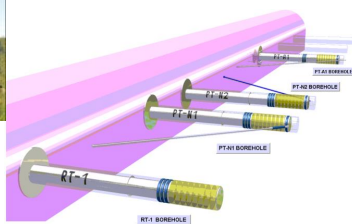


IRSN

 INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Faire avancer la sûreté nucléaire


Les essais de scellement SEALEX en cours au laboratoire souterrain de Tournemire


Aitemin
Centro Tecnológico


Jean-Dominique BARNICHON
Nadia MOKNI
Pierre DICK

PRP-DGE/SRTG/LETIS

Séance technique du
CFMR/AFTES

CNAM, Paris, le 17 mars 2016

1. Contexte et objectifs
2. Principe et description
3. Quelques résultats in situ
4. Modélisations HM de la saturation
5. Bilan et perspectives

1. Contexte et objectifs

Comment les scellements fonctionnent-ils ?

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

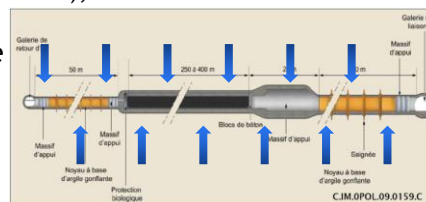
■ Noyaux encadrés par des massifs d'appui (**béton, aciers**)
 → Confinement mécanique

■ Conditions in-situ (**eau porale**)

→ Saturation progressive

→ Gonflement (fermeture des "vides")

→ Contrainte ("pression de gonflement")



Les scellements contribuent au transfert majoritairement diffusif des RNs par la BG (phase post-fermeture), y.c. en situations altérées

1. Contexte et objectifs

Objectifs des essais SEALEX (SEaLing performAnce EXperiment)

En relation avec l'évaluation de sûreté du concept de stockage

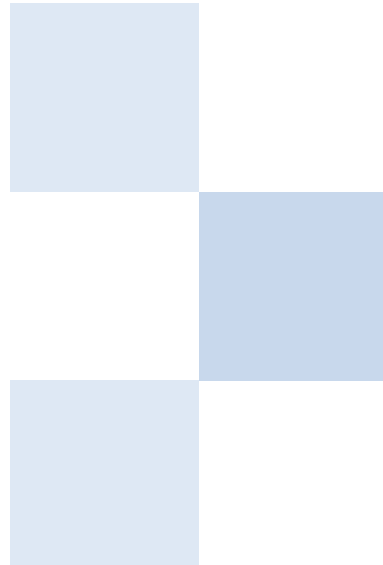
■ Evaluer l'influence de certains paramètres au regard de la performance hydraulique globale des noyaux argileux gonflants à long terme

- 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

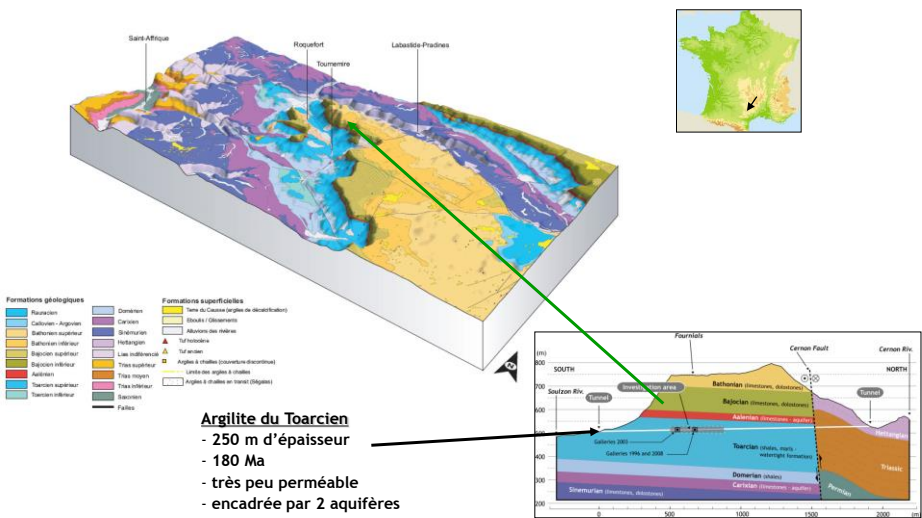
→ Laboratoire souterrain de Tournemire

1. Contexte et objectifs
2. Principe et description
3. Quelques résultats in situ
4. Modélisations HM de la saturation
5. Bilan et perspectives



