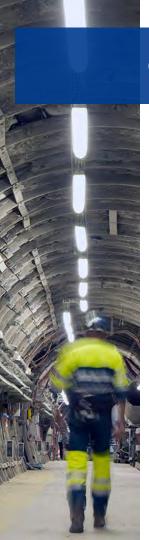


LE PROJET CIGÉO

Réunion d'information et d'échange Andra - CLIS

9 décembre 2019



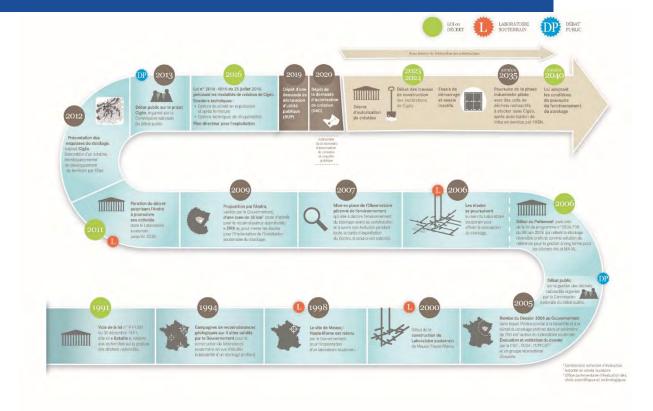


Ordre du jour

- 1. Introduction générale : le point sur le projet Cigéo
- 2. L'architecture générale fond du centre de stockage et sa réversibilité
- 3. Les alvéoles MA-VL : dimensionnement, constructivité et tenue durant la période d'exploitation
- 4. Les alvéoles HA : dimensionnement, constructivité et tenue durant la période d'exploitation, y compris corrosion
- 5. Bitumes : point d'étape



L'histoire du projet



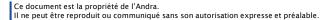




Le principe du stockage profond

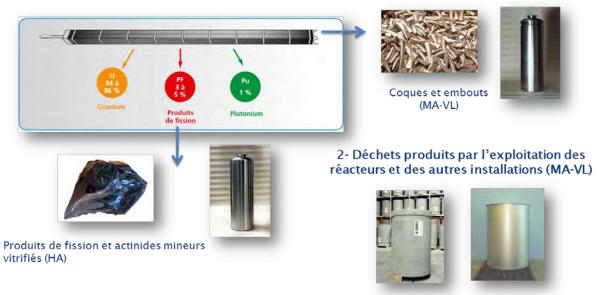
Le niveau de radioactivité et la durée de de vie des déchets HA et MA-VL ne permettent pas de les stocker, de manière sûre à long terme, en surface ou en faible profondeur

- Objectif du stockage profond : isoler les déchets radioactifs de l'homme et de l'environnement pendant des centaines de milliers d'années
 - => Installations de stockage à \sim 500 m de profondeur dans une roche argileuse épaisse de plus de 130 m et âgée de plus de 160 millions d'années
- Les principes :
 - Assurer le confinement des substances radioactives tant qu'elles présentent des risques.
 - Ne pas faire peser de charge sur les générations futures
- Le stockage profond assure une protection sur le très long terme sans nécessiter d'interventions humaines :
 - Situé en grande profondeur, Cigéo ne subira ni les catastrophes naturelles, ni les ruptures de civilisations
 - La couche d'argile est une barrière naturelle qui prendra le relais des ouvrages humains



Les déchets de Haute Activité (HA) et de Moyenne Activité à Vie Longue (MA-VL)

1- Déchets issus du traitement des combustibles usés



Volume de déchets prévus : environ 70 000 m³ de déchets MA-VL (dont environ 60% déjà produits) et 10 000 m³ de déchets HA (dont environ 40% déjà produits)

Scénario industriel fourni par les producteurs, fin de vie du parc électronucléaire actuel

Ils sont entreposés en surface : Marcoule, Cadarache, La Hague et prochainement au Bugey (ICEDA)



15 km² De zone de stockage

250 Km de galeries et alvéoles

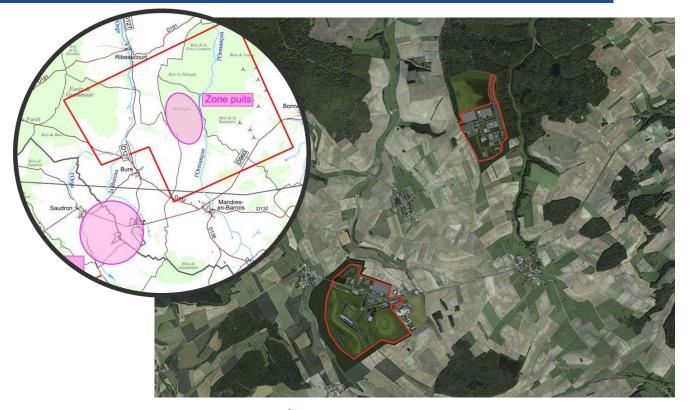
85000 m³ de déchets

120 Ans d'exploitation

25 Mds d'euros

LE PROJET DE STOCKAGE CIGÉO LABORATOIRE SOUTERRAIN ZONE DESCENDERIE **ZONE PUITS** Mandres-en-Barrois - 20 m PUITS - 120 m DOUBLE DESCENDERIE ZONE DE STOCKAGE HA ZONE DE STOCKAGE MA-VL - 420 m - 550 m

