



Les questions posées à la mécanique des roches par le projet Cigéo

F. Plas^{*}, G. Armand^{**}

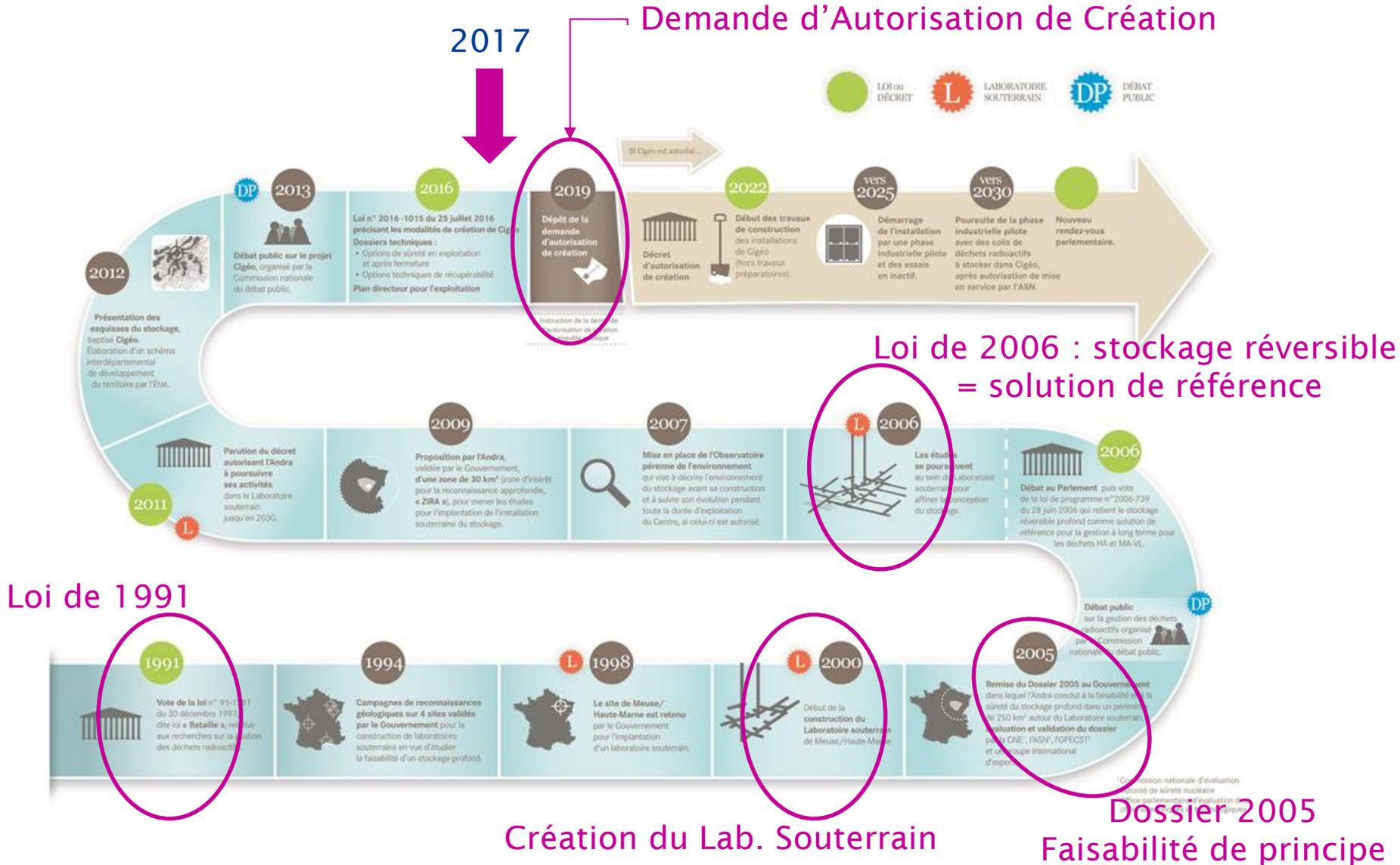
* Directeur de la Direction de la R&D (DRD)

** Chef du service Mécanique des fluides et des solides à la DRD

*Jubilé du CFMR,
14 septembre 2017, MINES ParisTech*

Le projet Cigéo

Un développement progressif et rigoureux



Loi de 1991

Loi de 2006 : stockage réversible = solution de référence

Création du Lab. Souterrain

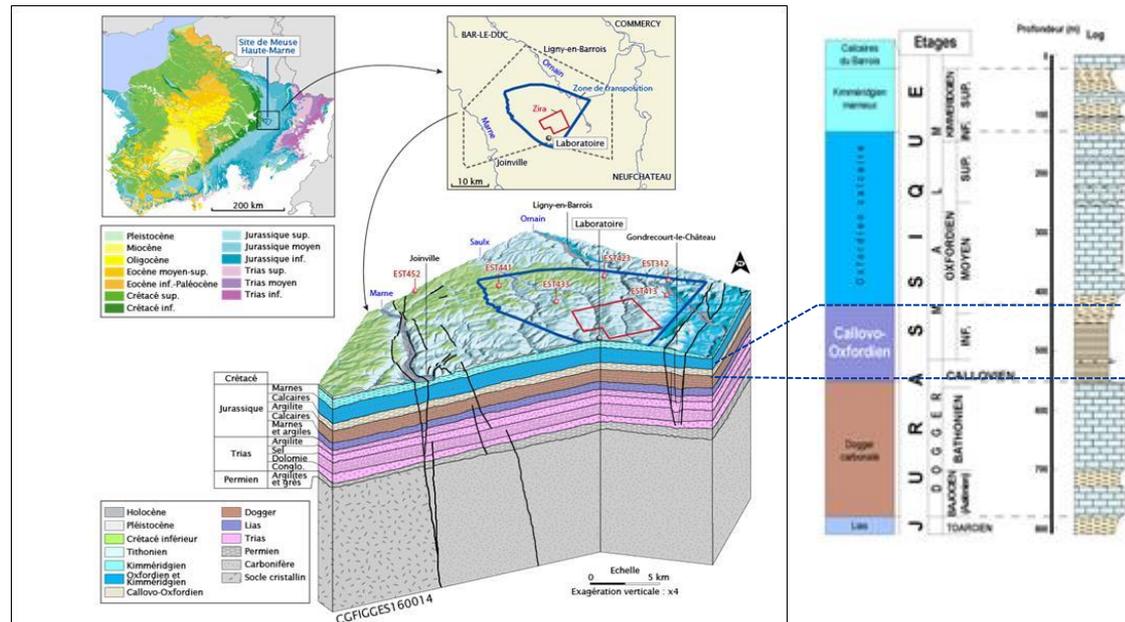
Dossier 2005
Faisabilité de principe

Des propriétés favorables au confinement à long terme de la radioactivité

- ◆ Faible perméabilité ($\approx 10^{-20}$ à 10^{-21} m²) et faible coefficient de diffusion
 - ◆ Epaisseur importante (120 à 160 m)
 - ◆ Profondeur d'environ 500 m
 - 2 grandes unités litho-stratigraphiques en fonction de la teneur en carbonates (Unité SiltoCarbonatée - USC au toit et Unité Argileuse - UA)
- » Cigéo localisé dans l'UA (2/3 du Callovo-Oxfordien)

