

PROJET CIGÉO : UNE NOUVELLE PHASE INITIÉE PAR LE DÉPÔT DE LA DEMANDE D'AUTORISATION DE CRÉATION (DAC)

Julie DIDIERJEAN

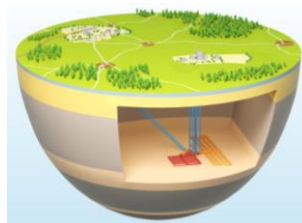
Architecte Ensemblier, Direction du programme Cigéo

Association Française de Génie Civil
03 mai 2023

Le projet de stockage géologique Cigéo

Les déchets radioactifs concernés

Cigéo



Volume de déchets
radioactifs

Niveau de
radioactivité

0,2 %

HA

94,9 %

2,9 %

MA-VL

4,9 %

5,9 %

FA-VL

0,14 %

Projet de stockage à l'étude

Cires



59,6 %

FMA-VC

0,03 %

Centre de l'Aube



31,3 %

TFA

0,0001 %

Les chiffres clés du projet de stockage Cigéo

<https://www.andra.fr/cigeo>

500 Mètres de profondeur

15 km² De zone de stockage

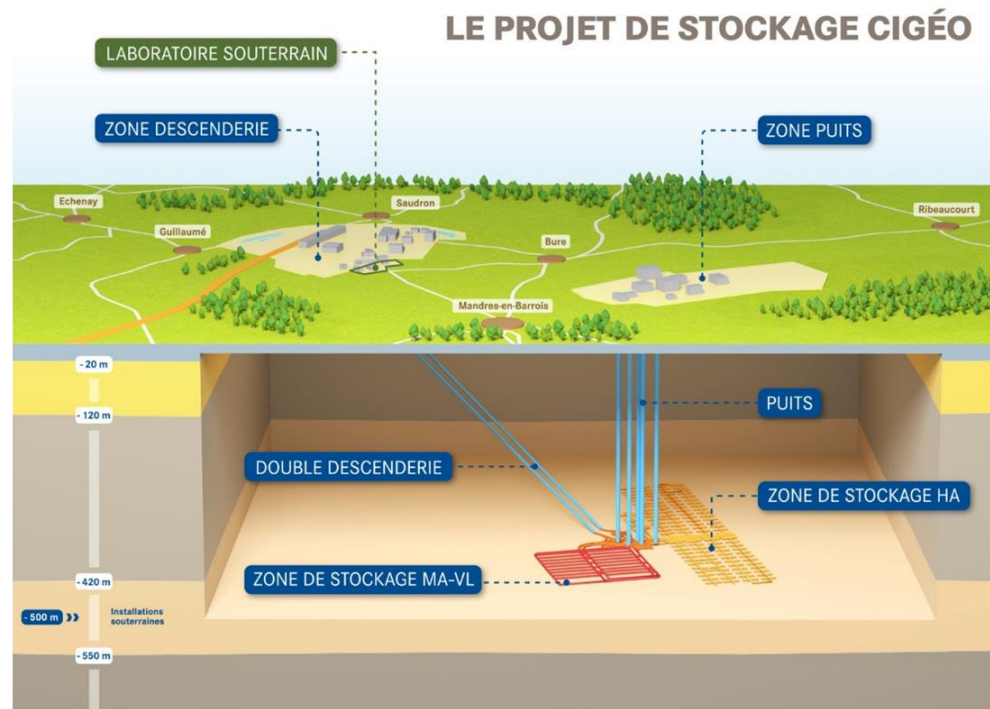
250 Km de galeries et alvéoles

85 000 m³ de déchets

120 Ans d'exploitation

25 Mds d'euros

CG-AMOA-PRE-22-005 5

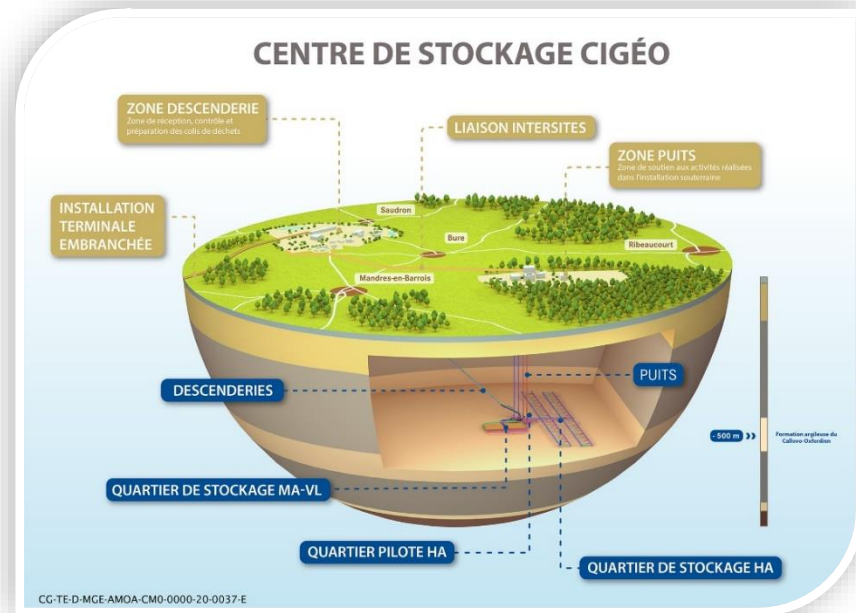


L'objectif fondamental de Cigéo

Protéger l'Homme et l'environnement de la dispersion des radionucléides

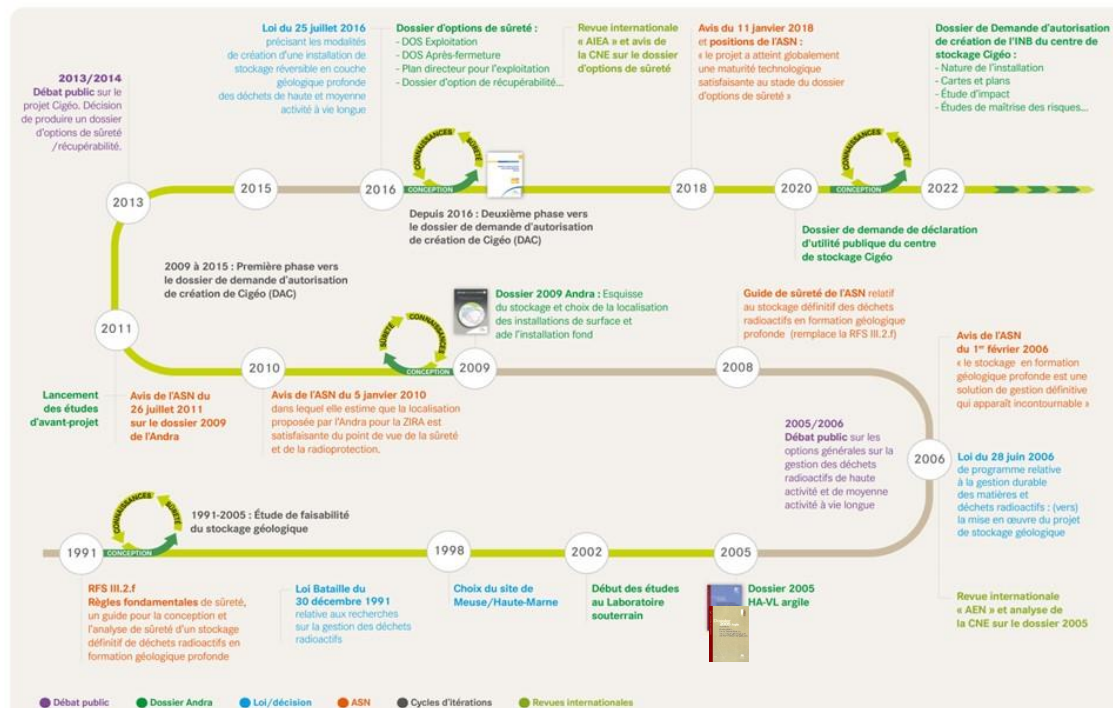
Les **fonctions de sûreté à long-terme** après fermeture :

- **Isoler** les déchets des phénomènes de surface et des intrusions humaines ;
- **S'opposer** à la circulation d'eau ;
- **Limiter** le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage ;
- **Retarder** et atténuer la migration des radionucléides