Implantation des installations souterraines et de surface de Cigéo





Zone descenderies Réception, contrôle et préparation des colis



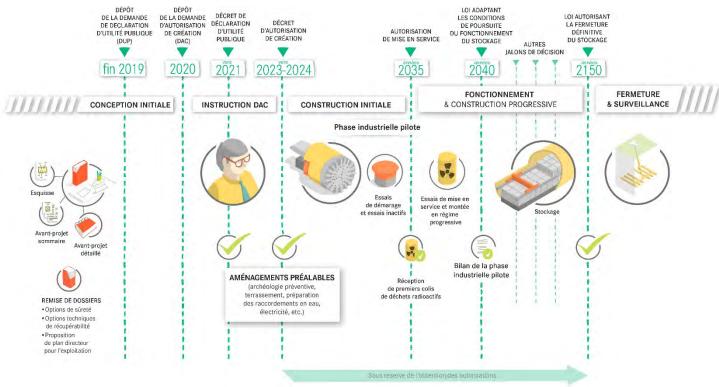


Zone des puits et de soutien aux activités souterraines



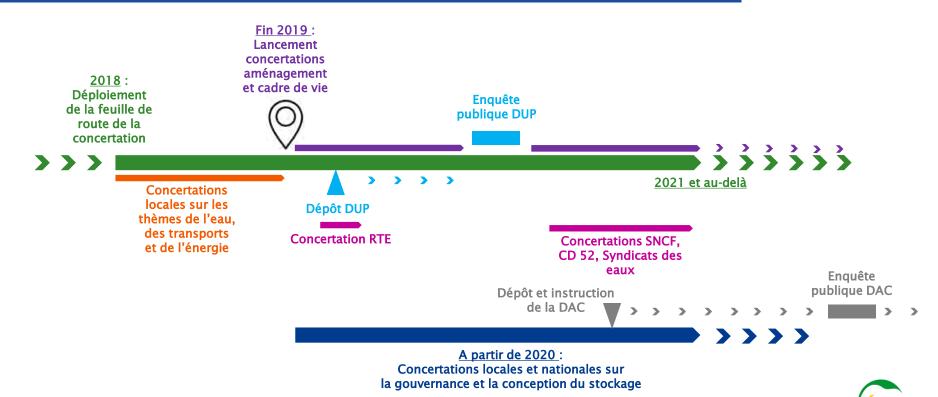


Calendrier du projet





La concertation sur le projet Cigéo: un processus continu et de longue durée





LE PROJET CIGÉO : AVANCEMENT

Réunion d'information et d'échange Andra - CLIS 9 décembre 2019



Le projet Cigéo : les grands dossiers en cours



- o Le dossier de DAC
- o La configuration de fin d'APD pour le dossier de DAC





Le dossier de DUP



La DUP, une première étape dans le processus d'autorisation du centre de stockage Cigéo

- La DUP du centre de stockage Cigéo ne porte QUE sur les opérations sous maîtrise d'ouvrage Andra.
- La DUP est délivrée après enquête publique, par décret du Premier Ministre, après avis du Conseil d'Etat (durée de validité de la DUP entre 10 et 15 ans)
- La délivrance de la DUP ne préjuge pas de l'autorisation définitive de Cigéo : de nombreuses autorisations seront encore à obtenir après l'obtention de la DUP pour permettre la réalisation du projet, dont le décret d'autorisation de création (DAC)
- La DUP ne traite pas des questions techniques qui sont abordées dans le cadre d'autres procédures ultérieures : permis d'aménager avant fouilles, défrichement, etc.
- Et d'autres DUP seront nécessaires pour les opérations conduites par les autres maîtres d'ouvrage du projet global Cigéo





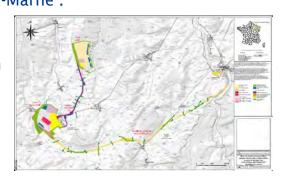
Périmètre de la DUP et de son étude d'impact

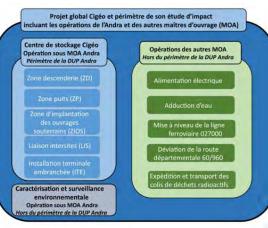
 Les opérations du centre de stockage Cigéo, sous MOA Andra (encadré bleu), sont incluses dans le périmètre de la DUP

11 communes concernées par le centre de stockage Cigéo,

→ 8 en Meuse et 3 en Haute-Marne :