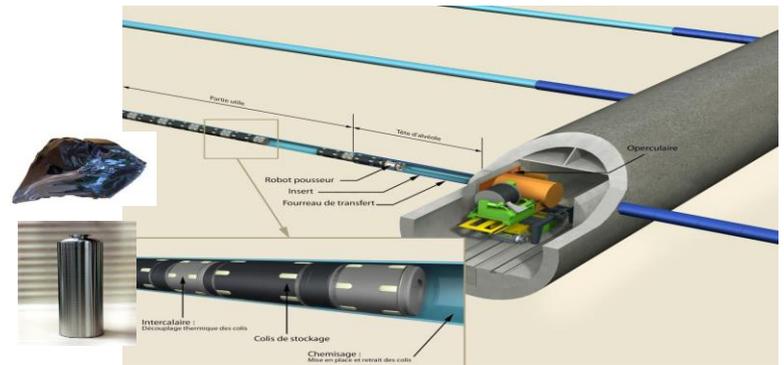
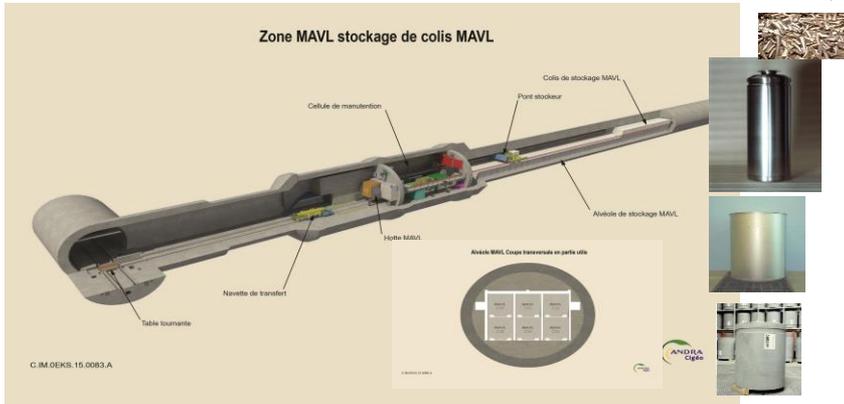
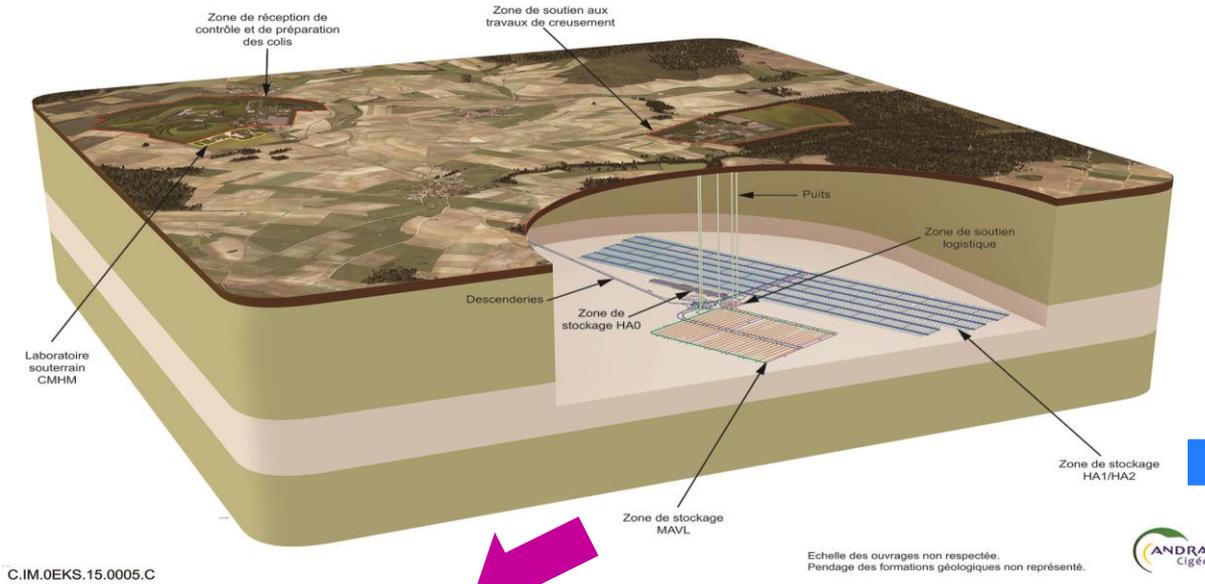
Un champ de contraintes naturelles anisotrope

- ◆ σ_H N155E
- ◆ $\sigma_h = \sigma_v =$ poids des terres (~ 12 MPa)
- ◆ $\sigma_H \sim 1.3 \sigma_h$



Le projet Cigéo

L'installation à terminaison : vue schématique



La constructibilité-des ouvrages souterrains pour une exploitation sûre et la récupérabilité éventuelle des colis, sur une durée séculaire

La préservation des propriétés favorables du Callovo-Oxfordien, du fait des sollicitations « mécaniques »

- ◆ L'endommagement en champ proche des ouvrages
- ◆ L'endommagement et/ou fracturation possible de la formation en grand :
 - la sollicitation transitoire THM due au dégagement de chaleur de certains déchets
 - élévation transitoire de température ⇒ surpressions interstitielles et comportement en extension et cisaillement
 - la production d'hydrogène dans le stockage (corrosion anoxique des aciers)
 - Pression de gaz ⇒ fracturation

» *Choix : méthodes de construction/soutènement, orientation des alvéoles par rapport au champ de contrainte mécanique naturel, critères thermiques...*

La fermeture du stockage pour favoriser le transfert des radionucléides au travers du Callovo-Oxfordien et limiter le transfert via le stockage à long terme

- Lien avec l'endommagement en champ proche

» *Choix : conception et performance hydraulique des ouvrages de fermeture, notamment des accès (puits et descenderies)*

Le comportement THM-Gaz du Callovo-Oxfordien aux différentes échelles (du champ proche à la formation en grand) dans le temps

- ◆ L'endommagement **M** (nature, origine...)
- ◆ Les couplages HM et THM avec/sans endommagement
- ◆ Le transfert des gaz et le couplage HM-Gaz avec/sans endommagement
 - Les effets irréversibles ou non sur la perméabilité

Le comportement **M** des structures/ouvrages dans le temps

- ◆ Le couplage (TH)**M**-Gaz entre la roche et les composants ouvragés
 - Galeries, accès, alvéoles MA-VL : Revêtement/soutènement et les colis exploitation ⇒ après rupture des revêtement/soutènement en après-fermeture
 - Alvéoles HA : chemisage et conteneurs métalliques
 - Scellements : noyau à base d'argile gonflante et massifs d'appui en béton

La recherche « amont »

- ◆ Caractérisation des mécanismes/processus et modélisation multi-échelle (modèles et paramètres)

Le Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne

- ◆ Etude en conditions réelles et évaluation des effets et des changements d'échelle (Up-scaling)

La modélisation des ouvrages, du stockage et du milieu géologique en grand

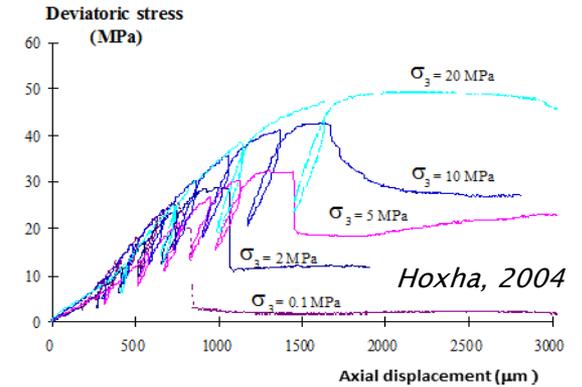
- ◆ Extrapolation à des échelles d'espace et/ou de temps inaccessibles à l'expérimentation