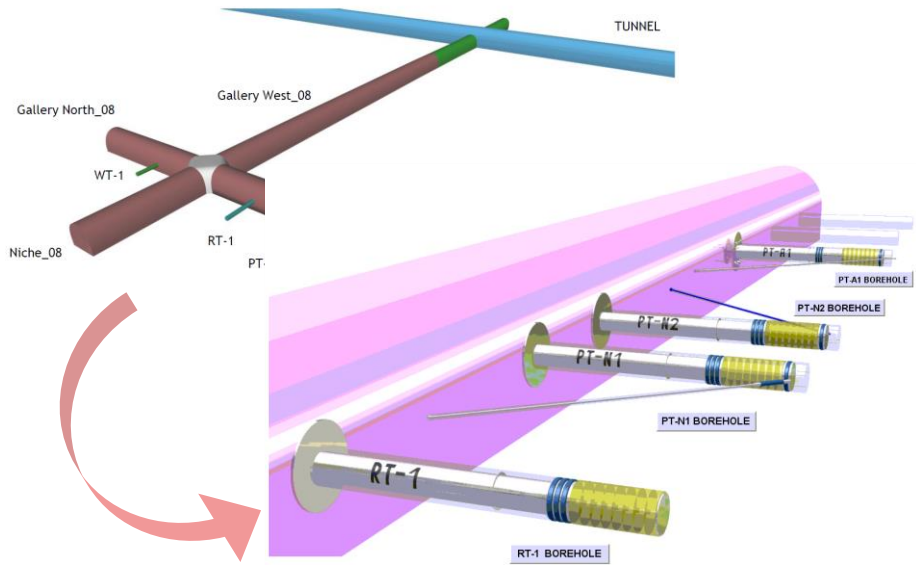
Les activités de recherche menées par l'IRSN à Tournemire

Le site de Tournemire... un tunnel de 130 ans creusé dans les argilites toarciennes et des galeries récentes (1966, 2003, 2008)



2. Principe et description

Mise en place dans la galerie Sud 2008



Les essais SEALEX - Séance technique du CFMR/AFTES - CNAM, Paris, le 17 mars 2016

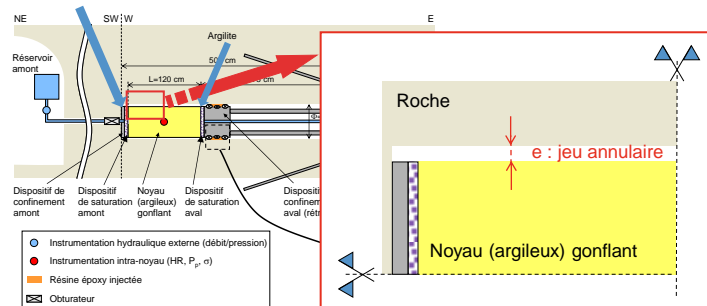
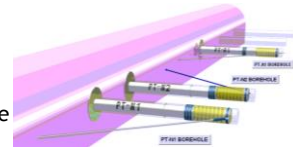
IRSN

7

2. Principe et description

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_{argilite})
- Dispositif d'étanchéité du forage de fond (packer, résine)
- Instrumentation intra-noyau (pas dans la roche hôte) des champs HHM
- Conception non perturbante / objectif performance hydraulique (instrumentation sans fil, saturation artificielle)
- 5 essais de performance : gradient amont → aval (pulse, injection...)



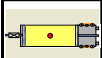





Les essais SEALEX - Séance technique du CFMR/AFTES - CNAM, Paris, le 17 mars 2016

IRSN

8

2. Principe et description

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
Variations / cas de base	-	PT-N2	Disques + joints internes (4/4) Précompacté (70/30)		Non	12/2011
	-	PT-A1	Disques monolithiques Précompacté (70/30)		Perte du confinement mécanique	06/2012
	-	PT-N3	Pellets/poudre Compacté in situ (100/0)		Non	02/2013
	-	PT-A2	Pellets/poudre Compacté in situ (100/0)		Perte du confinement mécanique	10/2013

Les essais SEALEX - Séance technique du CFMR/AFTES - CNAM, Paris, le 17 mars 2016

IRSN

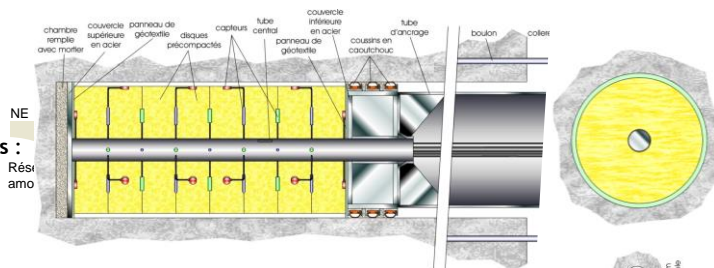
9

2. Principe et description

L'instrumentation intra noyau

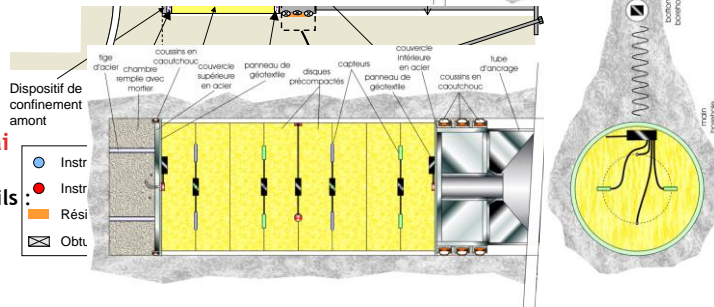
Pour l'essai de référence

44 capteurs filaires :
16 σ , 14 P_p , 14 HR



Pour chaque essai de performance

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



Les essais SEALEX - Séance technique du CFMR/AFTES - CNAM, Paris, le 17 mars 2016

IRSN

10

2. Principe et description

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



Quelques challenges techniques...