La DAC, le fruit de 30 ans de développement progressif

... Et de dossiers et d'instructions à des jalons clés

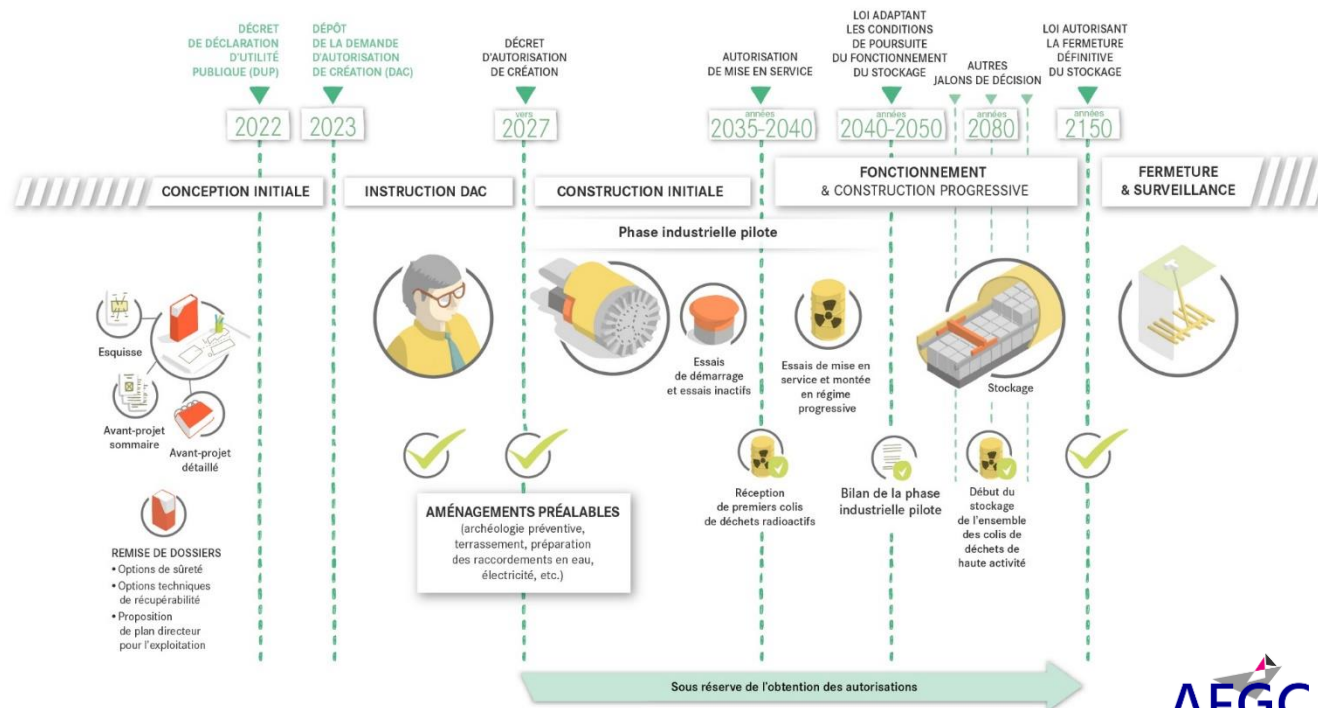


<https://www.andra.fr/depot-du-dossier-de-demande-dautorisation-de-creation-de-cigeo>

Le développement de Cigéo après le dépôt de la DAC

Le calendrier prévisionnel

LES GRANDES ÉTAPES DU PROJET GLOBAL CIGÉO



Une conception illustrative de principes directeurs

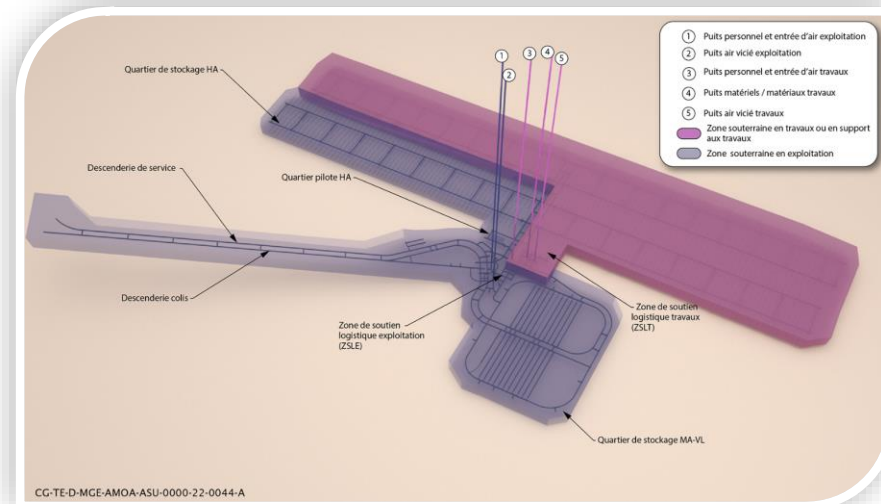
Objectif permanent de la maîtrise de la configuration du stockage

L'Andra a conçu, avec ses maîtrises d'œuvre, une architecture de stockage dans la couche argileuse du Callovo-Oxfordien respectant **les principes/exigences de sûreté** :

- **D'exploitation**, comme en installation nucléaire (INB) classique en transposant au souterrain
- **Passive** pour la sûreté après fermeture du stockage

Intégrant la **réversibilité**, déclinée en :

- **Déploiement progressif** de la construction et de l'exploitation
- **Flexibilité** de l'exploitation
- **Adaptabilité** du stockage
- **Récupérabilité** des colis

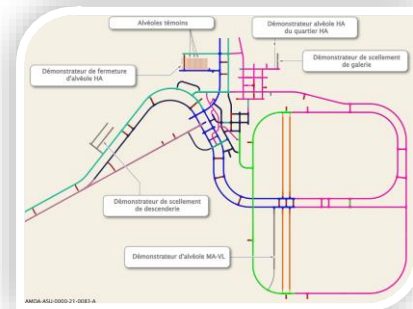
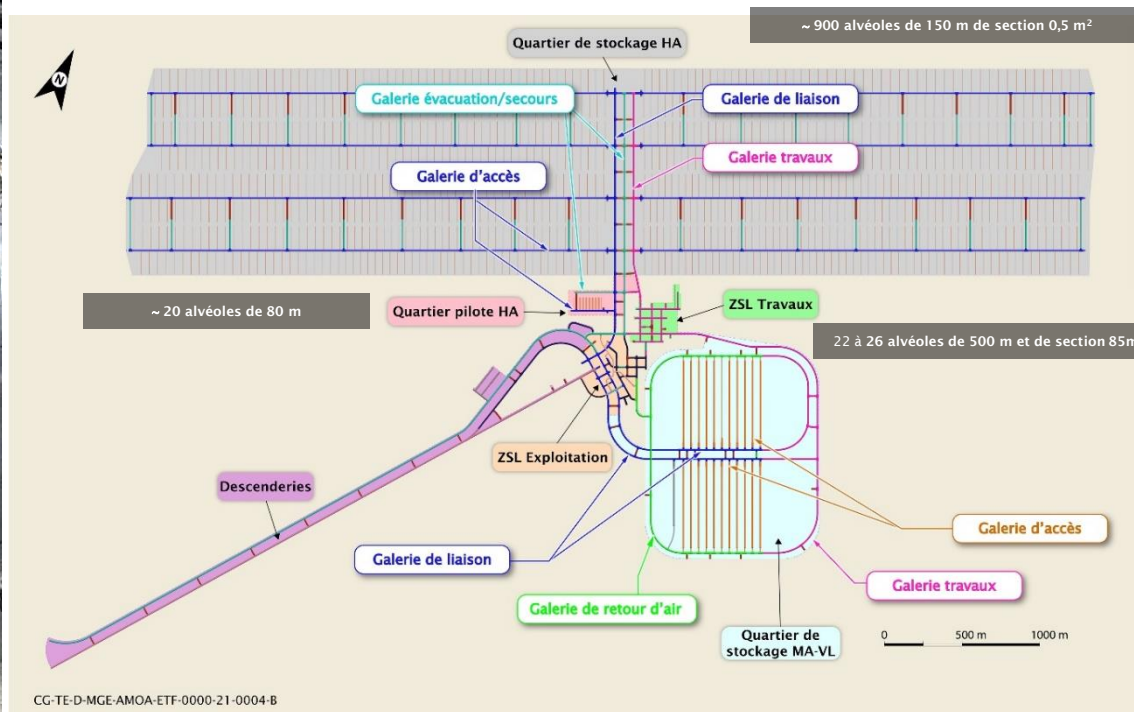


Et considérant **d'autres enjeux de haut niveau**, tels que :

- **Maîtrise** du coût global de possession (CGP)
- **Enjeux** de sécurité en phase de construction

Le projet Cigéo : la solution technique à la DAC

L'installation fond à terminaison et la tranche 1



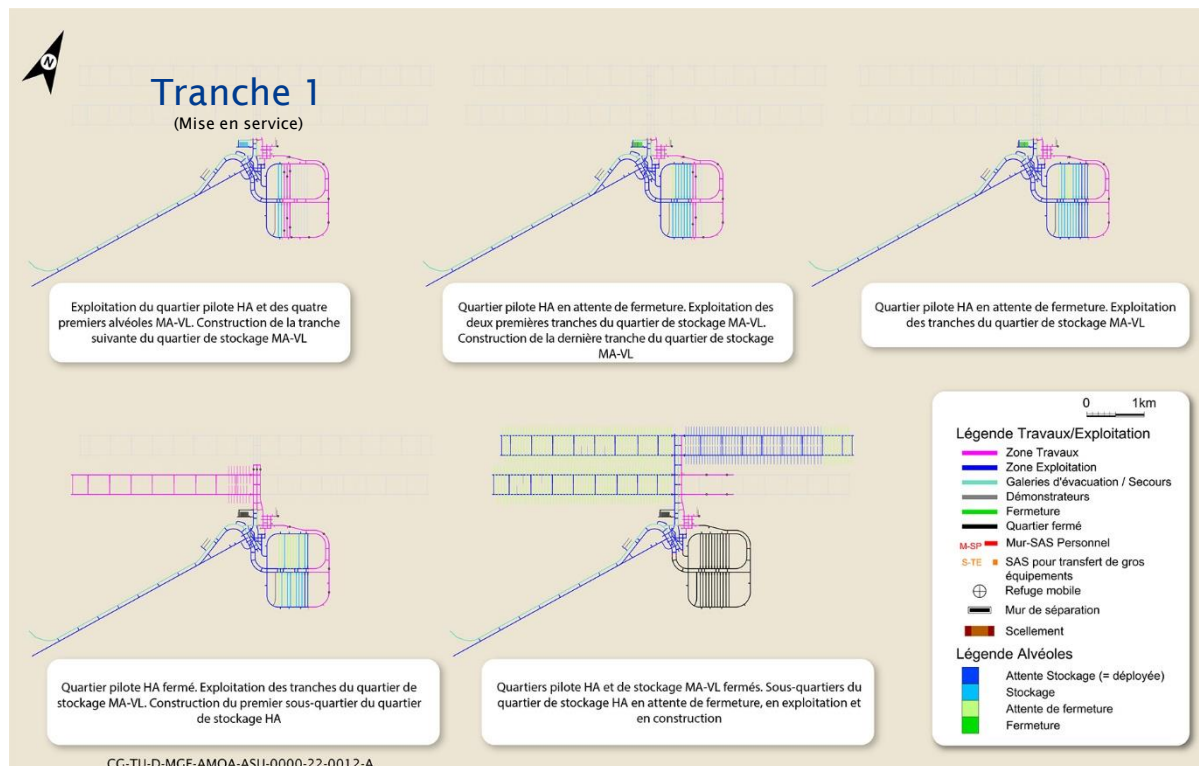
La construction initiale (Tranche 1) :