R&D conduite avec l'appui :

- Le monde académique et à l'interface Science/Industrie (Universités, Ecoles, CNRS, INERIS,...)
- Le monde industriel (bureaux d'études...)
- Les homologues étrangers de l'Andra

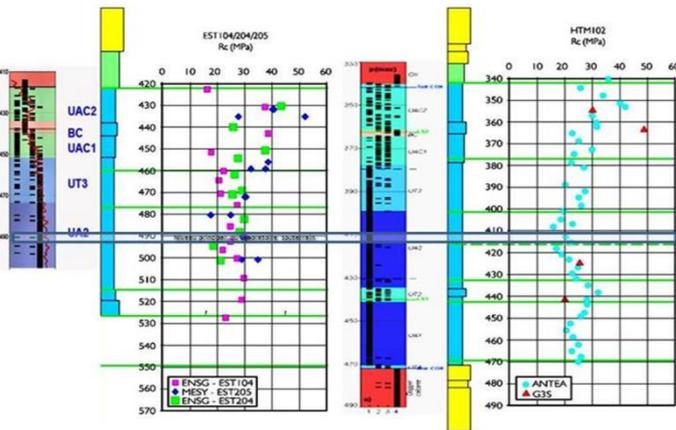
Valeurs moyennes sur échantillons

Unité géologique	Teneur en eau (%)	Masse volumique humide (g/cm ³)	Porosité (%)	Conductivité thermique (W/m/K)		RC (MPa)	E (MPa)
				perp	//		
USC	6,7	2,48	15,1	1,8	1,8	36	12000
UA	7,9	2,43	17,5	1,3	2,0	21	6000



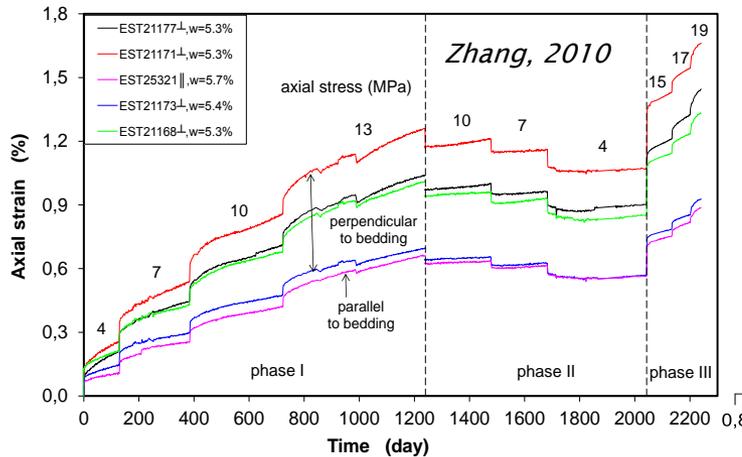
EST 104/204/205 *

HTM 102

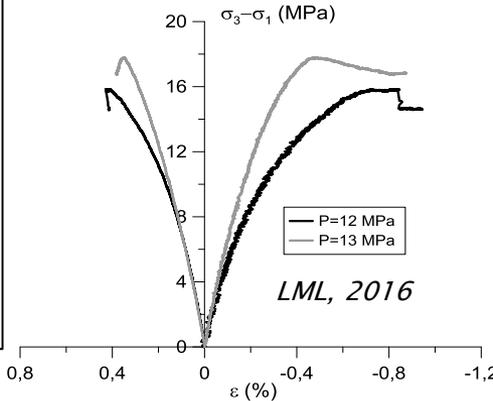


* les cotes indiquées correspondent au forage EST104

Rc en fonction de la profondeur



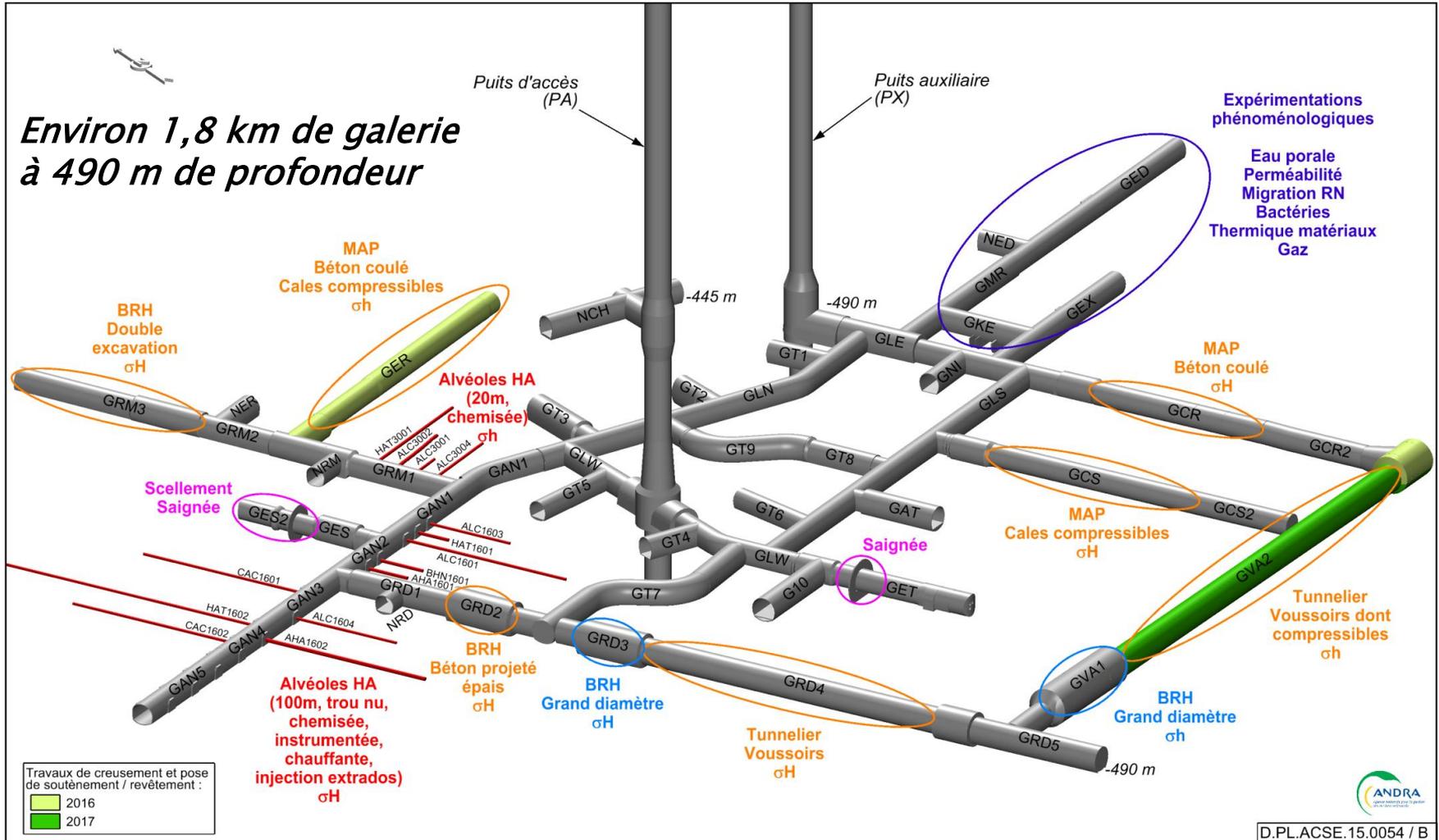
fluage uniaxial multipulier



Essai en extension

Le projet Cigéo

Le Laboratoire souterrain de recherche (2017)