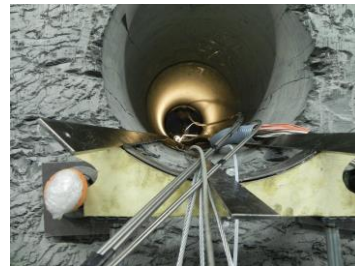
Les essais SEALEX - Séance technique du CFMR/AFTES - CNAM, Paris, le 17 mars 2016

IRSN

11

2. Principe et description

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



Quelques challenges techniques...



Les essais SEALEX - Séance technique du CFMR/AFTES - CNAM, Paris, le 17 mars 2016

IRSN

12

2. Principe et description

Phasage des essais

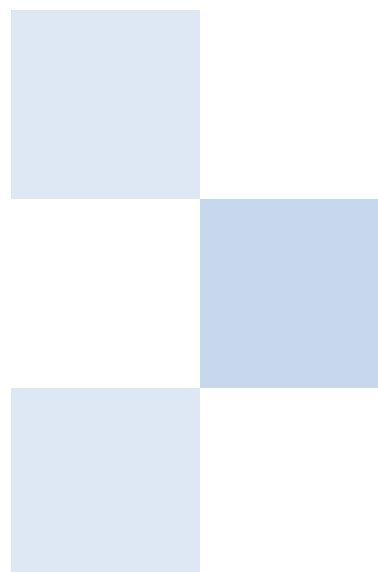
Pour tous les essais PT-xx :

- 1 - Saturation
- 2 - Essais hydrauliques

Essais PT-A1 et PT-A2 :

- 3 - Relâchement du confinement ($\rightarrow 20\% \varepsilon_{axiale}$)
- 4 - Essais hydrauliques

1. Contexte et objectifs
2. Principe et description
3. Quelques résultats in situ
4. Modélisations HM de la saturation
5. Bilan et perspectives



3. Quelques résultats in situ

Essai RT-1 (phase de saturation) : les ajustements



- Injection stoppée mi-février 2011 après détection fuite (~ 0.3 L/h)... → fractures H
- Solution alternative
- Implémentation et reprise de la saturation mi-juin 2011

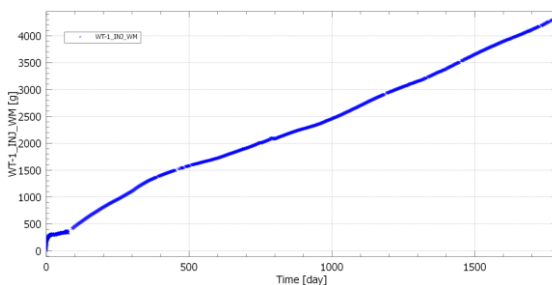
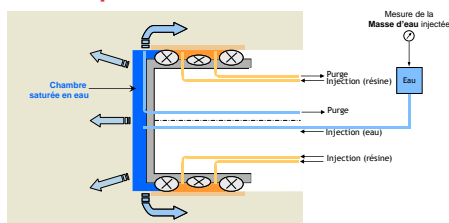
Les essais SEALEX - Séance technique du CFMR/AFTES - CNAM, Paris, le 17 mars 2016

IRSN

15

3. Quelques résultats in situ

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 des essais de performance

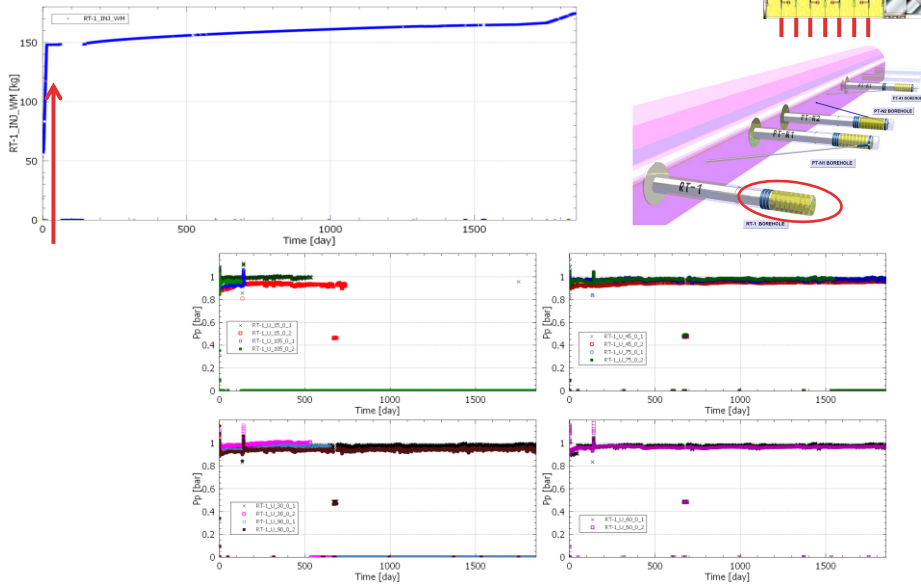
Les essais SEALEX - Séance technique du CFMR/AFTES - CNAM, Paris, le 17 mars 2016