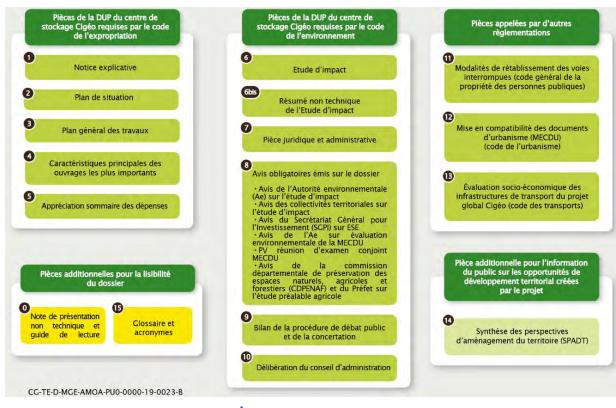
- ✓ Mandres en Barrois
 - Mandres en Barrois
 - ✓ Bure
 - ✓ Bonnet
 - √ Gondrecourt-le-Château
 - √ Horville-en-Ornois
 - √ Houdelaincourt
 - ✓ Ribeaucourt
 - ✓ Saint Joire
 - ✓ Saudron.
 - √ Gillaumé
 - dillaurile
 - ✓ Cirfontaines en Ornois





- Les 5 opérations des autres MOA (encadré vert) ne sont pas dans le périmètre de la DUP mais font partie du périmètre de l'étude d'impact qui sera jointe au dossier de DUP.
- L'étude d'impact du projet global sera jointe à tous les dossiers d'autorisation successifs pour l'Andra et pour les maîtres d'ouvrage associés, et actualisée

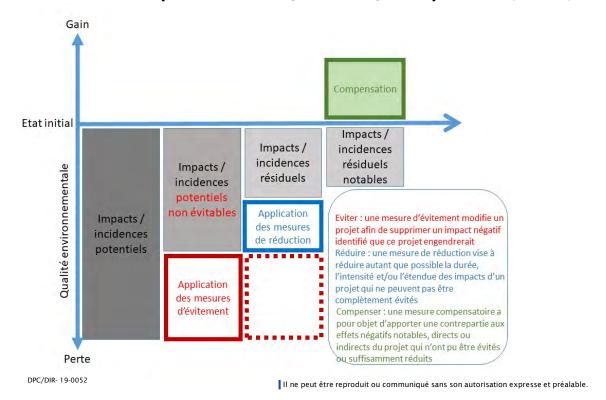
Le dossier de DUP : 1 + 15 pièces





L'étude d'impact : méthode générale de réalisation

Avec une séquence éviter/réduire/compenser (ERC)



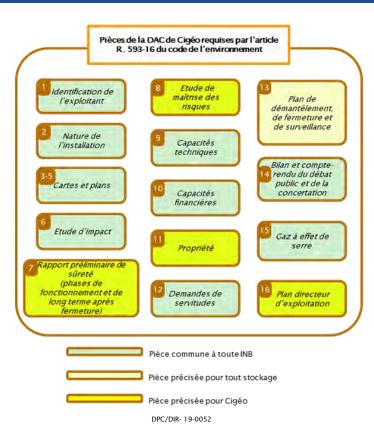


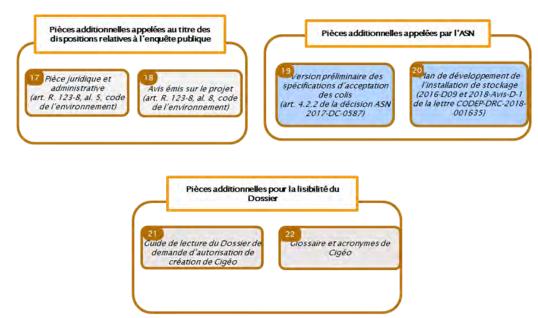


Le dossier de DAC



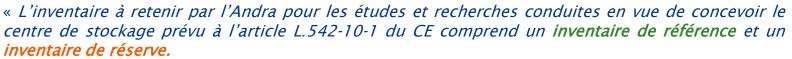
Le dossier de DAC : sa structuration











- L'inventaire de réserve prend en compte les incertitudes liées notamment à la mise en place de nouvelles filières de gestion de déchets ou à des évolutions de politique énergétique.
- Le centre de stockage est conçu pour accueillir les déchets de l'inventaire de référence. »

[Article D.542-90 du code de l'environnement]

L'inventaire de référence (soit 10000 m3 de colis HA, et 73000 m3 de colis de déchets MAVL):

- <u>Sert de base à la conception de Cigéo</u> (études d'avant-projet) et à la démonstration de sûreté établie pour Cigéo.
- Il <u>ne préjuge pas de l'inventaire autorisé</u> de Cigéo.

L'inventaire de réserve :

- <u>Permet de prendre en compte des évolutions</u> de stratégie industrielle ou de politique énergétique ou des incertitudes (déploiement de nouvelles filières).
- <u>Donne lieu à des études d'adaptabilité</u>, visant à démontrer que les substances constituant cet inventaire pourront être accueillies si besoin dans Cigéo, sous réserve des autorisations adéquates.