D.PL.ACSE.15.0054 / B

◆ Galeries avec la même orientation



Brise roche hydraulique

Machine à attaque ponctuelle sous jupe



Machine à attaque ponctuelle



● Peu d'influence de la méthode de creusement sur la fracturation induite

◆ De soutènements “souples” à des structures plus rigides



- Boulons radiaux
- Béton projeté fibré,
- Cales compressibles (hiDcon®)



Béton coulé en place 6,5 mois après le creusement



- Boulons radiaux(3 m long),
- Béton projeté fibré mis en 4 couches consécutives

◆ « Tunnelier » avec voussoirs préfabriqués

- Voussoir 45 cm d'épaisseur
- Injection de différents matériaux de bourrage



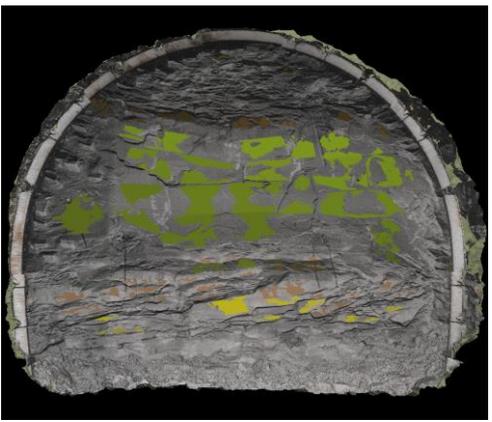
Mortier de bourrage classique



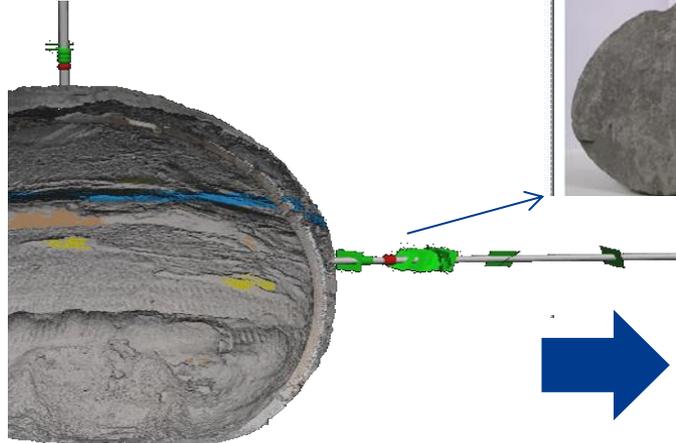
Mortier compressible (billes de polystyrène)



Analyse structurale des fronts et carottes



+

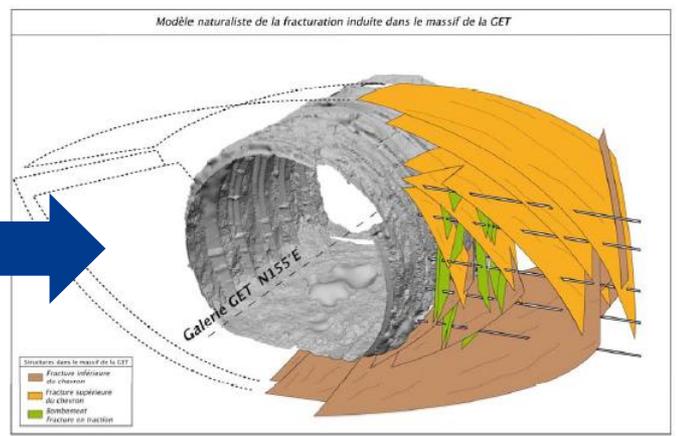
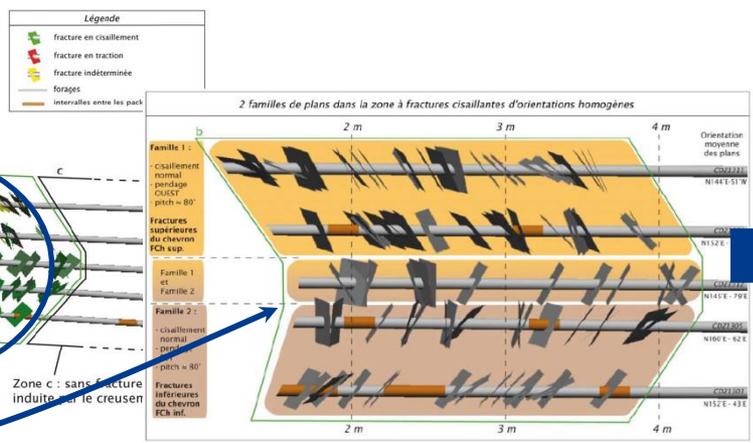
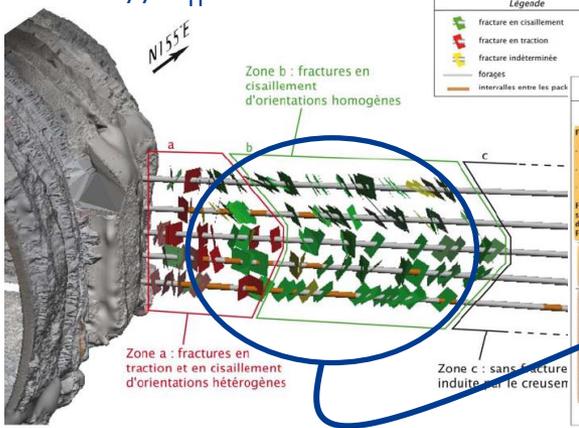


Modèle de fracturation

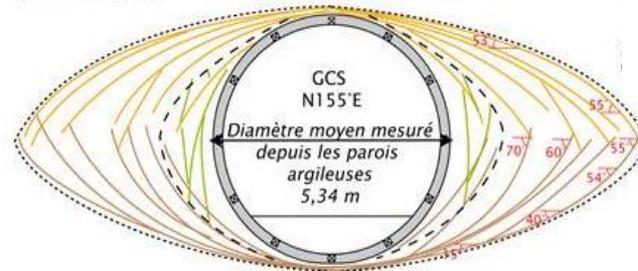
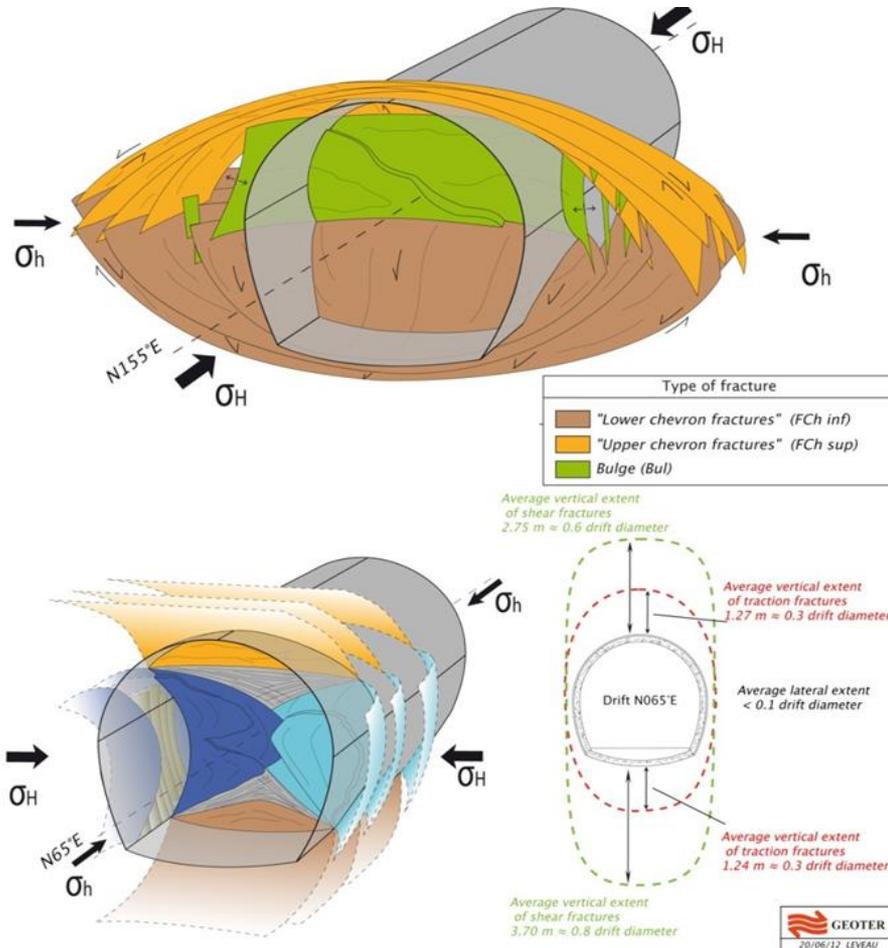
◆ Une fracturation induite en champ proche (quelques mètres)