IRSN

16

3. Quelques résultats in situ

Essai RT-1 (phase de saturation): m_w & u_w



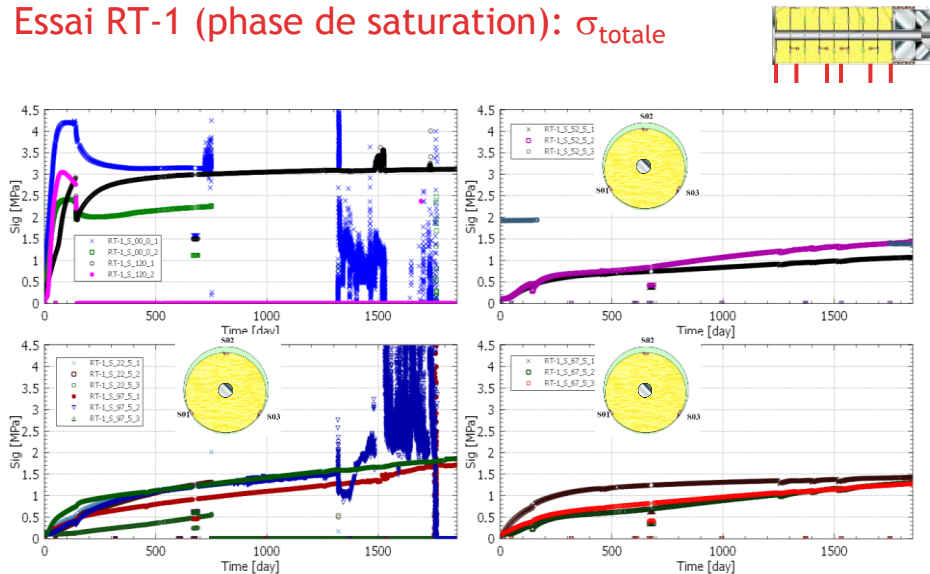
Les essais SEALEX - Séance technique du CFMR/AFTES - CNAM, Paris, le 17 mars 2016

IRSN

17

3. Quelques résultats in situ

Essai RT-1 (phase de saturation): σ_{totale}



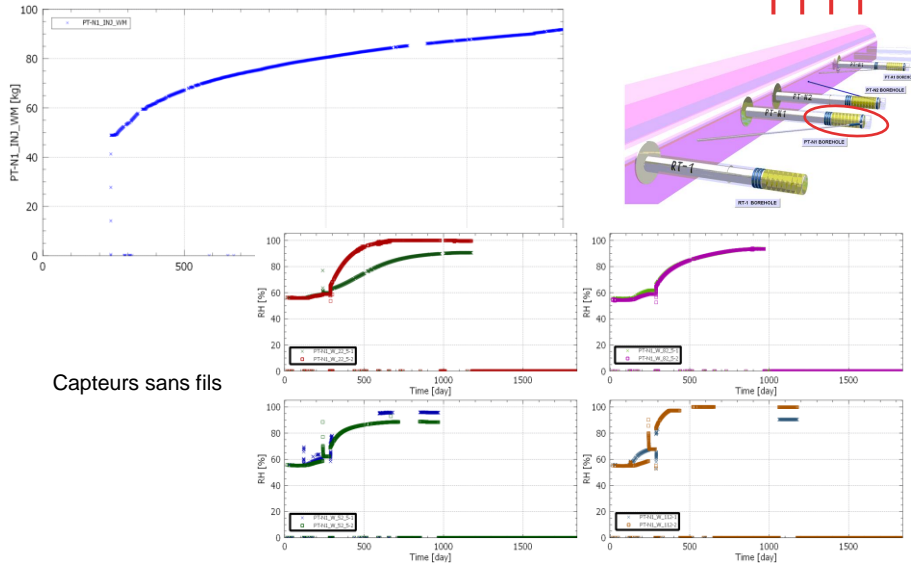
Les essais SEALEX - Séance technique du CFMR/AFTES - CNAM, Paris, le 17 mars 2016

