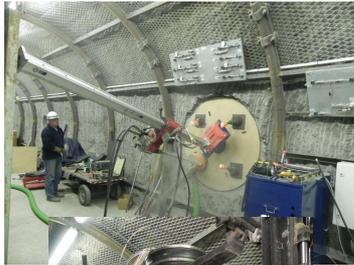


2 essais d'arrachement réalisés

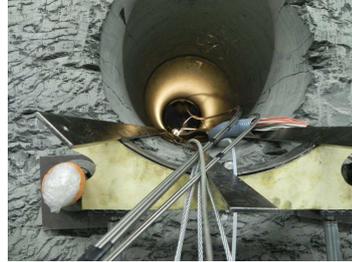
- n° 1 : rupture non atteinte à 64 T
- n° 2 : rupture (du filet !) à 42 T

Solution retenue validée (>> 30 T)

Mise en place de l'essai RT-1 (01/2011)



Mise en place de l'essai RT-1 (01/2011)

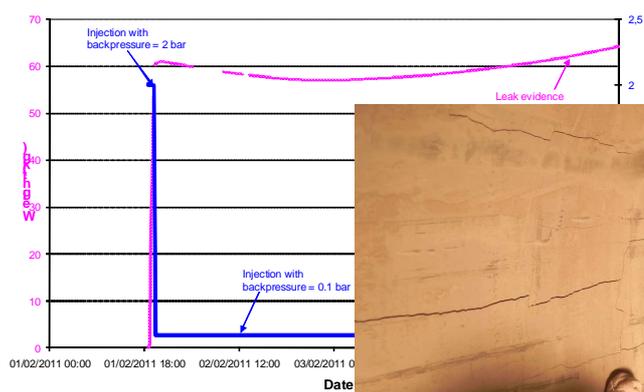


Visite technique CFMR - Tournemire, le 9 juin 2011

IRSN

25

Essai RT-1 : Phase de mise en eau initiale



Avancement de l'essai :

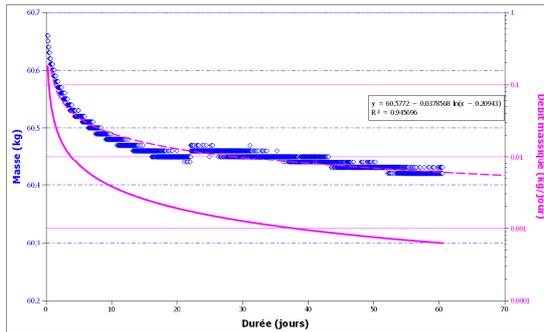
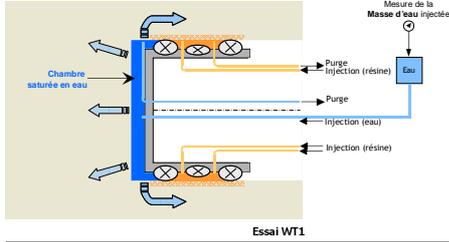
- Injection stoppée mi-février après détection d'une fuite (~0.3 L/h)... → fractures H
- Test d'une solution alternative depuis avril ▶
- Implémentation et reprise de la saturation mi-juin

Visite technique CFMR - Tournemire, le 9 juin 2011

IRSN

26

Principe de la solution alternative

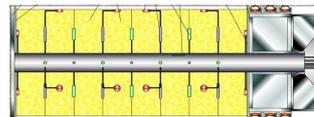


Résultats :

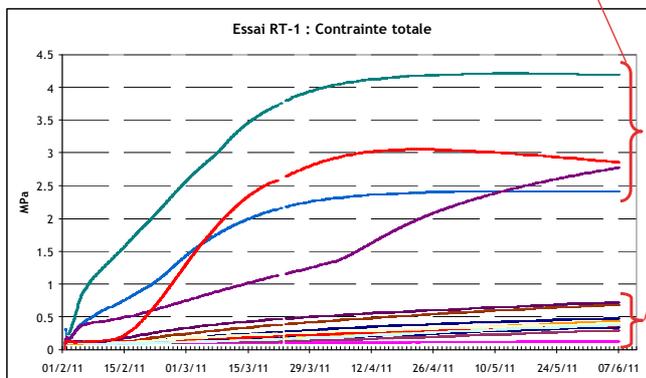
- pas de fuite visible
- diminution régulière de la perte (prise) d'eau (~0.6 L/j)
- poursuite de l'essai pour interprétation (k) des essais de performance

Essai RT-1 : Résultats préliminaires des mesures de la contrainte totale (P_g)

Capteurs axiaux



Capteurs radiaux



Bilan et perspectives des essais *in situ* à la SET

- Ajustements expérimentaux rendus nécessaires par les conditions de parois
- Phases de saturation : $t_0 + 4$ ans
- Réalisation des essais H de performance (post-saturation) attendus à une échéance > à 2015

... et également des actions liées hors de la SET

- R&D liée au comportement de la bentonite
 - Validation des spécifications (densité, perm., Pc) pour toutes les compositions (70/30, 100/0, 20/80) et les conditionnements
 - Comportement en régime non-saturé (courbes de rétention, perméabilité relative, propriétés mécaniques)
 - Propriétés des interfaces bentonite / bentonite
 - Comportement différé intrinsèque de la bentonite
- } Thèse en cours (ENPC)
- Simulations numériques
 - Phase de saturation des essais *in situ*
 - Modélisation HHM des interfaces intra-noyaux
 - Modélisation HM de l'essai de retrait
 - Coopération
 - Collaboration avec CCSN (CA)
 - Proposé comme Test-Case de modélisation du futur DECOVALEX

Plus de détails lors de la visite...