- les puits (5)
- les descenderies (2)
- Galeries
- Quartier pilote HA
- Grande boucle du quartier MA-VL

pour l'exploitation des premiers alvéoles (x4) du quartier MA-VL et le quartier pilote HA - Incluant des démonstrateurs (x5) et des alvéoles témoins (x4)

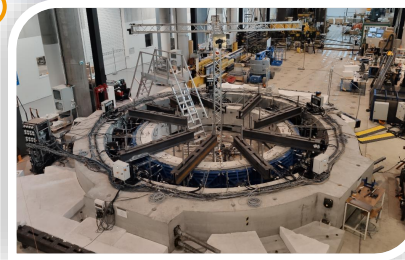
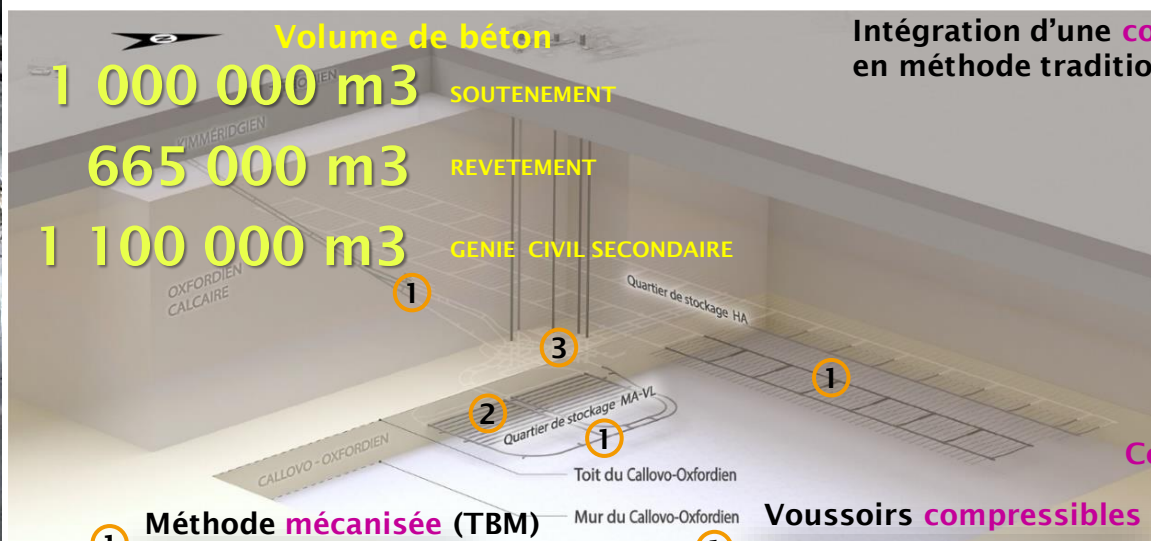
Le développement de l'installation souterraine

Un déploiement progressif



L'installation souterraine pour une durée séculaire

Des ouvrages et composants en béton pour un fonctionnement sûr



LES OUVRAGES SOUTERRAINS DE CIGEO LES ACQUIS A LA DAC ET LES DÉVELOPPEMENT À VENIR (TECHNIQUES DE CREUSEMENT ET DE REVÊTEMENT)

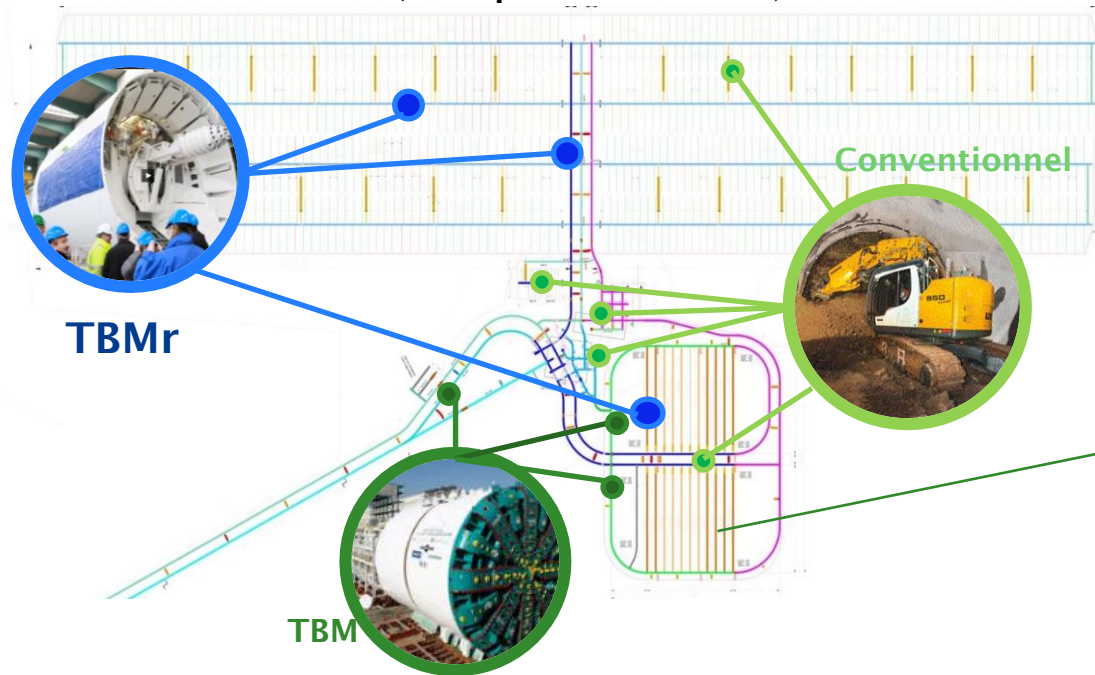
Jean TALANDIER (Andra/DISTEC)
Jad ZGHONDI (Andra/DISTEC)
Gilles ARMAND (Andra/DISTEC)

03 mai 2023

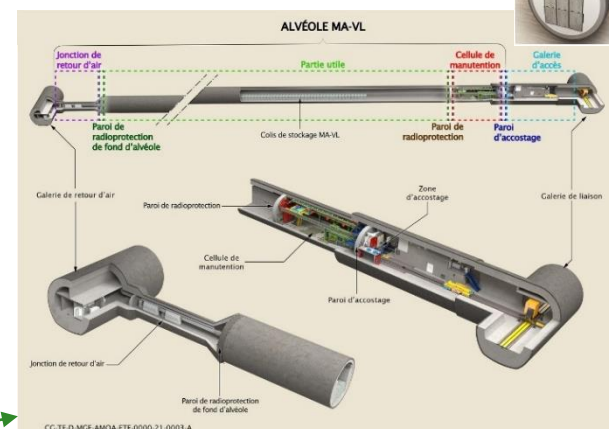
Ouvrages souterrains de Cigéo- Dossier de DAC

Méthode et dimensionnement - Un choix robuste

Carrefours et voussoirs (Exemple alvéole MAVL)



Exemple alvéole MAVL



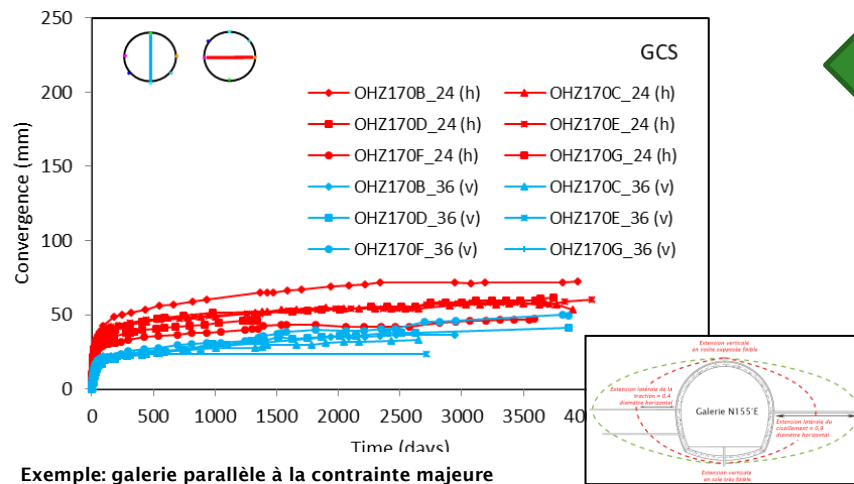
Dimensionnement robuste

- Voussoirs : béton armé C60/75 50cm + 20 cm de matériaux compressibles
- Carrefour : béton armé C60/75 de 130 cm + 20 cm de matériaux compressible (bas et long palier plastique)

REX du LS-Interaction roche/revêtement

Comportement de la roche

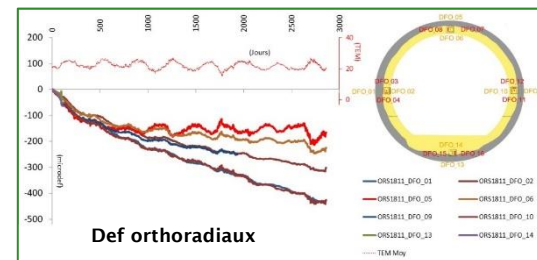
- Une fracturation induite anisotrope dont l'extension est proportionnelle au diamètre de l'ouvrage
- Un rôle important de la zone fracturée sur le comportement hydromécanique des ouvrages, avec un comportement différé observé.