IRSN

18

3. Quelques résultats in situ

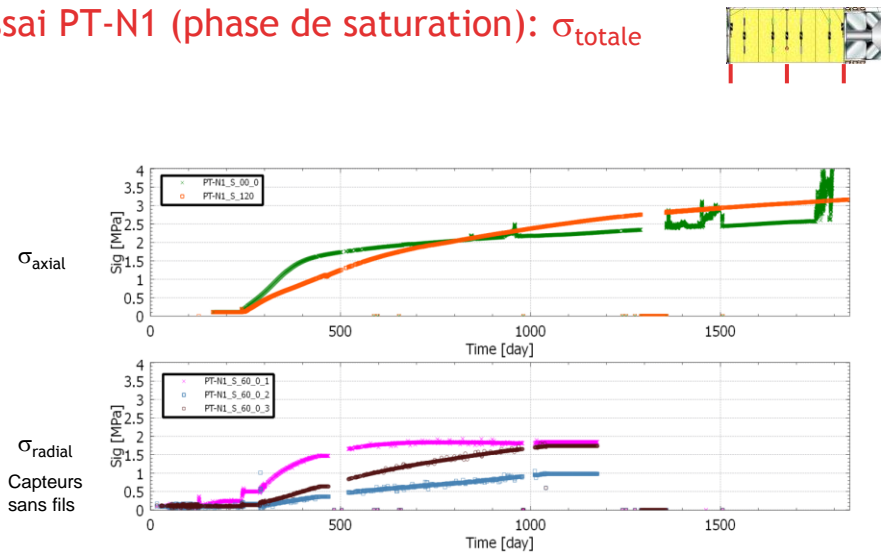
Essai PT-N1 (phase de saturation): m_w & RH



Capteurs sans fils

3. Quelques résultats in situ

Essai PT-N1 (phase de saturation): σ_{totale}



Capteurs sans fils

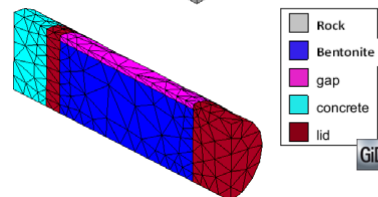
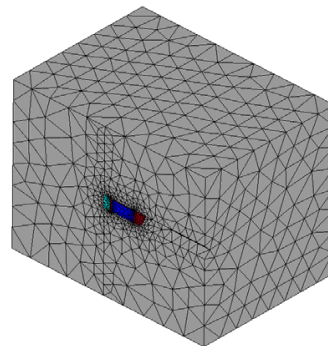
1. Contexte et objectifs
2. Principe et description
3. Quelques résultats in situ
4. Modélisations HM de la saturation
5. Bilan et perspectives

4. Modélisations HM

Essai PT-1 (phase de saturation)

Code_Bright + Modèle BBM

70/30 MX80 bentonite/sand				Parameter relationships	
Parameters	Symbols	Units	Values		
Poisson's ratio	ν (*)	-	0.35		
Parameters for elastic compressibility against mean stress change	κ	-	0.021	$d\epsilon_v^e = \frac{k}{1+e} \frac{dp'}{p'} + \frac{k_v}{1+e} \frac{ds}{s+p_a}$	
Parameters for elastic volumetric swelling against suction change	κ_s	-	0.05	Where $d\epsilon_v^e$ is elastic volumetric strain p' is mean net stress e is void ratio s is suction p_a is atmospheric pressure	
Elasto-plastic volumetric compressibility	$\lambda(0)$	-	0.13		
Parameters to define LC yield curve	r	-	0.75		
	β	MPa ⁻¹	0.25	$p_s = p' \left(\frac{p'_c}{p'} \right)^{\frac{100-s_{0c}}{100-s_{0c}}}$	
Reference stress	p'	MPa	0.01	where	
Slope of critical state	M	-	1.07		
Parameter for the plastic potential	α	-	1	$\lambda(s) = \lambda(0) \left[(1-r) \exp(-\beta s) + r \right]$	
Initial pre-consolidation stress for saturated conditions	p_0^*	MPa	0.66		



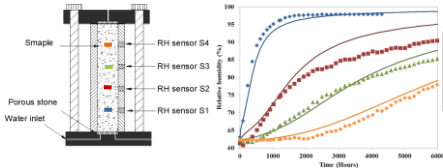
4. Modélisations HM

Calibration et modélisation sur maquette

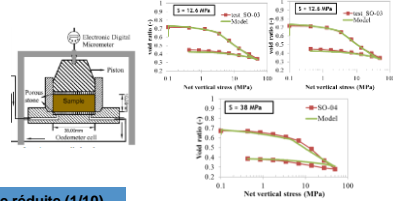
Modélisation des essais réalisés au laboratoire et in situ sur les mélanges compactés sable/bentonite

Modélisation des essais de laboratoire

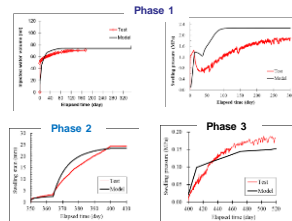
Calibration des paramètres hydraulique du modèle



Calibration des paramètres mécanique du modèle



Modélisation des essais à échelle réduite (1/10)



