Les matériaux argileux gonflants des ouvrages de fermeture de Cigéo

Claude Gatabin (CEA) – Frédéric Plas (Andra) – Nicolas Michau (Andra)

Plan de l'exposé

1. Le contexte

- La sûreté après-fermeture de Cigéo, les différents ouvrages de fermeture de Cigéo, et leurs rôles
- Les concepts actuels d'ouvrages de fermeture de Cigéo et leurs spécifications (de l'ouvrage aux matériaux)
- Les objectifs de démonstration pour le DAC

2. Les questionnements technologiques et scientifiques

- La mise en œuvre industrielle des ouvrages de fermeture
- Le comportement sur le long terme

3. L'état des connaissances sur la mise en œuvre industrielle : de l'échelle du matériau à l'échelle de l'ouvrage

- Les techniques de mise en forme
- Les techniques de mise en place

4. L'état des connaissances sur les matériaux argileux gonflants : des propriétés au comportement en situations de stockage, du matériau à l'ouvrage

- Les argiles gonflantes
- Les propriétés hydrauliques et hydromécaniques non saturées et saturées
- Le comportement en situation de stockage : transfert de gaz et perturbation alcaline

5. Conclusion (questionnements résiduels)

Schéma de principe de Cigéo

Les ouvrages de fermeture de Cigéo

Les fonctions de sûreté en après fermeture

La sûreté du stockage à long terme est assurée par la couche du callovo-oxfordien et les ouvrages de fermeture de liaison surface-fond

Les ouvrages de fermeture de Cigéo

Les options techniques

❑ L'Andra retient des objectifs de performance **raisonnables** et des options techniques **prudentes** en vue de la demande d'autorisation de création, fondés sur :

- Les évaluations de sûreté,
- Les connaissances acquises sur les argilites et les matériaux,
- La faisabilité technologique de la construction,
- La capacité de démonstration.

❑ Pour chaque composant du scellement

1. Noyau à base d'argile gonflante
2. Interface entre le noyau et la roche
3. Massifs d'appui
4. Zone d'argilite au droit du noyau

Les ouvrages de fermeture de Cigéo

Les schémas de principe actuels pour les liaisons surface-fond

Puits

Descenderie

Les ouvrages de fermeture de Cigéo

Les schémas de principe actuels pour les galeries de liaison

Les ouvrages de fermeture de Cigéo

Les performances des composants

❑ Noyau à base d'argile gonflante

- Assurer la limitation du flux d'eau
- Limiter les déformations du noyau et de la roche à son pourtour pour limiter l'endommagement
 - ❖ Choix d'un matériau à base d'argile gonflante
 - ✓ *Faible perméabilité : $\leq 10^{-11} \text{ m.s}^{-1}$*
 - ✓ *Pression de gonflement*

❑ Massifs d'appui

- Garantir une saturation du noyau à volume constant
- Préserver les propriétés (i.e. fonctions) des autres composants
 - ❖ Choix de bétons bas pH
 - ✓ *Faible chaleur d'hydratation, faible retrait....*

Les ouvrages de fermeture de Cigéo

L'interface noyau argileux / roche

- L'ouvrage destiné à recevoir un ouvrage de fermeture est revêtu pendant la phase d'exploitation
- Quelle est la performance hydraulique de l'ensemble « noyau + revêtement » ?

Maintien du revêtement	Dépose du revêtement	Dépose partielle du revêtement

$K_{\text{éq.}} \text{ pilotée par } K_{\text{revêtement}}$ <ul style="list-style-type: none">- quelle que soit K_{noyau}- quelles que soient l'épaisseur et la nature du revêtement $\Rightarrow K_{\text{éq.}} > 10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$	$K_{\text{éq.}} = K_{\text{noyau}}$ <p>(contact direct noyau/roche)</p> <p>compte-tenu des propriétés des argiles gonflantes</p> $\Rightarrow K_{\text{éq.}} \leq 10^{-10} - 10^{-11} \text{ m.s}^{-1}$	$K_{\text{éq.}} \rightarrow K_{\text{noyau}}$ <p>au-delà de quelques mètres cumulés déposés permettant un contact noyau/roche</p> $\Rightarrow K_{\text{éq.}} \leq 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$

⇒ L'Andra retient en référence une dépose du revêtement, *a minima* par portions, sur une longueur cumulée de quelques mètres.