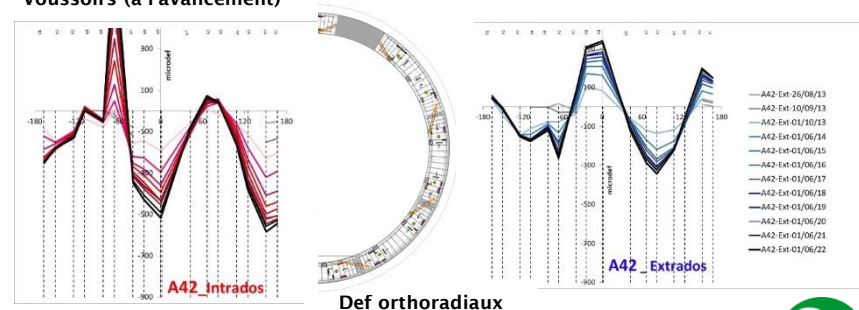
Revêtement (sans matériaux compressible)

- Chargement des revêtements continue dans le temps, avec des modes de chargements initiaux en fonction de la méthode de creusement utilisée

Revêtement coulé (6 mois après creusement)



Voussoirs (à l'avancement)



Une conception des ouvrages basée sur les acquis

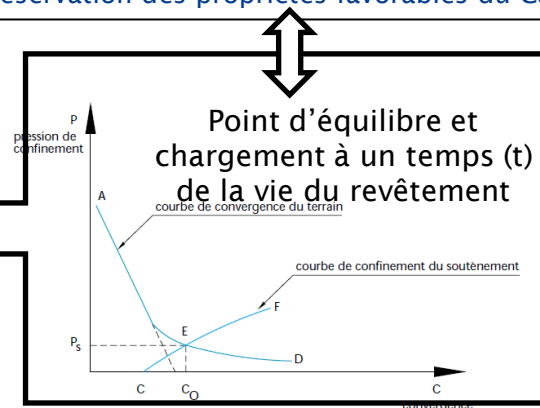
Interaction mécanique multi-matériaux et multiprocessus

Objectif du dimensionnement : sûreté d'exploitation et après fermeture

- Constructibilité et tenue des ouvrages souterrains
- Préservation des propriétés favorables du Callovo-Oxfordien

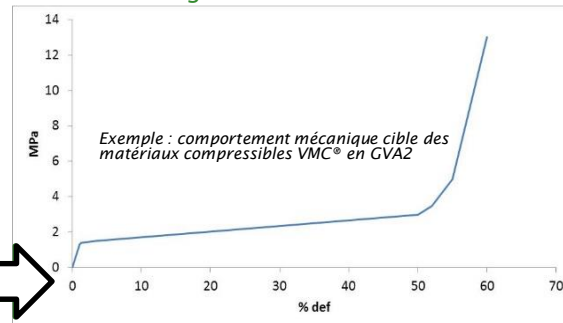
REX LS: Comportement mécanique en champ proche fonction de :

- La fracturation induite par le creusement conditionnant le comportement
- Les modalités de Creusement/revêtement



Comportement intrinsèque du revêtement

- Béton armé
- Intégration de matériaux compressibles
 - « Absorber » les efforts de la roche qui converge



Choix du couple technique intégration/matériau compressible, guidé par :

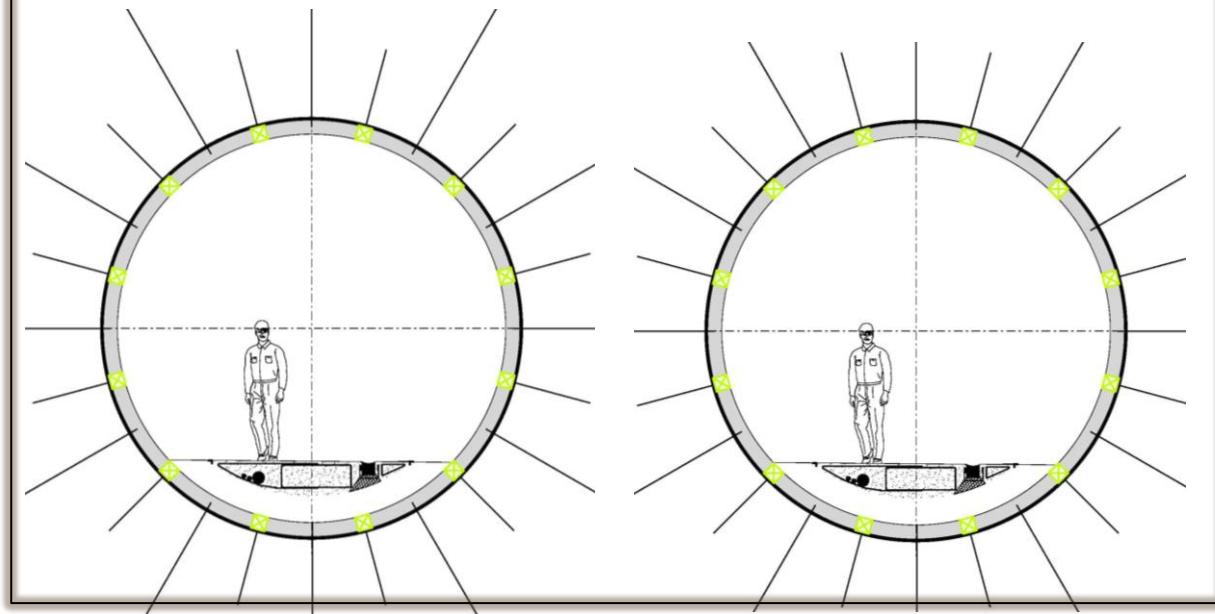
- Adéquation du produit aux exigences Cigéo
- Des optimisation technico-économiques à l'échelle industrielle de Cigéo

Programme de démonstration

Un panel de solution (matériau/méthode) adaptée aux méthodes de creusement

Méthode CTM (méthode conventionnelle)

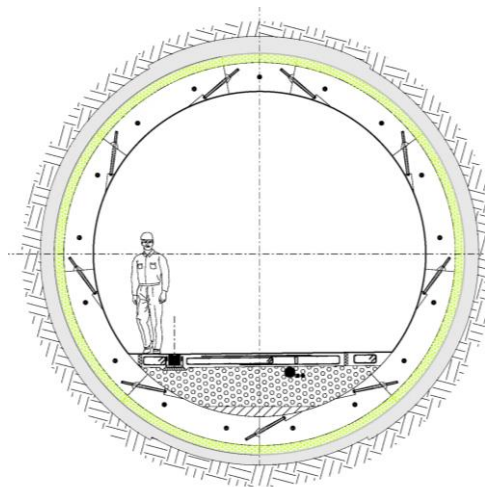
- Soutènement souple
- À l'interface soutènement/revêtement



Représentation schématique du fonctionnement

Méthode TBM (méthode mécanisée)

- À l'interface roche/voussoir



La méthode CTM avec soutènements souples

Les observations réalisées au Laboratoire Souterrain de Meuse/Haute-Marne

Trois types de soutènements souples « compressibles » testés

- Faisabilité technologique approuvée
- Un bon fonctionnement « d'accompagnement de la convergence » (*9 ans GCS*)
- Pas d'évolution de la zone fracturée observée dans les soutènements souples sur la période de suivi
- Rétro analyse : pression de confinement équivalente au soutènement 0,35MPa $\Rightarrow$ pas de nécessité de pression minimale élevée (seuil élastique pour le matériau compressible).



Intégration de **cintres coulissants**



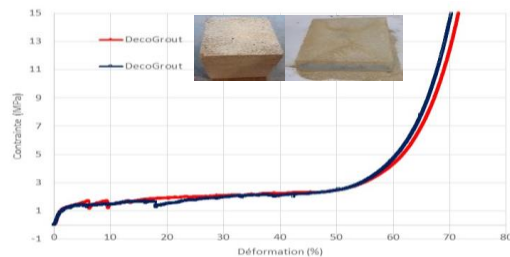
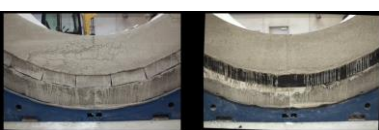
Intégration de **saignées**



Intégration de **cales compressibles**

Contraintes technologiques

Analyse du comportement



La méthode CTM: intégration d'une couche compressible à l'interface sout/revêt

Exemple: Programme de démonstration d'intégration de panneaux compressibles

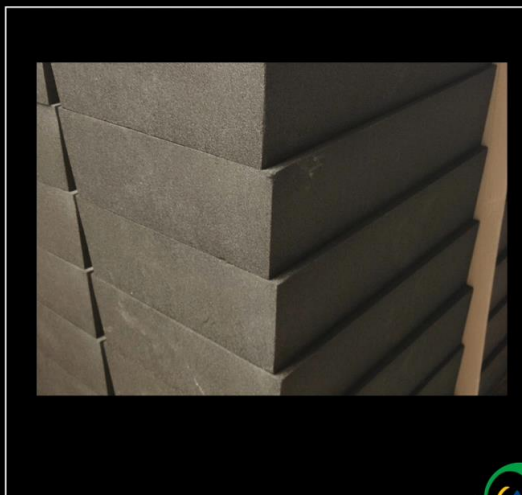
Faisabilité technologique d'intégration de panneaux compressibles en méthode CTM