Phase 1: Saturation
Phase 2: Gonflement libre
Phase 3: Confinement

(Mokni & Barnichon, Eng. Geol, 2016)

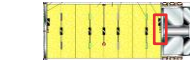
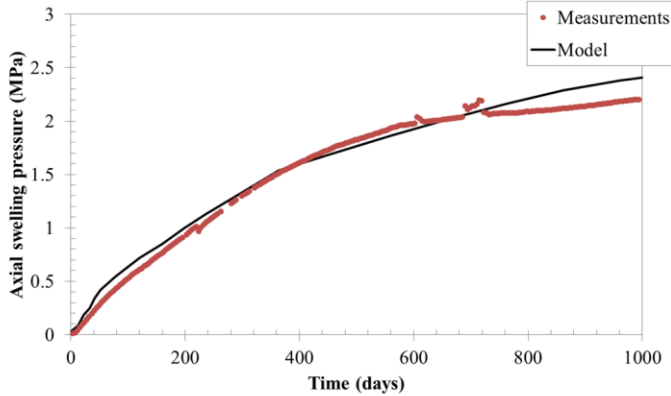
Les essais SEALEX - Séance technique du CFMR/AFTES - CNAM, Paris, le 17 mars 2016



23

4. Modélisations HM

Essai PT-N1 (phase de saturation) : $\sigma_{axial}(t)$ Data vs. modèle



(Mokni & Barnichon, Eng. Geol, 2016)

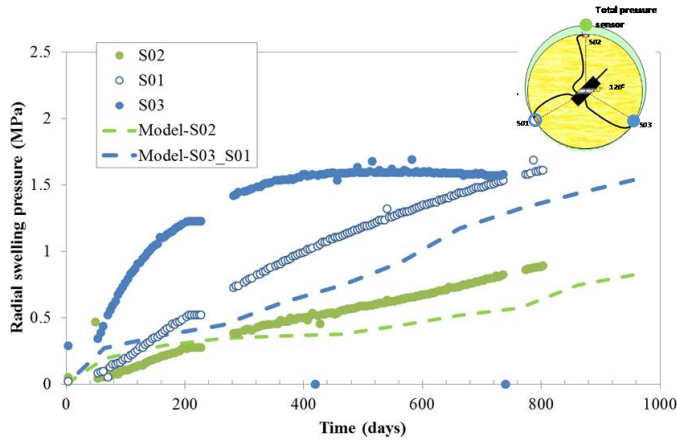
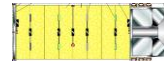
Les essais SEALEX - Séance technique du CFMR/AFTES - CNAM, Paris, le 17 mars 2016



24

4. Modélisations HM

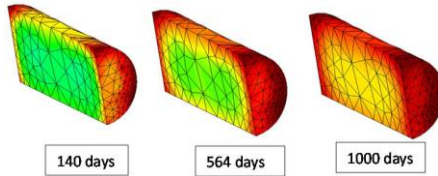
Essai PT-N1 (phase de saturation) : $\sigma_{\text{radial}}(t)$
Data vs. modèle



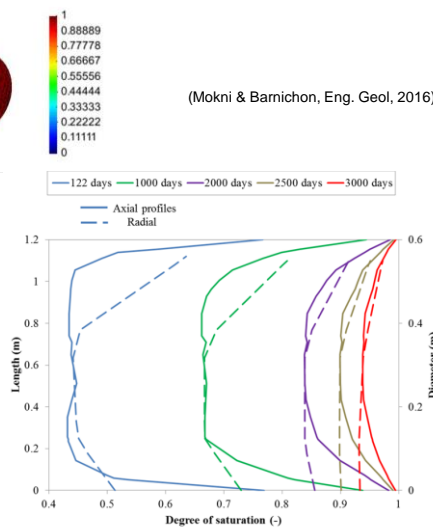
(Mokni & Barnichon, Eng. Geol, 2016)

4. Modélisations HM

Essai PT-N1 (phase de saturation) : S_r
Modèle



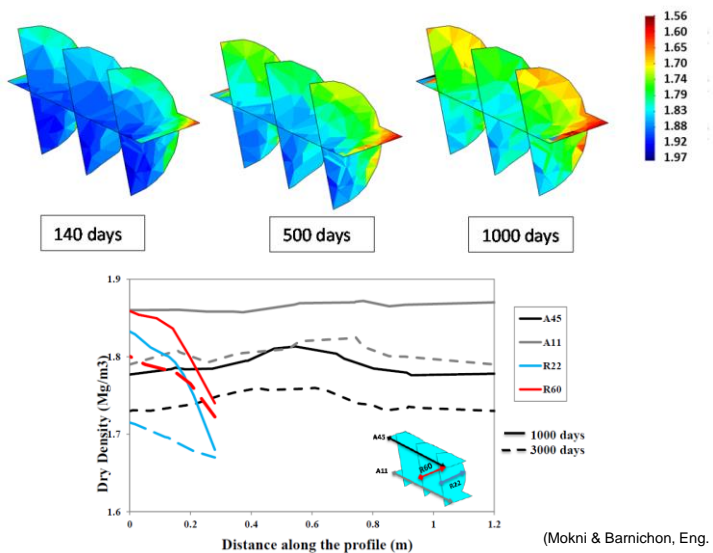
(Mokni & Barnichon, Eng. Geol, 2016)