Les quatre volets de la réversibilité

(article L. 542-10-1 du code de l'environnement - ou « loi de 2016 »)

La progressivité de la construction

- · Pouvoir avancer, différer ou séquencer différemment les tranches de construction du centre (comme en décidera la gouvernance qui sera retenue pour le projet)
- ·=> ce qui appelle un « ialonnement » de tout le cycle de vie du centre de stockage

La flexibilité de l'exploitation

- · Pouvoir exploiter Cigéo en prenant en compte les incertitudes sur les déchets de l'inventaire de référence, en termes de rythme d'exploitation, de choix de conditionnement de déchets ou de mode de stockage
- · (illustration : le stockage des déchets bitumés, quelle que soit la forme physico-chimique qu'ils auront)

L'adaptabilité de la conception

· Ne pas présenter, dans la conception, de caractère rédhibitoire pour la capacité à pouvoir stocker des substances radioactives qui ne sont pas à ce jour considérées dans l'inventaire de référence (mais dans un inventaire de réserve). en s'adaptant, le moment venu, à toute inflexion de politique énergétique nationale

La Récupérabilité des colis

· Pouvoir retirer des colis déjà mis en stockage, au besoin, par exemple à la suite d'une situation anormale ou bien à la suite d'évolution de choix de gestion de déchets, ce qui s'inscrit toutefois dans une approche systémique de leur gestion



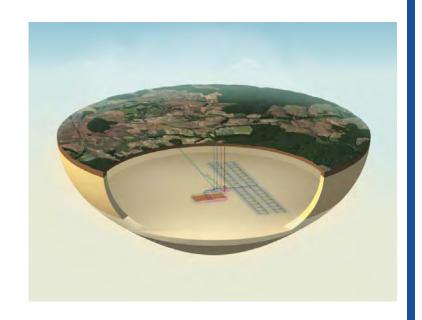
En Conclusion....

La prise en compte de la progressivité, de la flexibilité, de l'adaptabilité et de la récupérabilité dans le dossier de DAC conjuguera plusieurs enjeux :

- o Permettre son instruction dans les cadres réglementaires existants (ceux qui s'appliquent à touts INB comme ceux qui sont spécifiques à Cigéo) et assurer sa robustesse juridique dans la durée
- o Préserver sa lisibilité politique vis-à-vis du « périmètre » du projet au sens large et ne pas préempter des décisions non prises au moment du dépôt
- o Couvrir une « gestion de configuration » de l'évolution des opérations autorisées par l'ASN dans le décret en fonction de la mise en œuvre ou non au cours du temps de différentes options



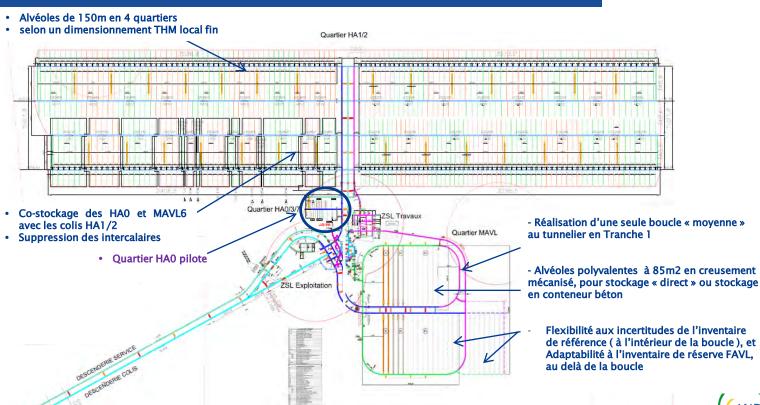
13



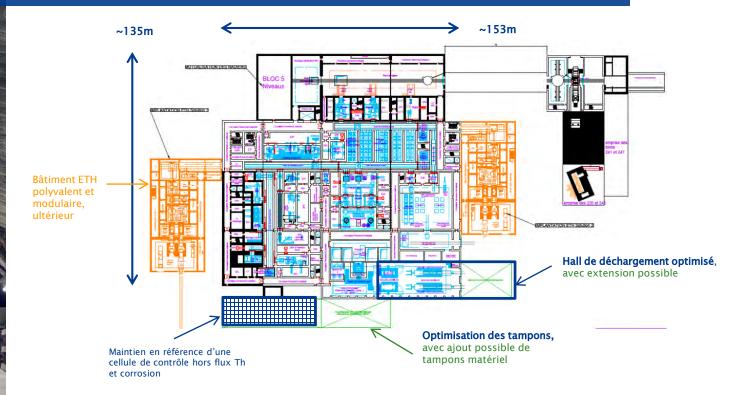
La configuration de fin d'APD pour le dossier de DAC