Adaptation des panneaux et de la mise en place

- Panneau **courbe** (1x1x0,15cm), intégration de **cales**, **point d'ancrage**
- **Manipulation mécanisée**
- **Injection de l'interface** panneau béton projeté via des **douilles** intégrées
- Fixation **4 - 6 points / panneau**



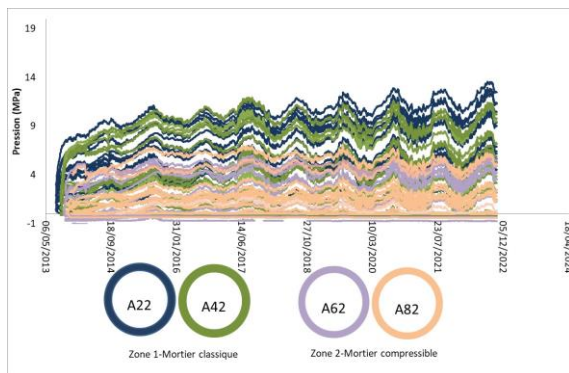
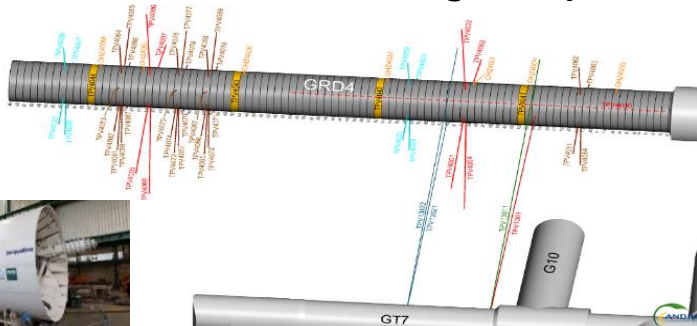
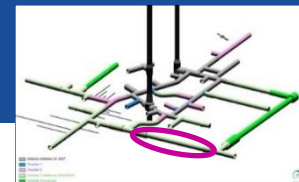
- Panneau **trapézoïdal** (0,45 x 0,45 x 0,15cm)
- **Manutention manuelle** (produit léger)
- **Projection d'une colle** à l'interface
- Fixation par boulon (**1 boulon / panneau**)



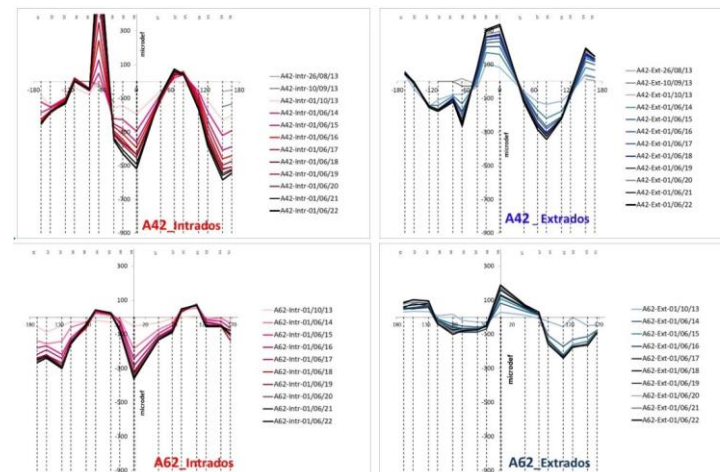
Les voussoirs compressibles

Un retour d'expérience depuis 2014

Anneaux à mortier de boudage compressible



Réduction du chargement des voussoirs.



Déformations ortho. Vs position angulaire (intrados/extrados)

Evolution des pressions orthoradiales dans les voussoirs

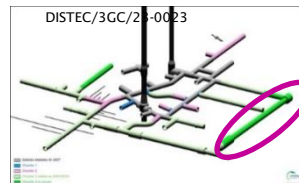
Les voussoirs compressibles

Exemple de la démarche multi-échelle (solution VMC)



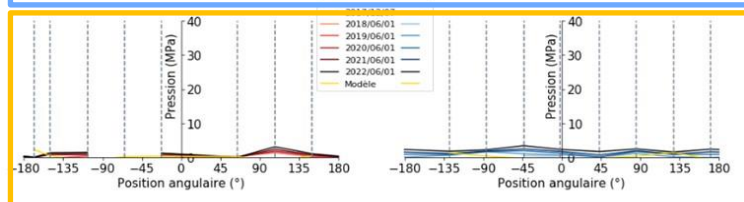
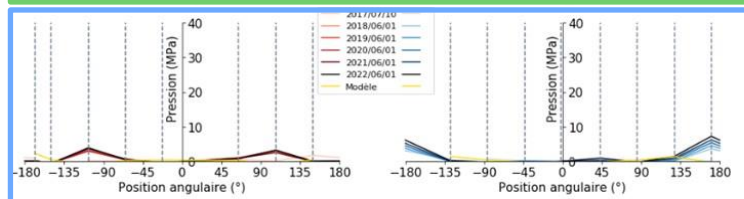
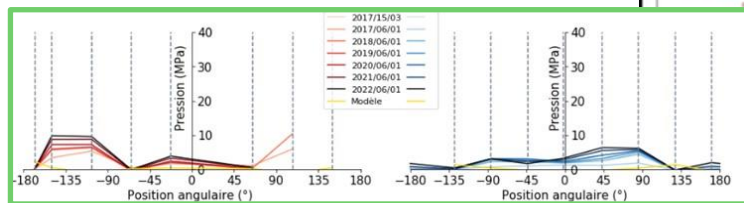
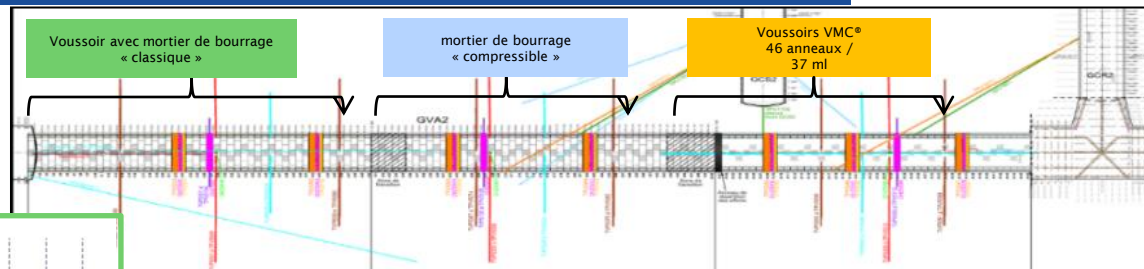
Les voussoirs compressibles- VMC solution

Réalisation de la GVA2 drift parallèle à σ_h



Caractéristiques GVA2 :

- Diam excavation = 6,27 m
- Longueur galerie= 119 m
- 145 anneaux de 9 voussoirs
- Tronçon VMC: 09 à 12/2017



PRT ortho. fct position angulaire (intrados/extrados)



Démonstration de la faisabilité technologique et suivi du comportement de l'ouvrage.

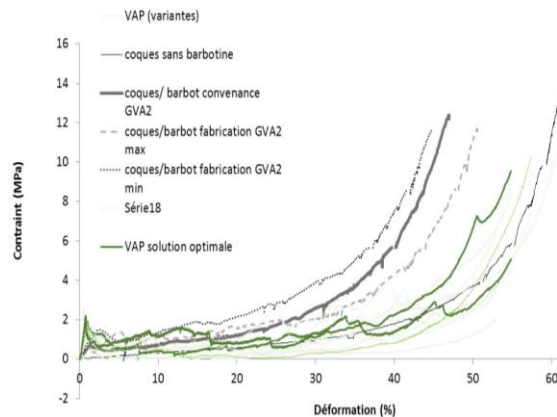
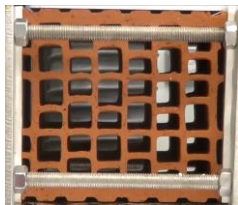
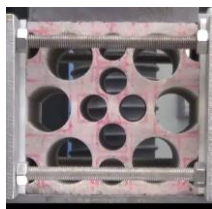
Ce document est la propriété de l'Andra.
Il ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation expresse et préalable.