- Un réseau 3D de fractures, interconnectées proche de la paroi puis peu/non connectées

Galerie // σ_H



◆ Modèle fonction de l'orientation des ouvrages par rapport aux contraintes principales horizontales



Drift Orientation		Extensional fractures extent			Shear fractures extent		
		Min.	Average	Max.	Min.	Average	Max.
N65 // σ_h	Ceiling	0.2xD	0.3xD	0.4xD	0.5xD	0.6xD	0.8xD
	Wall	0.1xD	0.1xD	0.2xD	-	-	-
	Floor	0.2xD	0.4xD	0.5xD	0.8xD	0.8xD	1.1xD
N155 // σ_h	Ceiling	-	0.1xD	0.15xD	-	-	-
	Wall	0.01xD	0.2xD	0.4xD	0.7xD	0.8xD	1.0xD
	Floor	-	0.1xD	0.15xD	-	-	-

G. Armand, F. Leveau, C. Nussbaum, R. de La Vaissiere, A. Noiret, D. Jaeggi, P. Landrein, C. Righini, 2014, Geometry and Properties of the Excavation-Induced Fractures at the Meuse/Haute-Marne URL Drifts, Rock mechanics and Rock engineering, Volume 47, Issue 1, pp 21-41

- ◆ Typologies de fracturation et extensions relatives de la zone endommagée similaires quelle que soit la taille des ouvrages

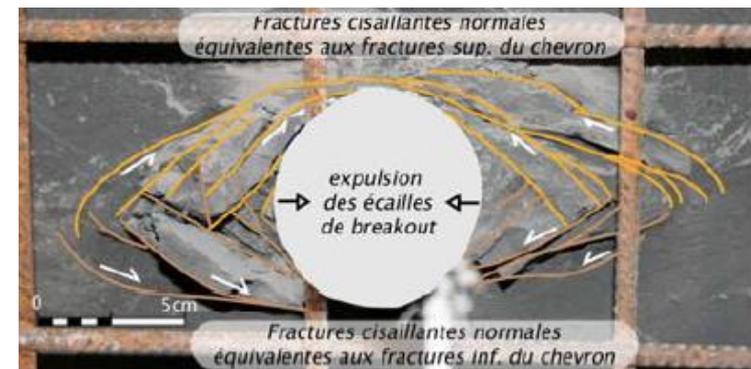
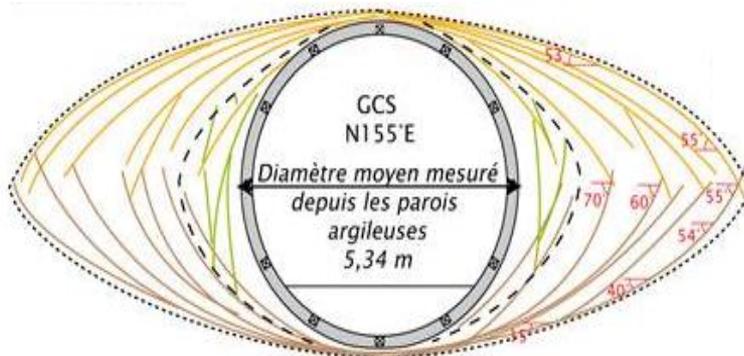
Micro-tunnel (70 cm de diamètre)



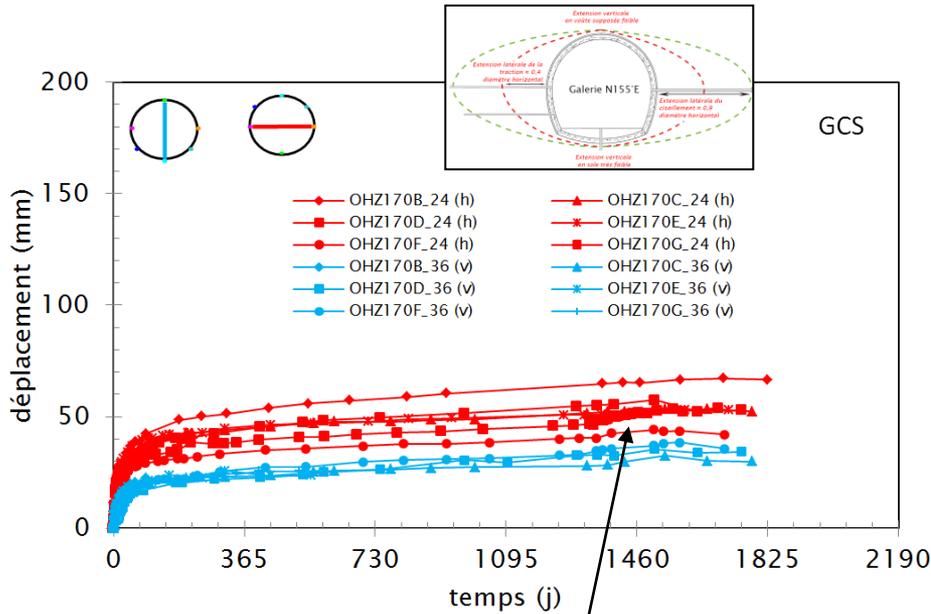
Trou de boulon (5 cm)



Galerie (de 4 à 9 m de diamètre)