4. Modélisations HM

Essai PT-N1 (phase de saturation) : ρ_d

Modèle



(Mokni & Barnichon, Eng. Geol, 2016)

Les essais SEALEX - Séance technique du CFMR/AFTES - CNAM, Paris, le 17 mars 2016

IRSN

27

1. Contexte et objectifs
2. Principe et description
3. Quelques résultats in situ
4. Modélisations HM de la saturation
5. Bilan et perspectives

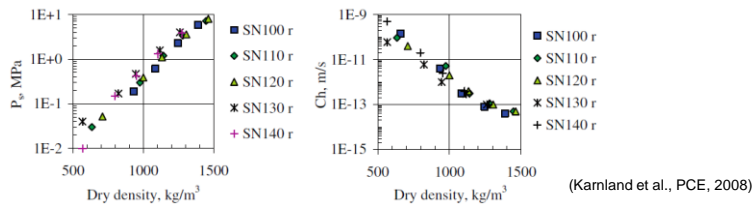
Les essais SEALEX - Séance technique du CFMR/AFTES - CNAM, Paris, le 17 mars 2016

IRSN

28

5. Bilan et perspectives

- ▮ Ajustements expérimentaux rendus nécessaires par les conditions de parois (essais séquentiels prise en compte du REx) →
- ▮ Absence de fuite du dispositif : bilan des échanges massiques d'eau pertinents pour les futurs tests de performance
- ▮ Phase de saturation : environ $t_0 + 5$ à 10 ans
- ▮ Modélisations pertinentes
- ▮ Réalisation des tests hydrauliques de performance (post-saturation) attendus à échéance > à 2016
- ▮ Etat "final" et hétérogénéité de densité à saturation dans les noyaux...



Les essais SEALEX - Séance technique du CFMR/AFTES - CNAM, Paris, le 17 mars 2016

IRSN

29

Merci pour votre attention



Les essais SEALEX - Séance technique du CFMR/AFTES - CNAM, Paris, le 17 mars 2016

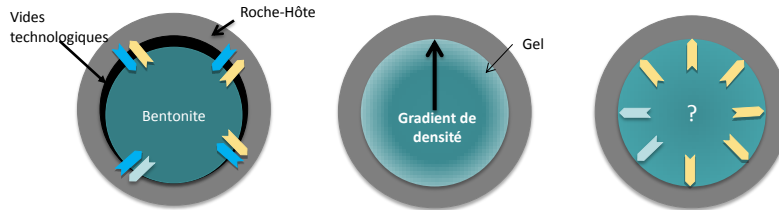
IRSN

30

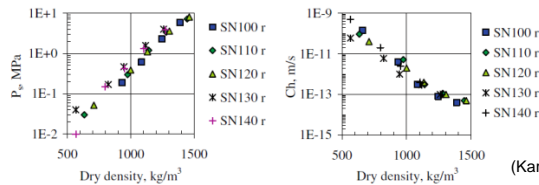
5. Bilan et perspectives

Les hétérogénéités de densité et leur évolution

En présence de jeux technologiques (macro)



Quelle évolution temporelle du gradient de densité
(ρ_d est un paramètre dimensionnant pour P_g et k) ?



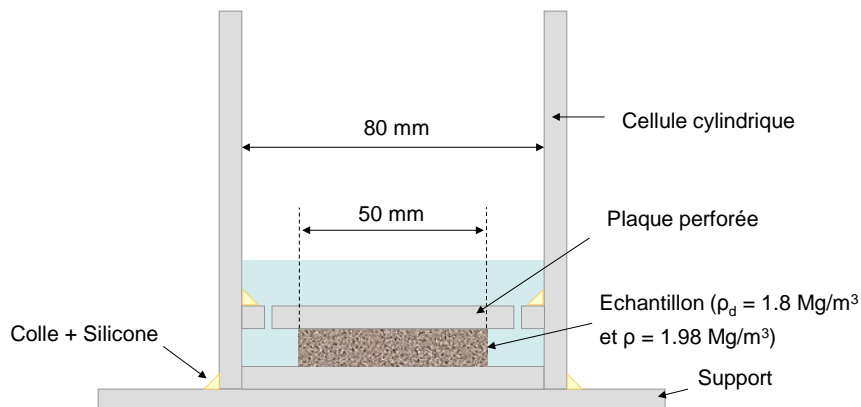
(Karnland et al., PCE, 2008)

Les essais SEALEX - Séance technique du CFMR/AFTES - CNAM, Paris, le 17 mars 2016