Les voussoirs compressibles-Autre solutions compressibles

Exemple : Panneaux compressible VAP (Andra) et béton mousse (CERIB/Andra)

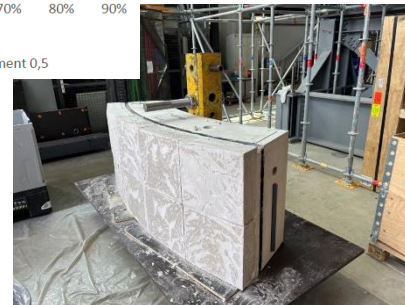
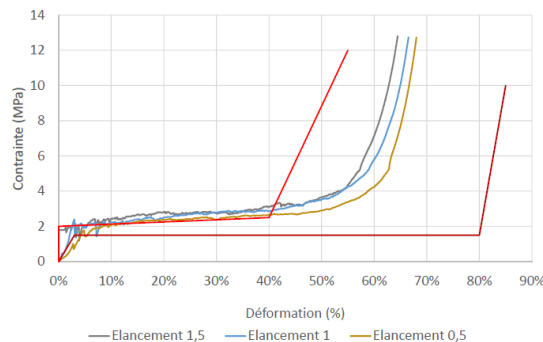
VAP (brevet Andra) :

- Solution multi-panneaux en béton ou terre cuite à architecture de vide spécifique



Béton mousse (brevet CERIB/Andra) :

- Panneaux préfabriqués à porosité prononcée

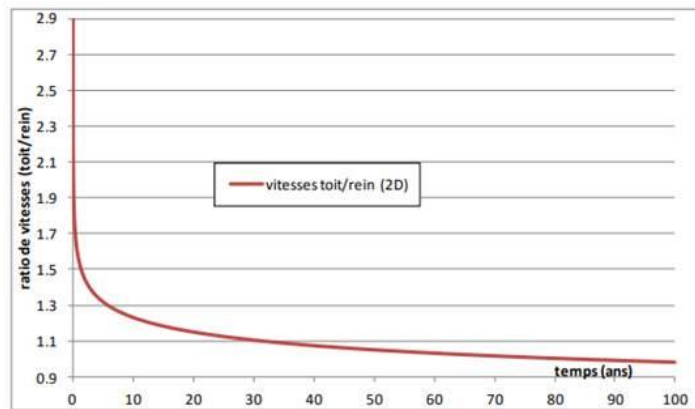


Les voussoirs compressibles

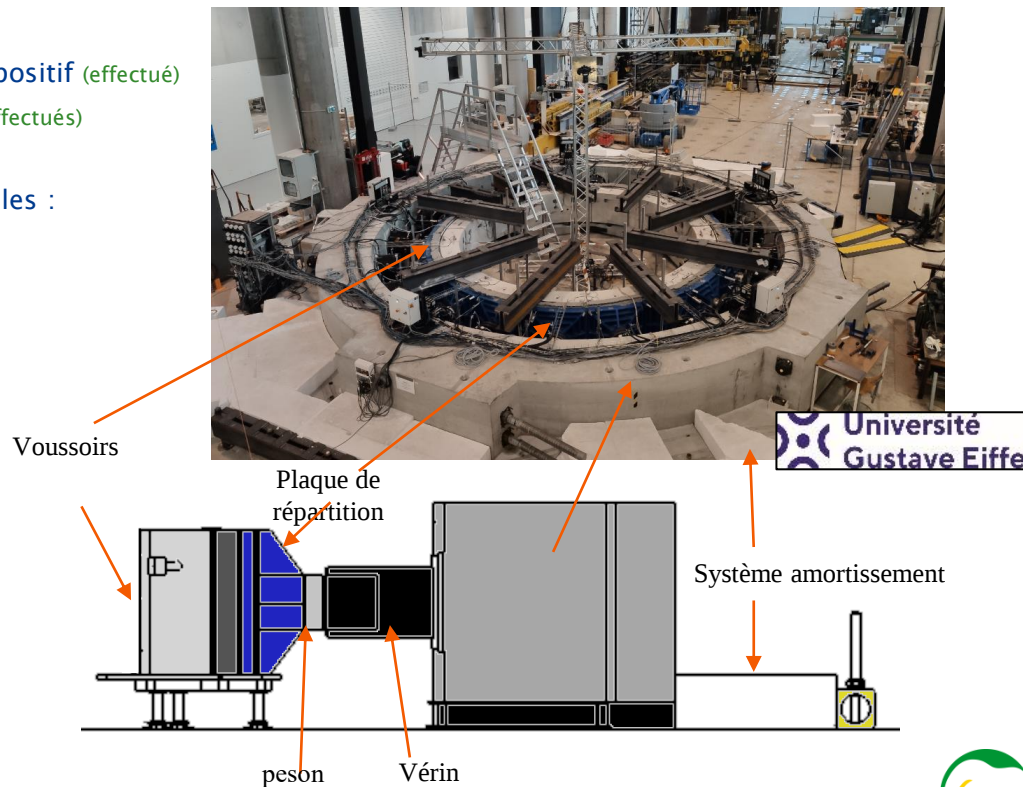
Démonstration du comportement long terme, échelle 1:1

Programme expérimental

- Essai de qualification : chargement accidentel sur le dispositif (effectué)
- Solution VMC : chargement isotrope et anisotrope (5/5 effectués)
- Chargement d'un anneau non compressible (1 à effectuer)
- Chargement de 4 autres types de matériaux compressibles :
 - 2 solutions développées par l'Andra
 - 2 solutions autres (en plus adaptées aux carrefours)



Anisotropie de vitesse de convergence Vs temps (basée sur une simulation Cox/revêtement VMC)

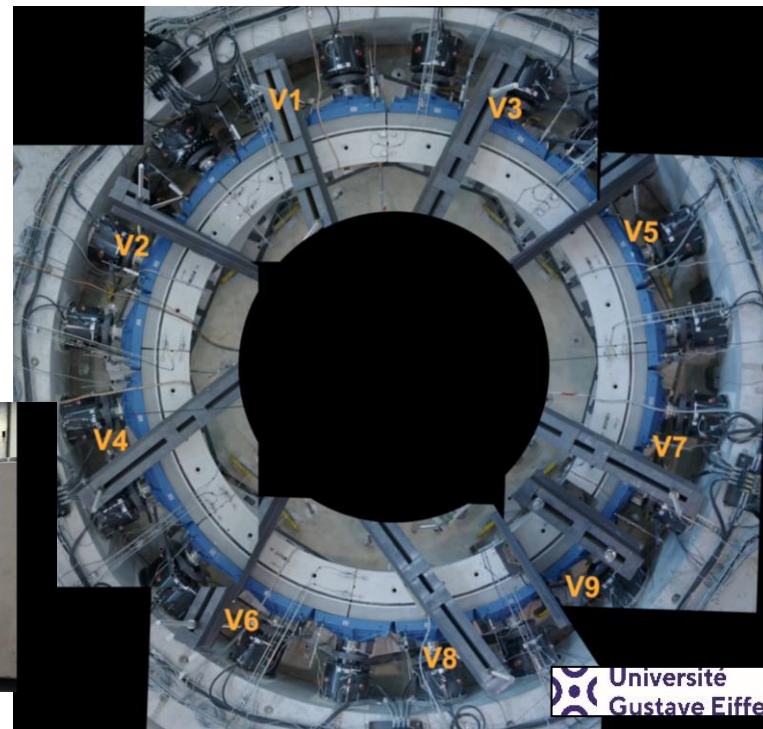
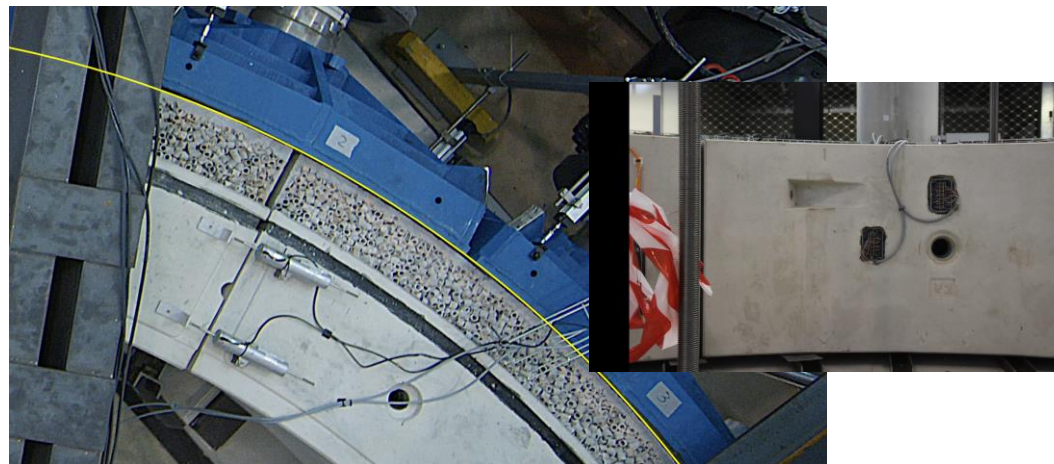


Les revêtements compressibles

Démonstration du comportement long terme : résultats importants

Analyse en cours suite à 4 essais de chargements (environ 3,5 MPa au max/ 35 % de déformation de la couche compressible) :

- Faisabilité approuvée du banc d'essai
- Aucune fissure observée dans la partie béton armée des voussoirs (hors zone de matériaux compressible)
- Déformations/contraintes acceptables dans la partie béton armée
- La couche compressible joue bien un rôle d'amortissement d'effort



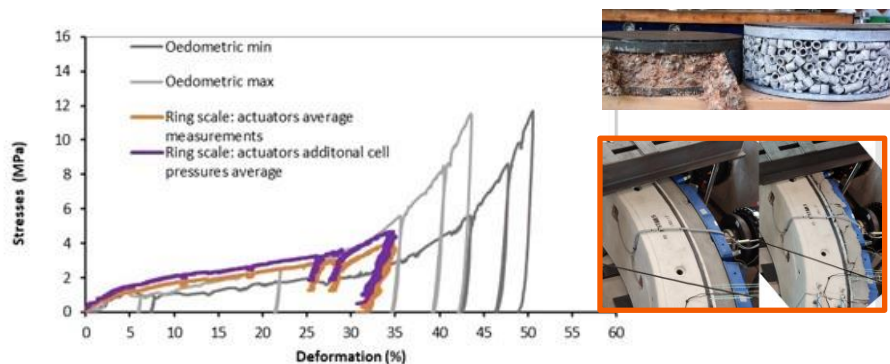
Université
Gustave Eiffel

Les revêtements compressibles

Exemple : quelques résultats sur l'essai isotrope n°1 & 2

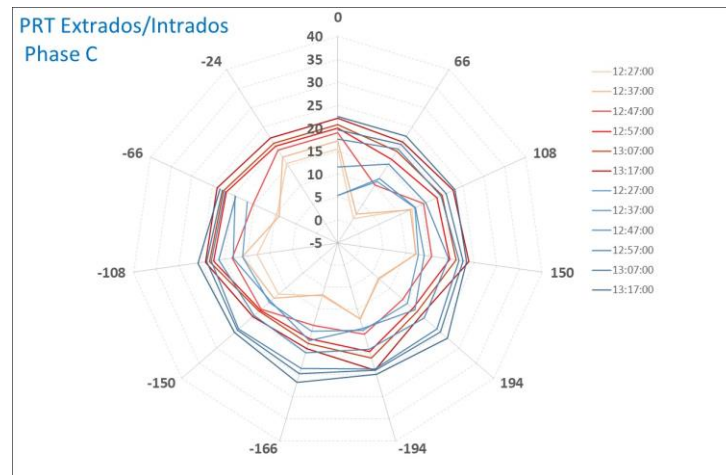
Exemple compressibilité essai isotrope N1 :