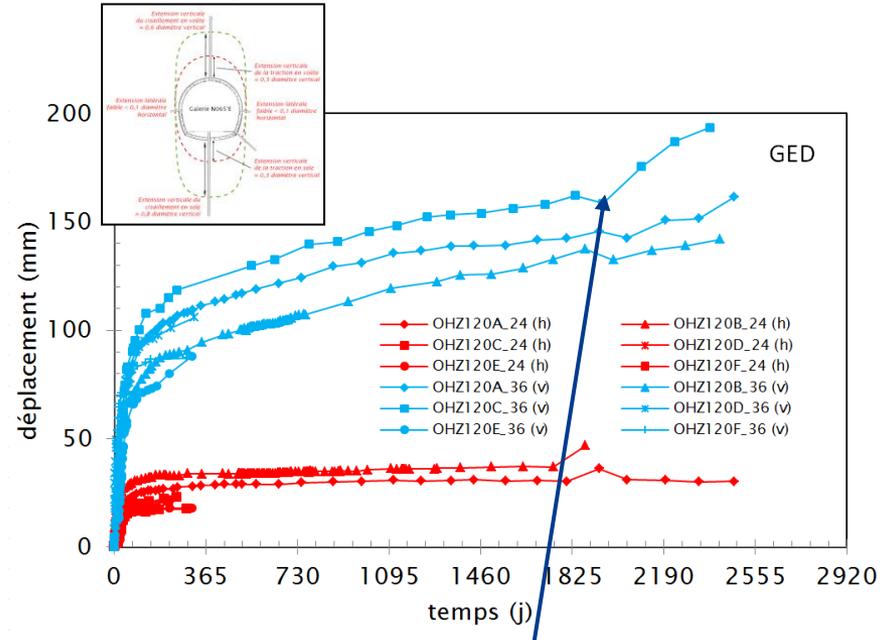


Galerie parallèle à la contrainte majeure



Reprise du creusement de la galerie GCS

Galerie parallèle à la contrainte mineure



Fuite d'eau au radier Effet de gonflement

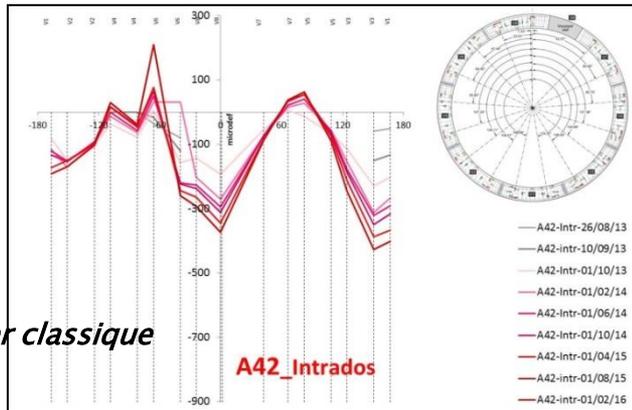
◆ Un même type de comportement, mais des amplitudes des convergences f(orientation)

- suivant $\sigma_H, C_v/C_h$: de l'ordre de 0,5
- suivant $\sigma_h, C_v/C_h$: de l'ordre de 4

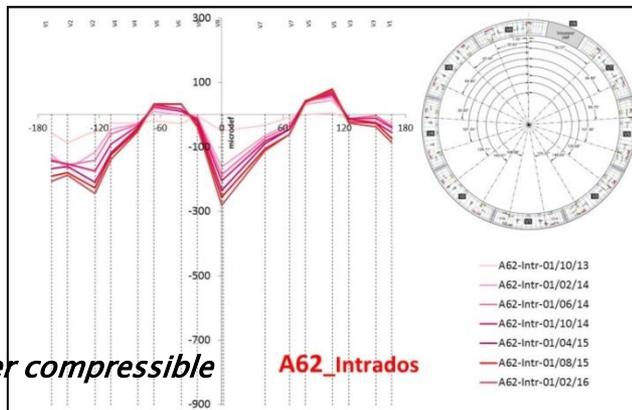
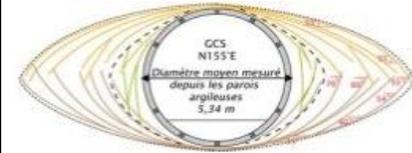
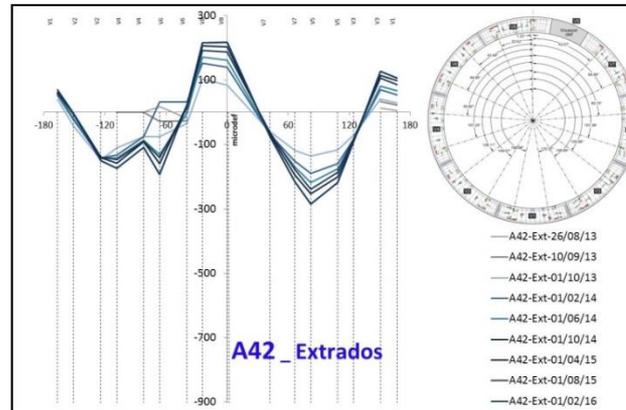
◆ Une convergence liée à la zone endommagée

- Anisotropie corrélée à l'anisotropie de l'extension de la fracturation
- Amplitudes corrélées au « déplacement » des fractures a minima à « court » terme

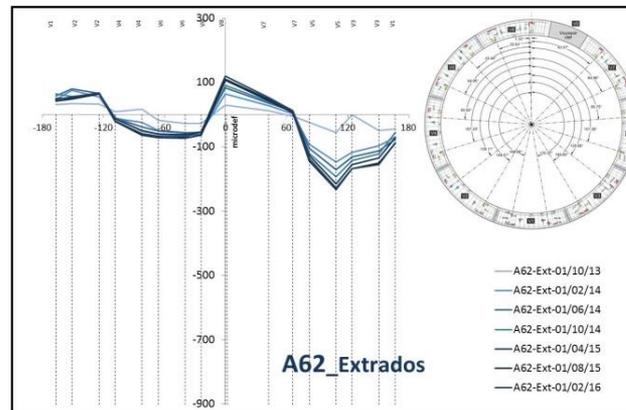
- ◆ Chargement corrélé à la zone endommagée
 - Anisotropie
- ◆ Chargement significativement réduit par le mortier



Mortier classique

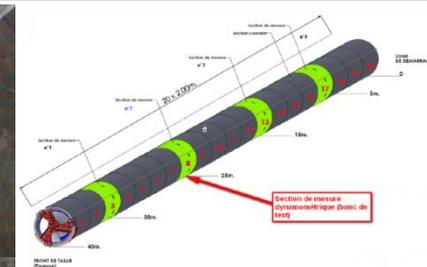
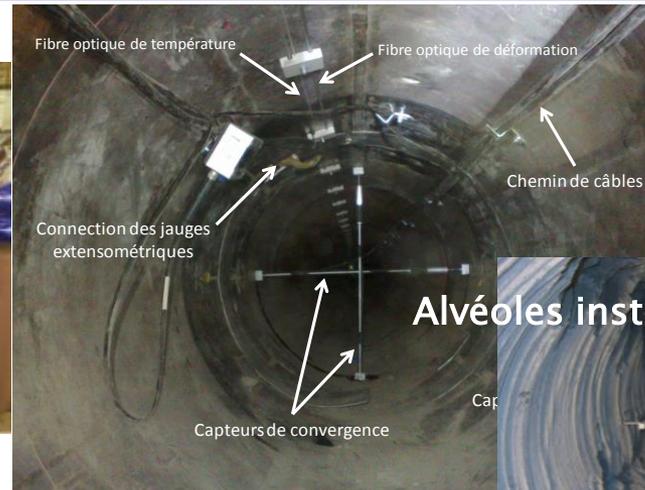


Mortier compressible





Foreuses



Alvéoles instrumentées

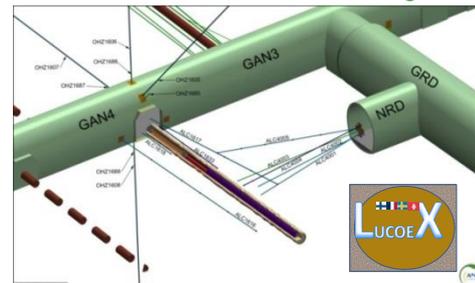


Les grandes dates

- ◆ 2009 : première alvéole de 20 m
- ◆ 2013 : alvéole chemisée à l'avancement de 100 m
- ◆ 2016 : alvéole de 80 m chemisée et avec remplissage du vide annulaire
- ◆ 2017 : alvéole de 80 m chemisée après foration puis remplissage du vide entre la roche et le chemisage