Configuration en APD : architecture souterraine Principes directeurs



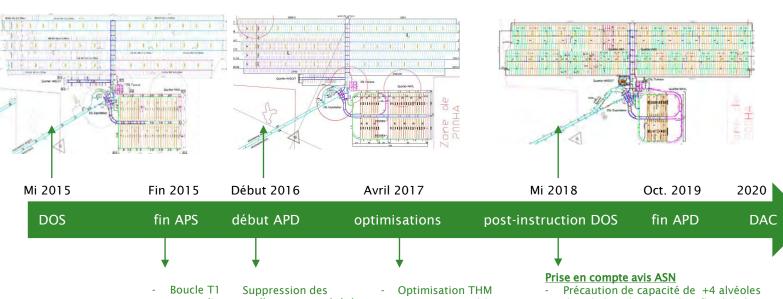
Configuration en APD : bâtiment EP1 Plan masse





EANDRA

DOS => DAC : résumé des évolutions de configuration



au tunnelier

scellements en alvéoles MAVI Introduction des voussoirs compressibles

- Ouartier HA0 réduit
- autres HA0 en intercalaires HA1/2
- Creusement mécanisé
- Boucle unique T1 au tunnelier pleine face
- Stockage direct MAVL
- en alvéoles 85m² excavés
- dans la boucle T1 (de « flexibilité ». pour bitumes en voie 2 et/ou pour du stockage en conteneurs)
- Quartier HA0 pilote avec témoins
- Maitrise des échanges gazeux, avec au besoin balayage au gaz inerte, dans les alvéoles HA
- description des Ouvrages de fermetur

DPC/DIR- 19-0052

Ce document est la propriété de l'Andra.

Il ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation expresse et préalable.

Merci de votre attention





CONSTRUCTIBILITE ET TENUE DES OUVRAGES TYPES ALVÉOLES MA-VL ET GALERIES

Réunion d'information et d'échange Andra – CLIS 9 décembre 2019

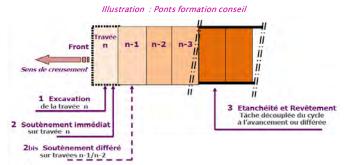


Contexte Les méthodes de creusement de base : rappel

Méthode Traditionnelle (CTM)

- o Répétition d'un cycle d'opérations, réalisées par successifs, avec des moyens spécifiques, selon un phasage adapté
 - Soutènement primaire mise place rapidement après creusement suivi (avec possibilité d'un décalage temporelle) du coulage d'un revêtement final

Exemple d'un cycle de creusement

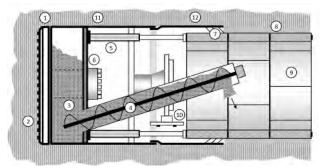


Méthode au tunnelier (TBM)

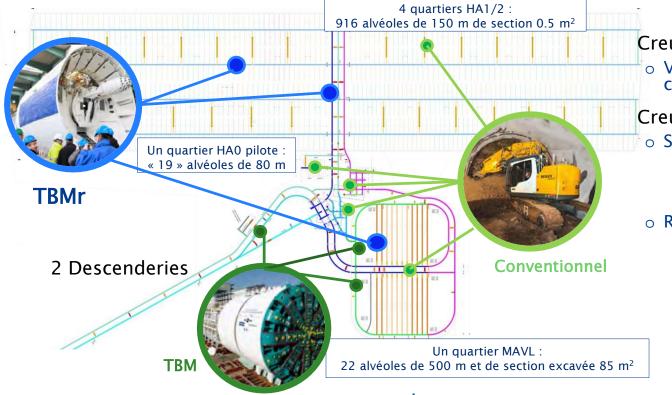
- o Creusement et construction mécanisée, intégrant à l'avancement un cycle d'opérations en parallèles ou successifs, réalisés toutes via le tunnelier
 - Revêtement par anneau de voussoirs préfabriqués mise en place et clavé à l'avancement du tunnelier

Exemple : coupe schématique tunnelier à pression de terre

illustration: ENS Cachan







DRD/MFS/19-0152

Creusement au tunnelier

Voussoirs avec matériau compressible

Creusement conventionnel

- o Soutènement :
 - boulons
 - béton projeté (15 à 20 cm) avec cales compressibles
- o Revêtement :
 - Matériau compressible
 - béton coulé en place 6 mois à 1 an après creusement



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



Contexte Les études pour le dossier de DAC

Réalisation d'ouvrages de grand diamètre dans le Callovo-Oxfordien

- o chambres de montage des tunneliers d'un diamètre excavé proche de 12,5 m
- o diamètre excavé des alvéoles de déchets MA-VL proche de 10,5 m
- o carrefours de grande taille avec dépose de voussoirs

Capacité technique à construire des ouvrages de grand diamètre

- o REX du laboratoire souterrain de Meuse/Haute Marne
 - Différentes méthodes de construction testées
 - Maitrise de la phénoménologie
- o REX industriel important sur les tunneliers de grande taille