IRSN

31

Homogénéisation des matériaux argileux - Gonflement radial

Cellule de gonflement avec suivi μ tomorX

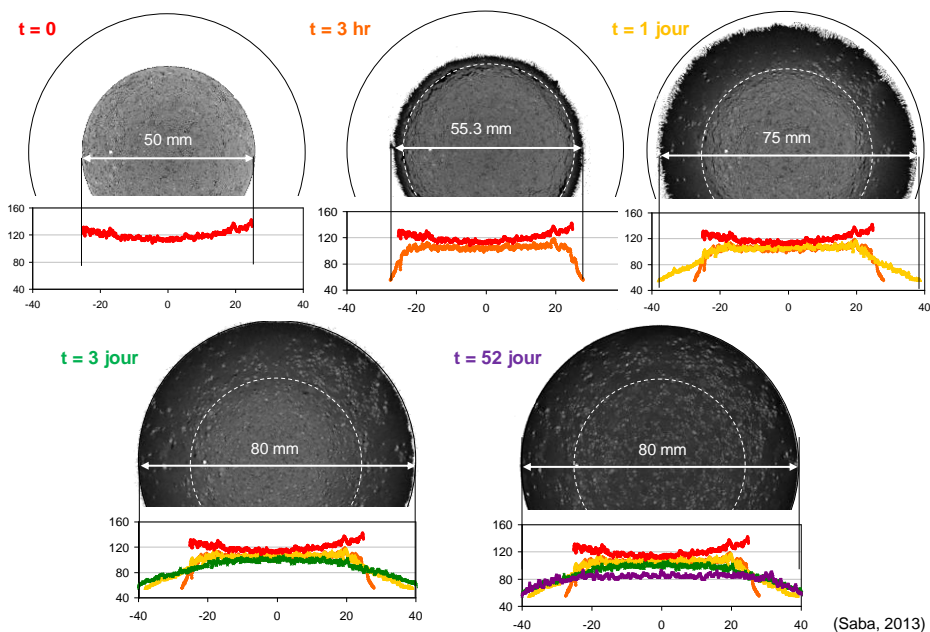
(Saba, 2013)

Les essais SEALEX - Séance technique du CFMR/AFTES - CNAM, Paris, le 17 mars 2016

IRSN

32

Homogénéisation des matériaux argileux - Gonflement radial



(Saba, 2013)

Les essais SEALEX - Séance technique du CFMR/AFTES - CNAM, Paris, le 17 mars 2016

IRSN

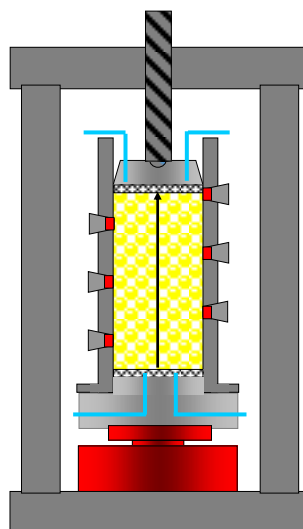
33

Homogénéisation des matériaux argileux - Gonflement axial

Maquette des essais SEALEX

Essai de perte de confinement d'un noyau argileux

- Relâchement du piston
- Gonflement axial limité (20%)
- Gradient de densité induit



(Saba, 2013)

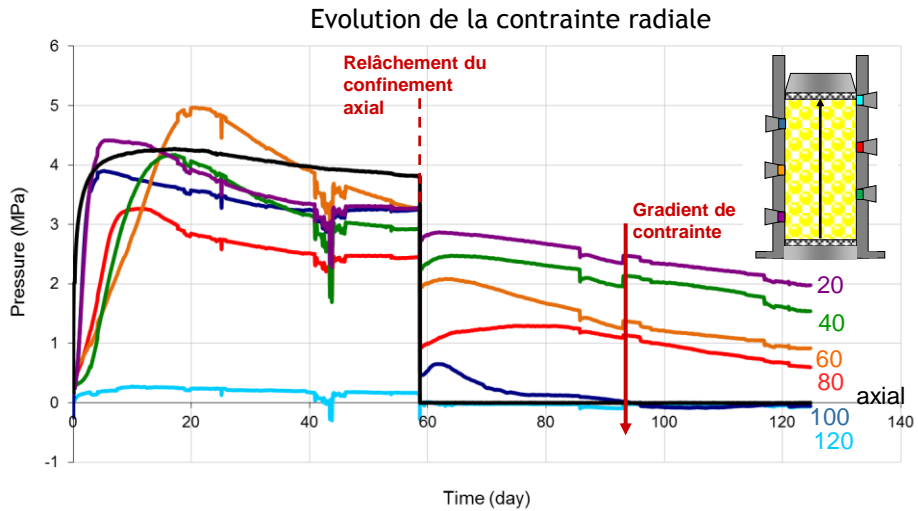
Les essais SEALEX - Séance technique du CFMR/AFTES - CNAM, Paris, le 17 mars 2016

IRSN

34

Homogénéisation des matériaux argileux - Gonflement axial

Mesures locales des contraintes radiales



(Saba, 2013)