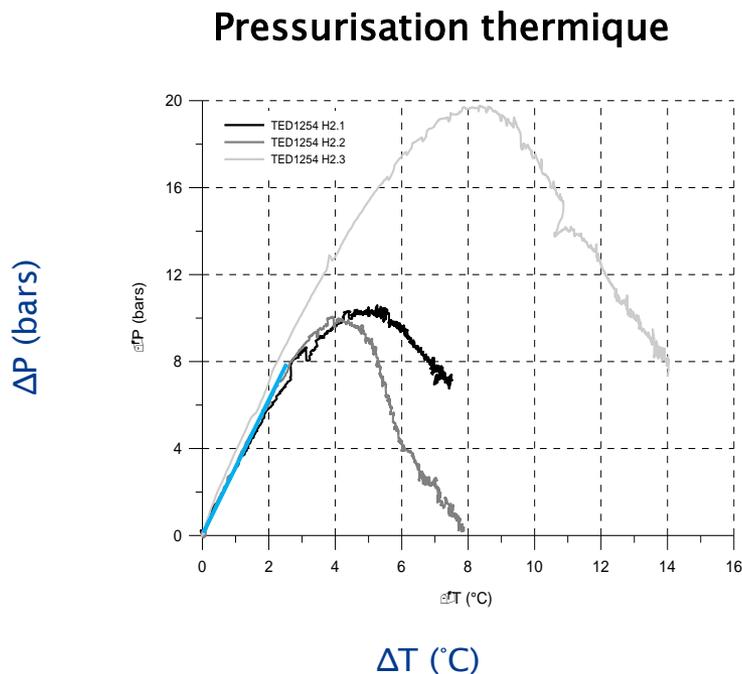
- ◆ 2012 : Premier démonstrateur d'alvéole chauffante

● Chauffe toujours en cours

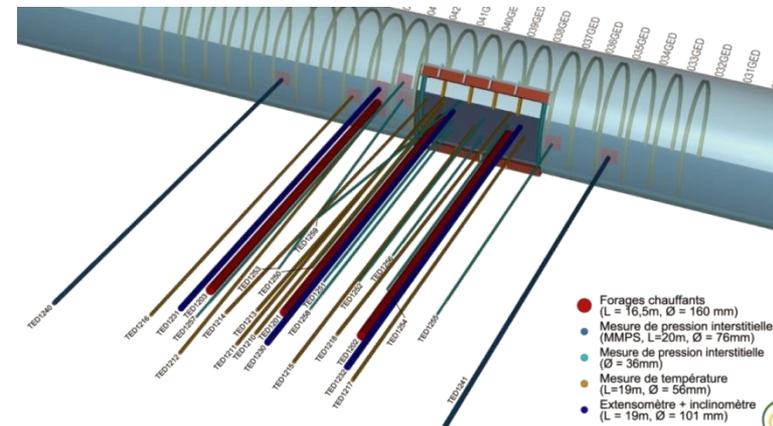


Sondes chauffantes

- ◆ Un programme d'essais itératifs depuis des essais à petite échelle (forage) jusqu'à des essais de démonstration échelle 1
 - Création d'un champ de surpression due à la différence entre la dilatation thermique de l'eau et de la matrice rocheuse



TED1254
33 cm
TED1202

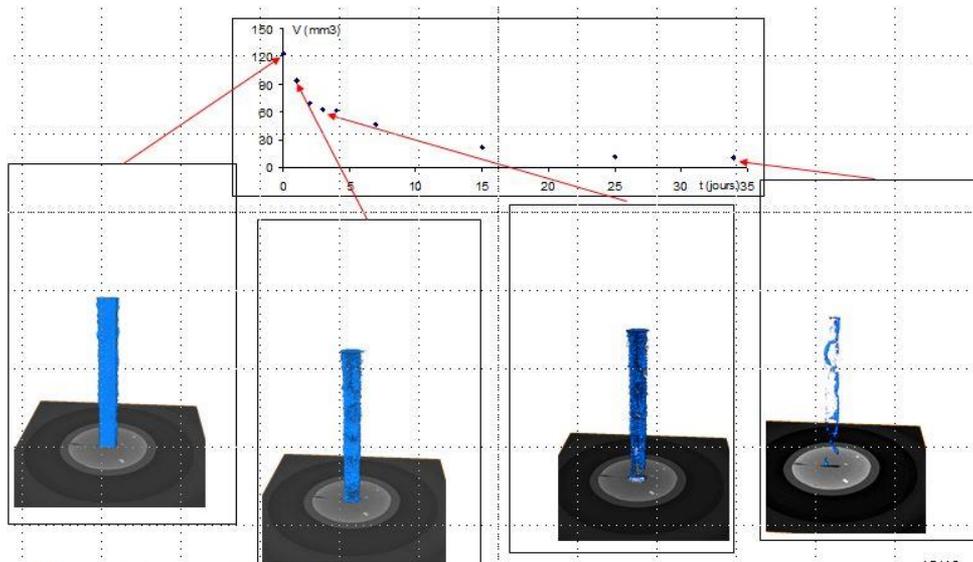


Un endommagement entraînant à court terme une augmentation de la perméabilité à l'eau

- ◆ Liée à la fracturation et à l'ouverture des fractures

Une cicatrisation hydraulique montrée dans l'UA à différentes échelles

- ◆ Liée à la petite teneur en smectite dans les argilites
- ◆ « Rapide »
- ◆ Fonction de l'ouverture des fractures
- ◆ Aidée par le « serrage » mécanique des fractures



Observation de la cicatrisation d'une fracture par tomographie (GéoRessources)

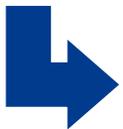
- ◆ Faisabilité démontrée de la constructibilité des ouvrages
 - Test de méthodes de construction/soutènement, choix de l'orientation privilégiée des alvéoles suivant σ_H ...

- ◆ Bonne maîtrise du comportement HM des ouvrages
 - Caractérisation de la zone endommagée vs UA et USC
 - Rôle majeur de la zone endommagée dans le comportement différé

- ◆ Bonne maîtrise du comportement THM du COX
 - Couplage $T \Rightarrow$ HM : processus, modèle, endommagement thermique, critère de rupture suivant le chargement THM

- ◆ Bonne maîtrise du comportement HM-gaz
 - Mécanismes de transfert (gaz exprimée et gaz dissous), pression d'entrée, pression de fracturation

- ◆ Constructibilité des scellements et bonne maîtrise des processus HM



Un socle de connaissances jugé robuste pour la demande d'autorisation de création de Cigéo prévue en 2019