Objectifs de démonstration

Le planning des études

❑ Programme fortement impulsé depuis 2006

- Essais en laboratoire jour et essais *in situ*, notamment au Laboratoire Souterrain de Bure
- Maquettes et essais à échelle 1 ou à échelle représentative
- Modélisation et simulations numériques
 - Corpus de connaissances déjà très important pour le Dossier 2005

❑ Objectif : disposer des éléments de démonstration pour la DAC

- Cf. Groupe permanent Déchets sur les ouvrages de fermeture en 2014
 - Instruction IRSN de l'état des connaissances et du programme d'études en vue du DAC
 - Avis positif de l'ASN sur la capacité de faisabilité des ouvrages de fermeture

❑ Construction de démonstrateurs dès la phase industrielle pilote

- Disposer d'un retour d'expérience sur la période d'exploitation séculaire de Cigéo

Les questionnements technologiques et scientifiques

Les grandes questions

❑ Faisabilité industrielle

- Capacité du retrait partiel du revêtement dans l'Unité Argileuse (UA) et évaluation d'un état acceptable de la zone endommagée après retrait
- Conception et mise en place de l'ensemble des composants (noyau et massifs d'appui)
 - ❖ Qualité des interfaces
 - ✓ Ouvrages de diamètre jusqu'à 9 à 10 m environ
 - ✓ Différentiation des ouvrages de fermeture : puits, descenderie, galeries

❑ Performance hydraulique et hydromécanique

- Maîtrise de la saturation en grand des noyaux des scellements
 - ❖ Évaluation des modalités et des cinétiques
- Maîtrise du comportement HM en grand, une fois la saturation totale en eau atteinte
 - ❖ Évaluation de la stabilité hydromécanique, suivant différentes sollicitations (T)HM-gaz possibles
 - ✓ Différentiation des ouvrages de fermeture

❑ Evolution géochimique

- Démonstration de l'effet limité des interactions des massifs d'appui en béton sur le noyau argileux et les sur les argilites en champ proche
 - ❖ Maintien des performances hydraulique et hydromécanique en grand

Les ouvrages de fermeture de Cigéo

Mise en œuvre industrielle

Le démonstrateur de scellement à échelle 1 FSS – Projet DOPAS

Mur de soutènement en blocs bétons préfabriqués

Les ouvrages de fermeture de Cigéo

Mise en œuvre industrielle

Le démonstrateur de scellement à échelle 1 FSS – Projet DOPAS

Maquette FSS à St Dizier

2012-2015

Coffrage

Coulage

Machine d'ensilage

Noyau : mélange pellets 32 mm +
concassé de pellets

Projection

Les ouvrages de fermeture de Cigéo

L'expérimentation NSC à Bure : Noyau de Scellement

Objectif : évaluer la performance hydraulique d'un scellement en bentonite, de l'interface et de la zone endommagée en champ proche

Les ouvrages de fermeture de Cigéo

L'expérimentation NSC à Bure : Noyau de Scellement

- Mélange bentonite-sable 40% / 60%
- Mur : briques 300 x 200 x 100 mm
- Sole et vides annulaires : pellets+ poudre
- 420 capteurs = 866 points de mesure

Hydratation démarrée en janvier 2014
Durée prévue $\pm$ 3 ans

Mise en place d'un disque d'hydratation

Construction du mur

Installation de capteurs

Découpe de la saignée

Les ouvrages de fermeture de Cigéo

Les coupures hydrauliques : expérimentations TSS et SET

Suivi de la géométrie de la saignée afin de la remplir avec une méthode industrielle (expérimentation SET à l'ETe)

Programme d'essais sur la réalisation et la performance des coupures hydrauliques

- construction d'une saignée complète (360°) et tenue des terrains avant remplissage
⇒ TSS1 au Laboratoire (1^{er} semestre 2011)
- capacité à remplir les saignées avec de l'argile gonflante (auto-stabilité, limitation des vides, qualité du contact argile/roche)
⇒ SET en gabarit en surface (2012-2013)
- performance hydraulique de la coupure
⇒ TSS2 au Laboratoire dans la saignée TSS1 (2013)

Les ouvrages de fermeture de Cigéo

Les coupures hydrauliques : expérimentation SET

Etape 1 : remplissage de la partie haute par ½ briques positionnées et coincées à l'aide d'un robot

Etape 3 : fermeture de de la partie basse par ½ briques positionnées et coincées manuellement

Etape 2 : Remplissage de la partie basse par un mélange pellets/poudre mis en place directement à l'aide de 2 vis sans fin

Les matériaux pour le stockage
Journée technique SFEN

Les ouvrages de fermeture de Cigéo

L'expérimentation REM : Resaturation à l'Échelle Métrique

Objectif : réaliser la saturation d'un noyau de bentonite constitué du mélange FSS à une échelle représentative

Essai démarré le 25/09/2014
pour une durée > 10 ans

Cuve

ϕ intérieur 1 m, hauteur utile 1 m

70 capteurs

30 capteurs d'humidité dans le noyau suivant la hauteur, 30 capteurs de pression totale radiale, 8 capteurs de pression totale axiale.