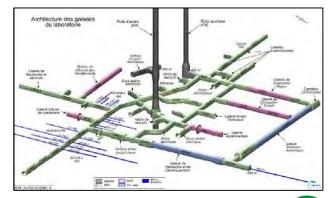




La constructibilité des galeries et alvéoles MA-VL Le programme mis en œuvre au Laboratoire souterrain

Programme scientifique et d'essais technologiques mené depuis 2004

- o Démarche séquentielle : construction de différentes galeries parallèles par les deux méthodes de creusement (pour différents diamètres et soutènements/revêtements...)
 - Méthode traditionnelle (CTM) et méthode mécanisée (TBM)
 - Analyse du comportement par comparaison d'ouvrages parallèles construits par différentes méthodes
 - Analyse de l'interaction roche/revêtement
 - Orientation des ouvrages par rapport à la contrainte horizontale maximale
 - Effet de la taille des ouvrages sur le comportement
 - ⇒ optimisation du choix du couple « technologie de creusement, type de revêtement »
 - o Développement poussé jusqu'à la qualification industrielle de solutions technologiques «innovantes»
 - Limiter (différer) les efforts dans le revêtement et accroitre les marges de garantie de la tenue la durée séculaire des ouvrages sur d'exploitation







La faisabilité des galeries et des alvéoles MA-VL La méthode de creusement CTM - 1/2

Creusement MAP et BRH

o Diamètre excavé: 3,8 à 9 m - Pleine et demi section









Pas de difficulté technique pour excaver le Callovo-Oxfordien avec les méthodes types MAP ou BRH

- o Homogénéité de l'excavation (3 chantiers différents, 2 entreprises de travaux)
 - Moyenne d'avancement de l'ordre de 2 m/s.
 - Phasage maintenu lors des trois chantiers de travaux pour les galeries expérimentales avec les interventions scientifiques

Pas d'influence de la méthode d'excavation sur la fracturation induite par le creusement





La faisabilité des galeries et des alvéoles MA-VL La méthode de creusement CTM - 2/2

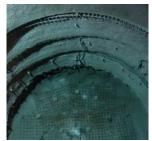
Du soutènement primaire au définitif

o Différentes rigidités : du souple à cintre glissant au soutènement rigide









- o Une maîtrise de la réalisation des différents types de soutènements testés
 - Pas d'influence significative sur l'avancement
 - Une répétabilité en termes de caractéristiques mécaniques de la formulation du béton projeté
- o Une technique de soutènement souple par cales compressibles éprouvée
 - Un rôle « d'accompagnement » de la convergence, avec limitation des efforts dans les soutènements
 - Un bon fonctionnement multi-échelle (de la cale compressible au soutènement)



La faisabilité des galeries et des alvéoles MA-VL La méthode de revêtement CTM

Revêtement coffré coulé

- o Coulage en trois phases
- o Utilisation de deux formulations de béton
- Répétabilité et homogénéité satisfaisante
 - Positionnement des coffrages et des capteurs
 - Cycle de coulage, épaisseur des revêtements
 - · Caractérisation mécanique conforme des bétons





⇒ Le comportement mécanique observé confirme la bonne maîtrise de la mise en place

7 couples de soutènement/revêtement dédiés au suivi de l'interaction roche/structure

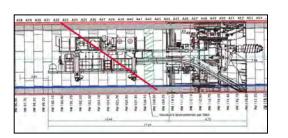
								Primary support		Final concrete support			
Drift		Diameter (m)	Length (m)	Direction Vs σH	Start	finish	Excavation technic			Site-cast concrete (C30/35 MPa)	Site-cast concrete (C60/75 MPa)	Pre-cast lining elements	Structure measure point
GCS		5,2	64,3	=	mai-10	oct10		x	X(21 cm)				74
GCR	zone 1			II	janv11	mars-12		Х	X(21 cm)		X (30cm)		464
	zone 2	_	64,3					Х	X(21 cm)	X			
	zone 3								X(21 cm)		X (30cm)		
BPE		6,3	15		févr12	mars-13			X (45cm)				156
GRD4	zone 1	6,27	66	II	mai-13	nov13	ТВМ					X + "classical	739
												grout"	
	zone 2											X + "comp	
												grout"	



La faisabilité des galeries et des alvéoles MA-VL La méthode TBM - 1/2

Creusement au tunnelier à attaque ponctuelle (TAP)

- o épaisseur voussoir : 45 cm
 - 8 voussoirs + clé
- o Diamètre excavation: 6,27 cm
- o Deux types de coulis d'injection
- Avancement : 5 anneaux/semaine
 - Confirmation de la faisabilité du creusement par tunnelier dans le Callovo-Oxfordien





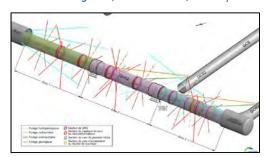
Galerie GRD4

- 74 m de longueur, 93 anneaux
- Instrumentation
 - o 593 capteurs dans le revêtement (945 mesures)
 - o 300 échantillon de béton+ mortier de bourrage
 - o 1 voussoir témoin