Principe de déploiement souterrain de Cigéo

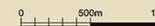
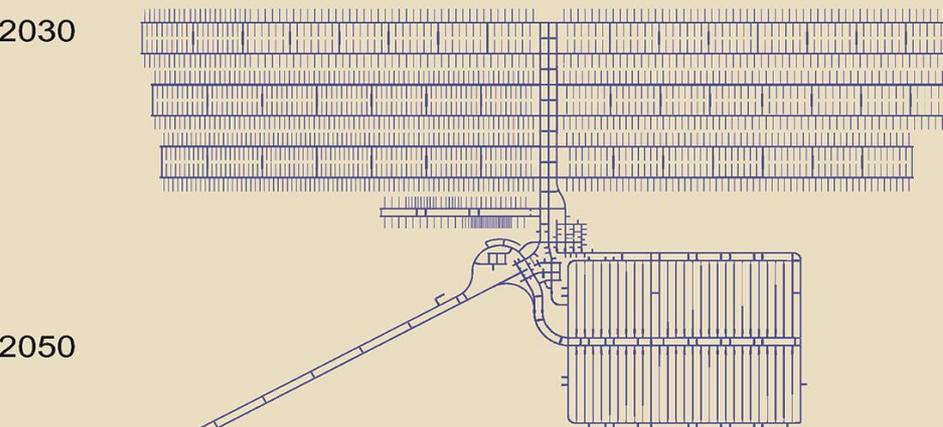
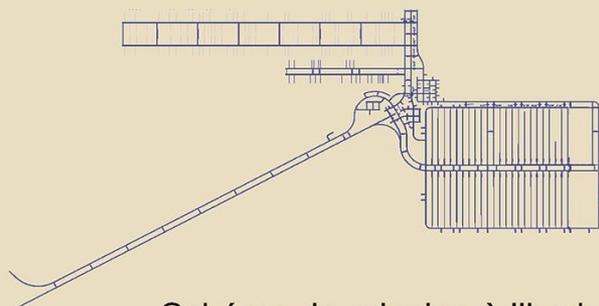
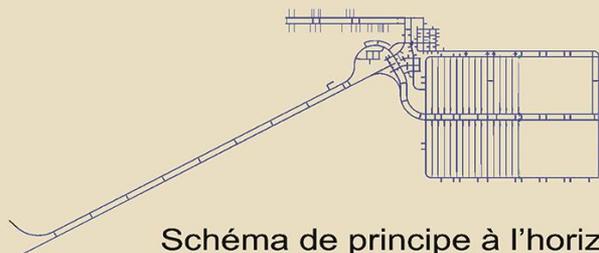
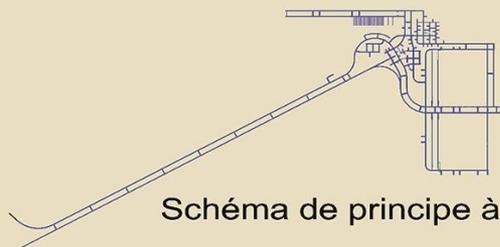
La phase industrielle pilote (Phipil) si autorisée

- Conforter le caractère réversible et la sûreté de Cigéo

- Ensemble d'essais

- Zone de démonstrateurs (Scellements...)

⇒ REX puis Autorisation nécessaire avant de passer à la phase suivante



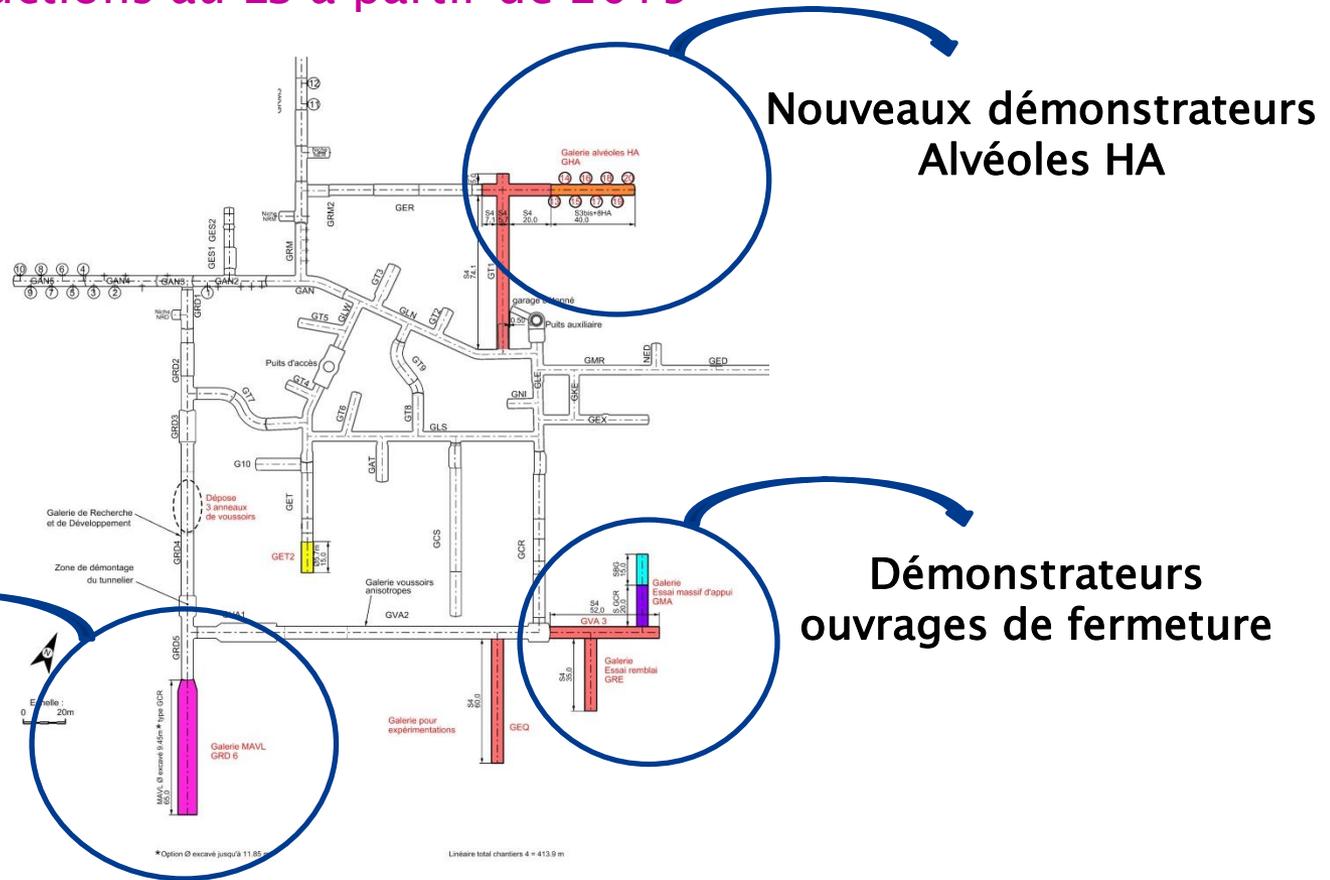
Un développement incrémental du projet sur une durée centenaire

- ◆ ↗ confiance et Optimisations futures ⇒ REX des différentes « tranches » (notamment la phase industrielle pilote) et avancées des connaissances
- ◆ Des axes d'amélioration continue identifiés à ce stade
 - la zone endommagée en tant que milieu « argileux » fracturé
 - Modélisation mécanistique du **comportement contrainte-déformation différée**
 - Modélisation mécanistique des processus de cicatrisation hydraulique
 - Conceptualisation et modélisation mécanistique des écoulements de gaz et du couplage avec la mécanique
 - Le Callovo-Oxfordien en grand à l'échelle de la ZIRA
 - Représentation multi-échelle 3D (Up-scaling) de la **distribution spatiale des valeurs des paramètres THM**
 - Représentation et modélisation multi-échelles 3D mécanistique des processus THM (surpression, extension, rupture)
 - Les ouvrages de fermeture
 - Représentation et modélisation 3D mécanistiques du **comportement (T)HM des structures** (roche, noyau argileux, massifs d'appui et soutènements)

» *Nouveaux essais prévus au LS d'ici la phase industrielle pilote : galerie grand diamètre 85 m², nouveaux démonstrateurs HA, démonstrateur remblai...*

Schéma prévisionnel

◆ Nouvelles constructions au LS à partir de 2019





Merci de votre attention

www.andra.fr