Les techniques de mise en forme

Diverses techniques de mise en forme ont été étudiées et éprouvées

Pellets

Les matériaux pour le stockage géologique des déchets
Journée technique SFEN/ST2-17/11/2015

Compactage dans un moule

Anneaux
2,3 m x 0,5 m
Poids : 4 tonnes

Les techniques de mise en forme

D'autres techniques sont possibles, pour traiter des concepts spécifiques ou des cas particuliers

Compactage isostatique dans un moule souple

CEA

CEA

RWMC

AECL, TSX

Shotclay

Nagra, Grimsel

Compaction Equipment and Test Pit

Squeezing and Removing Inner Frame-box

Compacted Bentonite with Center hole

Inside Wall of Compacted Bentonite

Vibro-compactage

SKB, Äspö

Les techniques de mise en place

Mise en place manuelle

Palonnier à ventouses ou paniers métalliques

Robots avec pinces ou ventouses

Les techniques de mise en place

Grosses pièces ou super-conteneurs

Palettes à coussins d'air ou d'eau

KBS-3H Deposition equipment at Äspö HRL

Matériaux granulaires, vis sans fin

L'état des connaissances

Les argiles gonflantes

Les argiles gonflantes (bentonites) sont des matériaux naturels aux propriétés remarquables :

- Des potentiels de sorption-désorption très élevés
- Des perméabilités à l'eau et des coefficients de diffusion de la vapeur d'eau très faibles
 - ❖ $K < 10^{-11}$ m/s pour $\rho_d > 1$ g/cm³
- Des potentiels de gonflement très élevés
- Un auto-colmatage du fait du gonflement
 - ❖ Fermeture des joints, des espaces inter-pellets, comblement des vides technologiques et jeux de mise en place
 - ❖ Des propriétés *in fine* proches de celles d'un matériau massif et à même densité sèche

La bentonite du Wyoming (MX80) est souvent utilisée avec ou sans additif (sable) comme argile méthodologique de référence

Les matériaux pour le stockage géologique des déchets
Journée technique SFEN/ST2-17/11/2015

L'état des connaissances

Les propriétés hydrauliques et hydromécaniques en non-saturé

- De nombreuses données disponibles et partagées par la communauté scientifique
- Bonne corrélation entre expérimental et modélisation pour l'hydraulique
- Transitoire HM complexe du fait des vides et des jeux technologiques
 - ❖ cas des mélanges granulaires

Vaunat, 2004

Double-porosity flow law

AC Dieudonné, R. Charlier, 2014

CEA, 2012

1
2
3
4

L'état des connaissances

Les propriétés hydrauliques et hydromécaniques à l'état saturé

- La pression de gonflement est fonction de la densité sèche
- Idem pour la perméabilité
- Transfert de gaz : pression de percée $\geq$ pression de gonflement
 - P. percée reproductible (dépend de ΔP)
 - Effet soupape
 - Pas d'effet sur le comportement HM après le passage du gaz

gonf

Le comportement en situation de stockage

Transfert hydrique et transfert de gaz

➤ Expérimentation PGZ-2 à Bure

- ❖ Scellement petit diamètre
- ❖ Noyau monolithique ou mélange pellets-poudre
- ❖ Hydratation naturelle par le massif
 - ✓ Sans ou avec flux de gaz

➤ Saturation du noyau et transfert du gaz localisé aux interfaces et à l'EDZ

- ### ➤ Rex important d'expérimentations *in situ* :
- ❖ TSX au Canada, Reseal en Belgique, Lasgit en Suède

Le comportement en situation de stockage

La perturbation alcaline : observations de laboratoire

Observations sur échantillons de laboratoire

Evolutions côté argiles, suivant les bétons

Bétons de **pH élevé** : illitisation de la smectite Na et de l'interstratifié I/S

Interface pâte CEM I - argilite, 2 mois à 25°C
(Dauzères et al, Cem.Conc.Res 2010)

Bétons **bas pH** : smectite Na partiellement convertie en smectite Ca, mais peu d'impact sur le gonflement

a) lames équilibrées à 54 % H.R. à 25°C

b) lames séchées à 105°C puis saturées à l'éthylène-glycol

Interface pâte bas pH - bentonite (18 mois à 50°C)

Le comportement en situation de stockage la perturbation alcaline : modélisation

pH

CSH

Porosité

◆ Massif d'appui :

- diminution à proximité des milieux argileux [10-11]

◆ Argilites :

- pas d'évolution notable

◆ Bentonite :

- tout d'abord une augmentation du pH (> 9) puis une diminution à long terme (< 9)

◆ A toutes les interfaces :

- Dissolution des CSH 0,8 formation de gypse et de calcite

◆ Spécifiquement à l'interface avec les argilites :

- formation de CSH 0,66, de brucite et de quartz

➤ Les variations de porosité sont

- de faibles ampleurs
- localisées aux interfaces

Modélisations réalisées par Andra (avec PhreeC) sur la base du modèle BRGM
Massif d'appui en béton bas pH

Conclusion

❑ Bentonites

- Nombreuses données de caractérisation, méthodologies éprouvées
- Comportement (T)HM bien appréhendé et prédictible

❑ Ouvrages de scellement

- Performances requises atteintes via le gonflement de la bentonite
- Transitoire de resaturation complexe mais homogénéité *in fine*
- Temps de saturation très important
- Faisabilité industrielle démontrée (incluant les appuis en béton)

❑ Questions résiduelles

- Consolidation des connaissances et optimisation des ouvrages
 - ❖ Changement d'échelle : du matériau à l'ouvrage
 - ❖ Stabilité du scellement versus situation de sollicitation (T)HM-gaz

Merci de votre attention

18 décembre 2006