Galerie GVA2

o 117 m de longueur, 146 anneaux, 3 tronçons





La faisabilité des galeries et des alvéoles MA-VL La méthode TBM - 2/2











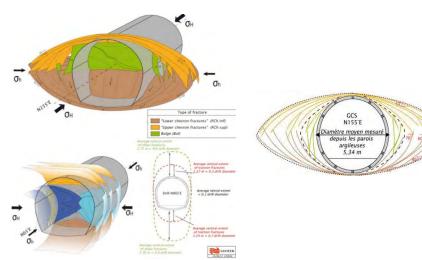


Ce document est la propriété de l'Andra.

Les acquis du laboratoire souterrain Un comportement des ouvrages bien appréhendé - 1/4

Une **fracturation induite par le creusement anisotrope** avec une extension proportionnelle au diamètre de l'ouvrage

- o Même typologie de fractures quelle que soit l'orientation de l'ouvrage
- o Orientation fonction de l'orientation vs direction des contraintes mécaniques naturelles in situ
- o Pas (peu) d'influence (ou peu) des différentes méthodes d'excavation (MAP, BRH) sur l'organisation du réseau de fractures et l'extension



Extension de la fracturation pour des galeries boulonnées au Laboratoire souterrain

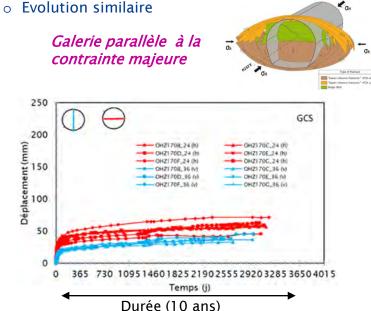
Drift Orientation		Extensional fractures extent			Shear fractures extent		
		Min.	Avera ge	Max.	Min.	Avera	Max
N65 // σ _h	Ceiling	0.2×D	0.3× D	0.4×D	0.5×D	0.6×D	0.8 ×D
	Wall	0.1×D	0.1× D	0.2×D	3		
	Floor	0.2×D	0.4× D	0.5×D	0.8×D	0.8 ×D	T.I ×D
N155 // σ _H	Ceiling		0.1× D	0.15× D			
	Wall	0.01× D	0.2× D	0.4×D	0.7×D	0.8×D	1.0 ×D
	Floor	3	0.1× D	0.15x D	-	121	7



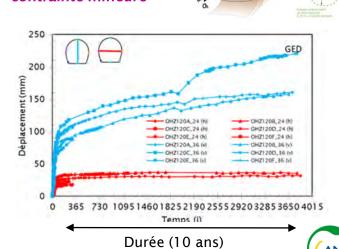
Les acquis du laboratoire souterrain Un comportement des ouvrages bien appréhendé - 2/4

Un rôle important de la zone fracturée sur le comportement hydromécanique des ouvrages (convergence)

- O Des convergences importantes au creusement puis des vitesses qui décroissent au cours du temps
- o Des convergences anisotropes dépendant de l'orientation de l'ouvrage



Galerie parallèle à la contrainte mineure



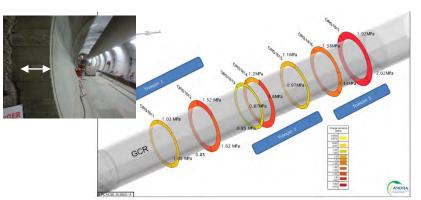
Ce document est la propriété de l'Andra.

DRD/MFS/19-0152

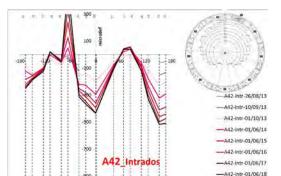
Il ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation expresse et préalable.

Les acquis du laboratoire souterrain Un comportement des ouvrages bien appréhendé - 3/4

- La mise en place d'un revêtement rigide empêche la convergence du terrain et conduit à une augmentation des contraintes dans le béton
 - Faible augmentation de la contrainte radiale
 - Augmentation plus importante de la contrainte orthoradiale
- CTM: mise en place retardé du revêtement coulé (6 mois pour GCR) impliquant un chargement quasi isotrope des revêtements rigides avec le temps
 - Augmentation faible de la contrainte radiale
 - < 2MPa à 5 ans

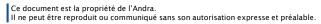


- TBM: mise en place rapide impliquant un chargement anisotrope des revêtements rigides avec le temps
 - Contraintes ortho-radiales maximales atteintes dans les voussoirs de la galerie GRD4 égales à 13 MPa (5 ans après leur pose)



Evolution μ[2018	2017	2016	2015	
Def. Orthoradiales	Moyenne	7	12	11	29
Def. orad	Min	0	0	0	0
Orth	Max	35	40	53	96