- Comportement de l'anneau compressible qui respecte le comportement à l'échelle oedométrique
- Compressibilité totale testée de l'anneau compressible de l'ordre de 35 %
 - Ordre de grandeur représentatif d'un fonctionnement à une période séculaire avec un mode de chargement similaire
- Apport des interfaces et de la compression de la partie béton armée de l'ordre de 5 à 7 %
- Analyse de l'homogénéité de la couche compressible



Comportement de l'anneau :

- Importance de la phase de mise en charge : difficulté à une telle échelle d'avoir un chargement parfaitement isotrope
- Chargement quasi-isotrope acceptable
- Importance du rôle des interfaces entre voussoirs (optimisation du dimensionnement)



Compressibilité du voussoir VMC : Essais oedométrique sur échantillons Vs comportement du chargement de l'anneau compressible (vérin/peson)

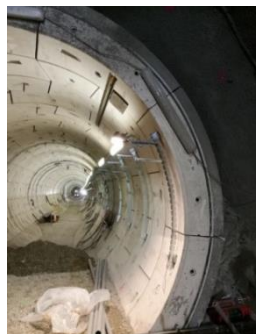
Pressions totales orthoradiales à l'intrados et extrados de l'anneau compressible positionnées en fonction de la distribution angulaire

Les revêtement des ouvrages

Une solution technique déjà solide

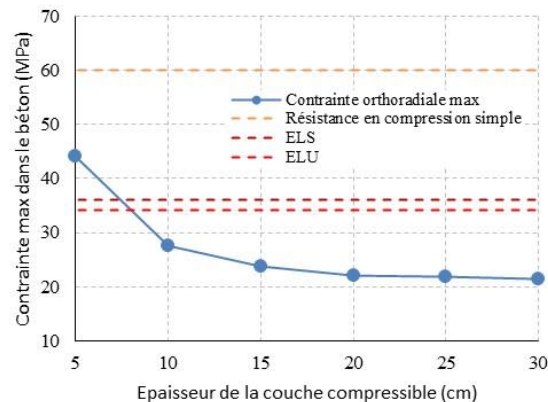
Connaissance actuelle : une solution déjà solide

- Intérêt mécanique et analyse du comportement à l'échelle de l'ouvrage dont la zone fracturée (REX LS)
- Démonstration de la faisabilité technologique
 - Démarche de démonstration multi-échelle jusqu'à l'échelle de la galerie (solution VMC)
 - Différentes solutions/techniques d'intégration
- Comportement à différents stades de la vie de la structure, dont le comportement mécanique long terme (en cours)
 - Développement de loi de comportement et loi de comportement adaptées.
 - Essai de chargement « accéléré »



Phase post dépôt DAC : optimisation technico-économique

- Consolider et compléter les études technico-économiques (solution innovantes/méthode d'intégration)
- Compléter le programme de démonstration au LS
- Consolider et préciser les démarches et marges de dimensionnement des revêtements compressibles.



LES BÉTONS DE L'INSTALLATION SOUTERRAINE DE CIGEO

03/05/23

Guillaume CAMPS

*Direction Scientifique et Technique
Chef du service Matériaux, Conteneurs et Alvéole HA*

Présentation à l'Association Française de Génie
Civil (AFGC)

Les composants cimentaires de l'installation souterraine

Nature, fonctions et démarche de caractérisation de la durabilité

Des matériaux très largement utilisés

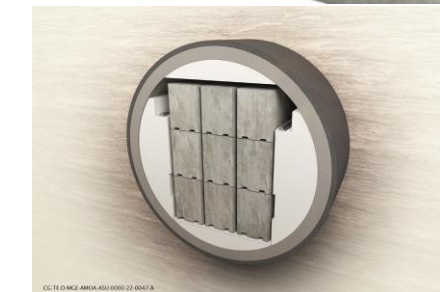
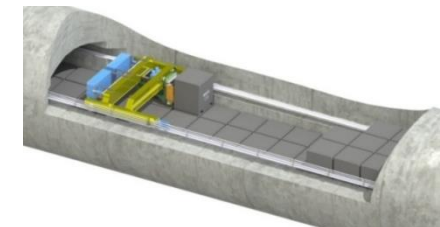
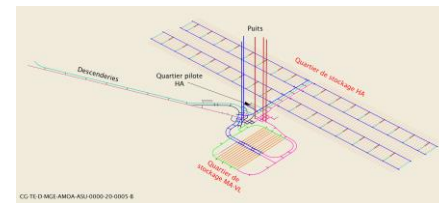
- Matrices de conditionnement des déchets MA-VL
- Conteneurs primaires et conteneur de stockage des déchets MA-VL
- Structure des ouvrages (revêtement/soutènement...)
- Massif d'appui des ouvrages de fermeture

Des fonctions spécifiques en exploitation et en après-fermeture

- Une fonction mécanique en exploitation : tenue mécanique des conteneurs de stockage et des ouvrages
- Une fonction chimique en après fermeture : immobilisation des radionucléides (solubilité, rétention) au travers de conditions physico-chimiques alcalines

Une démarche progressive de caractérisation de la durabilité en lien avec l'évolution du projet Cigéo

- Jusqu'au Dossier 2005 : base d'une évaluation d'une évolution chimique lente sur le long terme
- APS - APD (2005 - 2016) : passage de l'échelle du matériau à celle du composant
- DOS - DAC et instruction : prise en compte des couplages chimie/mécanique/hydrique et réalisation de démonstrateurs échelle 1



Les composants cimentaires de l'installation souterraine

Une approche de caractérisation multi-échelle, avec des moyens complémentaires et mobilisant de nombreux acteurs

- Une approche multi-échelle



- Des moyens complémentaires
 - Laboratoire de « surface » et laboratoire souterrain
 - Démonstrateurs
 - Analogues naturels et archéologiques
 - Simulation numérique
- Des collaborations depuis plus de 30 ans avec :
 - Des laboratoires académiques (universités, écoles...)
 - Des organismes de R&D (CEA, EDF, BRGM, CSTB...)
 - Des industriels (CDB, CAPREMIB, Orano TEMIS, RIBA, EFECTIS...)
 - Nos homologues (Nagra, SKB, Ondraf/Niras, VTT, Posiva)





Les acquis pour le dossier de Demande d'Autorisation de Création

Le socle de connaissances sur les matériaux cimentaires

Exemple du développement des conteneurs de stockage MA-VL

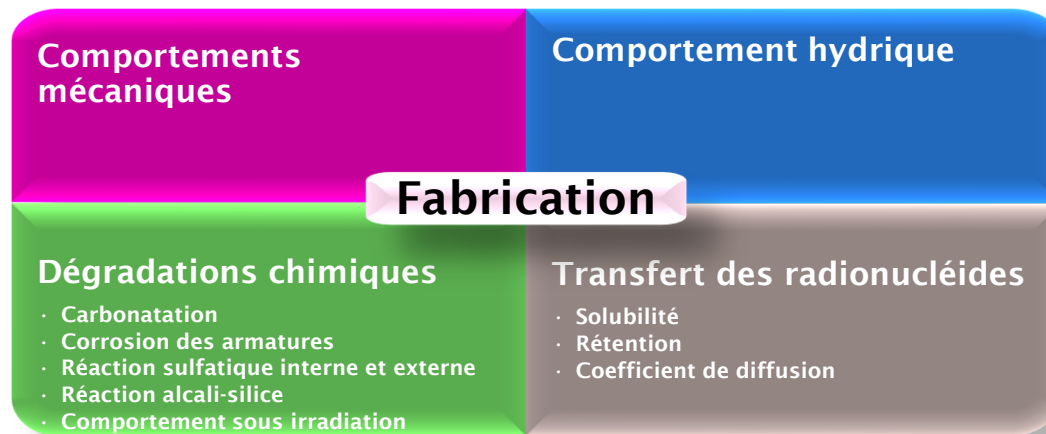
Les acquis pour le dossier de DAC

Le socle de connaissances sur les matériaux cimentaires

Les objectifs des travaux de R&D sur les matériaux cimentaires

- Maîtriser le comportement des bétons en phase de fonctionnement pour garantir le maintien des fonctions des composants sur une durée d'ordre séculaire
- Prédire les évolutions à long terme et leur impact sur le transfert de la radioactivité
- Traduire ces objectifs en spécifications pour les formulation des bétons

→ L'étude des comportements couplés



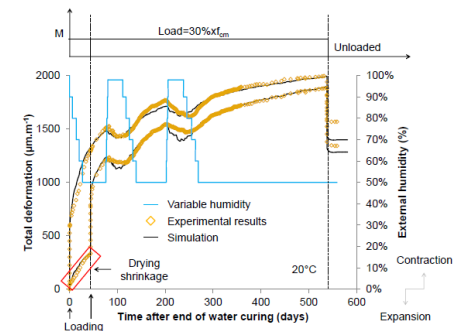
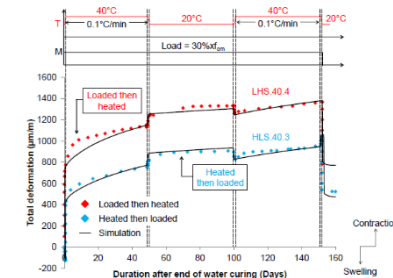
Couplage dégradations / transfert

Les acquis pour le dossier de DAC

Le socle de connaissances sur les matériaux cimentaires

○ L'influence des conditions de fonctionnement sur les comportements T-H-M

- Comportement T-M
 - Impact sur l'amplification des déformations et risques d'endommagement
- Comportement H-M
 - Impact des cycles hydriques sur le comportement mécanique instantané et les déformations différées
 - Développement de modèles représentant le développement des caractéristiques physiques avec l'hydratation et notamment les phénomènes de retrait et de fluage
- Développement de méthodes de mesures pour accéder rapidement aux caractéristiques hydriques et propriétés de transfert des matériaux
 - Sorption/désorption d'eau, perméabilités (pulse test), diffusion aqueuse (EIS, migration), saturation en eau (TDR)



Les acquis pour le dossier de DAC

Le socle de connaissances sur les matériaux cimentaires

○ Les dégradations chimiques en phase de fonctionnement

• La carbonatation

- Phénoménologie connue étudiée en conditions couvrant les conditions de fonctionnement en exploitation et en après fermeture (HR, T, matériaux)
- Impact non significatif : échelle centimétrique sur la phase de fonctionnement

• La corrosion des armatures

- Modèles mécaniques macroscopiques disponibles
- Faibles vitesses de corrosion ($< 1 \mu\text{m/an}$) dans l'ensemble des conditions d'exploitation (pas de variation avec la nature du béton)
- Impact non significatif en phase de fonctionnement

• Les réactions sulfatiques

- L'absence de risque est garantie par le respect des recommandations/spécifications issues du génie civil
 - Sur les matières premières et les formulations, sur les conditions de mises en œuvre ($T < 65^\circ\text{C}$ lors de la prise) et sur les conditions de fonctionnement ($T < 65^\circ\text{C}$ par conception)

• La réaction alcali-silice

- Sélection des matières premières dans le respect des spécifications sur la non réactivité des granulats, vérifications de la sensibilité des granulats

Les acquis pour le dossier de DAC

Le socle de connaissances sur les matériaux cimentaires

- Le comportement sous rayonnements
 - Essais réalisés dans les conditions imposées par les déchets MA-VL
 - Pas de variation du comportement mécanique comparé à un essai hors irradiation
 - Pas de variation des vitesses de corrosion
- Les dégradations chimiques à long terme et l'impact sur le transfert des radionucléides
 - Une phénoménologie d'altération identique à la phase de fonctionnement mais des temps caractéristiques et des extensions différentes
 - Réactivités chimiques
 - Similitudes aux différentes interfaces (milieu géologique, remblais, déchets)
 - Simulations en transport réactif accessibles
 - Un large corpus de connaissance sur la solubilité, la rétention et la diffusion des radionucléides en fonction de l'état de dégradation du béton
 - Reposant sur des données propres, des projets européens et la littérature
 - Permettant de définir des valeurs de référence et des gammes de valeurs associées pour chaque état de dégradation



Les acquis pour le dossier de DAC

Le développement des conteneurs de stockage MA-VL

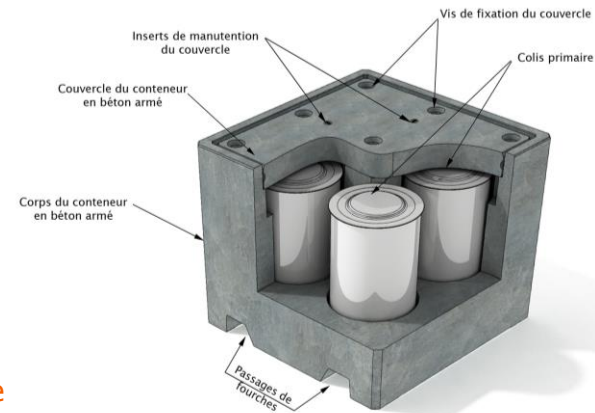
➤ Etablissement de spécifications pour les bétons des composants de Cigéo

○ Exemple du développement des conteneurs de stockage MA-VL

Les fonctions du conteneur de stockage (manutentionnabilité, protection des colis primaires en situations accidentelles...) doivent être maintenue durant la phase fonctionnement de durée d'ordre séculaire

➤ Traduction en terme d'exigence sur la formulation du béton

- Classe d'exposition XA2
- Béton Hautes Performances et autoplaçant (NF EN 206/CN)
- Béton armé, enrobage 40 mm (Eurocode 2)
- Granulats non réactifs vis-à-vis de la réaction alcali-silice
- Avec/sans fibres de polypropylène pour améliorer le comportement au feu du béton



CG-01-D-MGE-AMOA-CS0-7000-17-0011-A Extrait sans cote

➤ Conception et vérification des performances du conteneur de stockage MA-VL

Les acquis pour le dossier de DAC

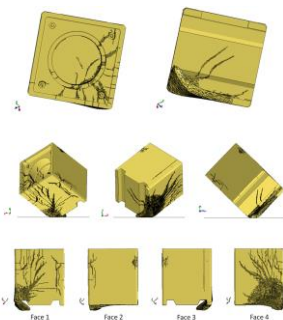
Le développement des conteneurs de stockage MA-VL

Processus de conception et vérification de performances

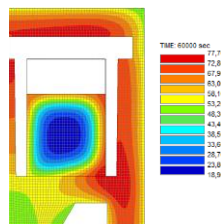
Des simulations pour :

- Dimensionner le conteneur de stockage
- Vérifier le comportement des conteneurs de stockage vis-à-vis des fonctions attribuées

Calculs de tenue à la chute



Calculs de tenue à l'incendie



La fabrication de prototypes pour valider la mise en œuvre en conditions industrielles

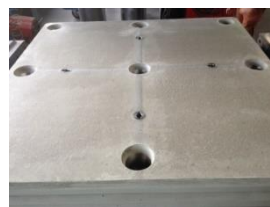
Corps d'un CS2.2 et d'un CS3



Réservations d'un CS4.2



Couvercle d'un CS4



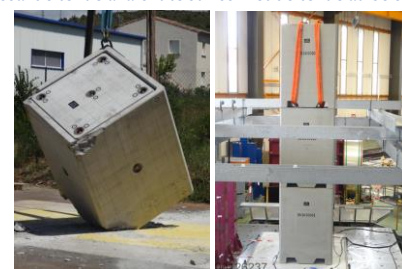
Réservation d'un CS3



Des essais de vérification des performances pour vérifier le respect des fonctions attribuées

- Tenue à la chute
- Tenue à l'incendie
- Tenue au gerbage
- Tenue au séisme
- Evacuation des gaz
- Facteur de remise en suspension
- Durabilité des matériaux

Essai de tenue à la chute sur coin et de tenue au séisme



Les acquis pour le dossier de DAC

Le développement des conteneurs de stockage MA-VL

Principales conclusions

- Démonstration de la faisabilité industrielle
 - Fabrication d'une cinquantaine de prototypes, dans différentes usines de préfabrication, avec différentes méthodes de mise en œuvre
- Le respect des fonctions attribuées
 - Vérification de l'atteinte de performances en fonctionnement normal
 - Maintien de la durabilité des performances
 - Durabilité du béton dans les conditions d'environnement à l'échelle séculaire
 - En situations incidentelles et accidentelles
 - Protection des colis primaires
 - Maintien de la fonction de manutention pour permettre l'évacuation





Les activités scientifiques et techniques post dépôt du dossier de DAC

Les activités scientifiques et techniques post dépôt du dossier de DAC

Consolidation de l'évaluation de la durabilité des bétons sur la durée de fonctionnement

- Quantifier les marges sur la durabilité en vue d'optimisations techniques et économiques et pour garantir des performances sur des durées supérieures au siècle
 - Poursuivre le développement des modèles de corrosion des armatures, en intégrant le couplage évolution chimique et hydrique (carbonatation) avec l'évolution mécanique, afin de représenter l'endommagement du composant à grande échelle
 - Améliorer la représentativité et la robustesse des modèles de comportement hydromécanique en tenant compte du comportement mécanique différé du béton
 - Développer des outils de simulations couplées THMC en situation de stockage pour conforter les marges de conception
- Développer/adapter des dispositifs de surveillance pour suivre l'évolution THMC en phase de fonctionnement et être à même de détecter l'apparition de pathologies (fissuration, écaillages, gonflement...)

Les activités scientifiques et techniques post dépôt du dossier de DAC

Préparer les évolutions de formulation des bétons

- Tenir compte de la disponibilité/l'obsolescence des matériaux
 - Suivi des évolutions de disponibilité des matériaux
 - Développement/caractérisation de formulations en conséquence
- Adaptation aux évolutions réglementaires vers des bétons « bas carbone »
 - Veille sur les travaux de la profession
 - Suivi des évolutions de réglementation
 - Développement de formulations avec des matériaux « bas carbone »
 - Ex : développement de formulations avec du métakaolin et des additions calcaire

- ➔ Vérification du respect des exigences applicables aux composants de Cigéo
- ➔ Adaptation et validation des modèles de simulation multi-couplage de comportement THMC et des modèles géochimiques supports à la démonstration de l'atteinte des performances dans le temps