Evolution des déformations orthoradiales corrigées du comportement intrinsèque du béton





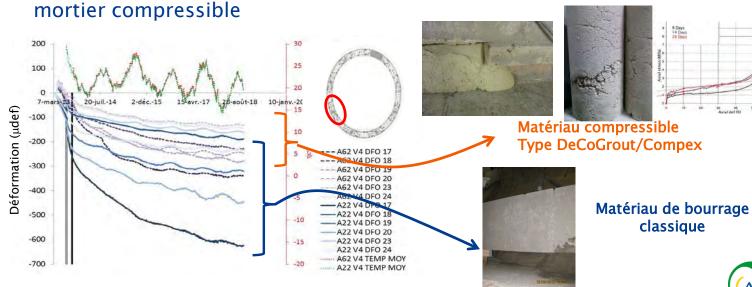
DRD/MFS/19-0152

Les acquis du laboratoire souterrain Un comportement des ouvrages bien appréhendé - 4/4

Utilisation d'un mortier compressible à l'extrados, pour limiter les efforts radiaux transmis aux voussoirs :

o Répétabilité du comportement mécanique tout au long de la section injectée

o Atténuation des déformations/contraintes dans les voussoirs de la zone à



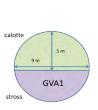
Ce document est la propriété de l'Andra.

Il ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation expresse et préalable.

Les acquis du laboratoire souterrain L'absence d'effet de la taille des ouvrages - 1/3

- Pas de difficulté pour excaver et soutenir des ouvrages jusqu'à 9 m
 - Galerie GRD3
 - Diamètre 7,8 m
 - Galerie GVA1
 - Diamètre 9 m
 - Réalisation en deux phases (section divisée)
 - contraintes logistiques et opérationnelles du LS















L'absence d'effet de la taille des ouvrages - 2/3

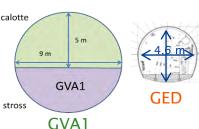
Ouvrages de Ø centimétrique ⇒ ~ 6 m

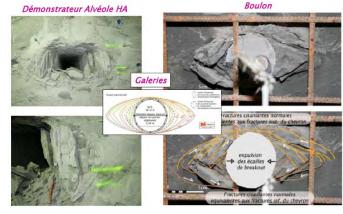
 Organisation de la fracturation similaire pour des ouvrages de diamètres très différents

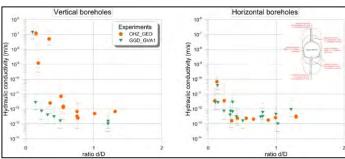
Galeries grand diamètre au CMHM (chambres de montage du TBM-TAP) :

- GRD3 Ø ~ 7,8 m selon σH
- GVA1 Ø ~ 9 m selon σh
- o Organisation et extension globalement similaire
 - Effet du phasage de l'excavation sur l'extension finale
- Perméabilité semblable en fonction du ratio distance/diamètre





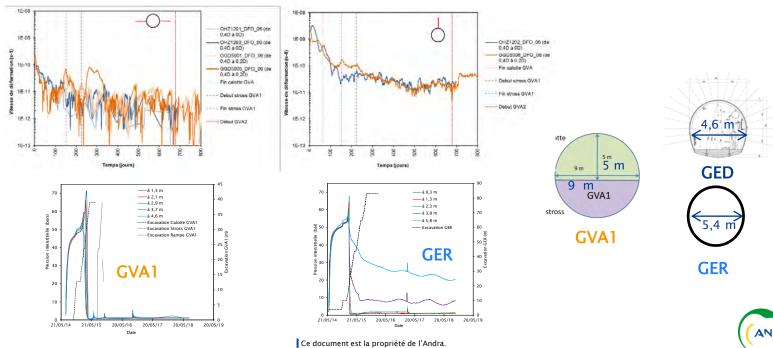




Les acquis du laboratoire souterrain L'absence d'effet de la taille des ouvrages - 3/3

Même comportement hydromécanique pour une galerie de 5 m et de 9 m de diamètre

- o Même évolution des vitesses de déformation en fonction du ratio distance/diamètre
- o Même évolution des pressions interstitielles au creusement



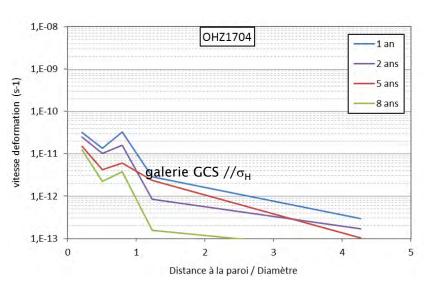


Ce document est la propriété de l'Andra. Il ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation expresse et préalable.

Le dimensionnement des revêtements de Cigéo L'utilisation du REX du Laboratoire souterrain

Comportement observé au LS utilisé pour les calculs de dimensionnement

 Vitesses de convergence diminuent avec le temps



Introduction d'un matériau compressible

- o Retarde le chargement du revêtement
 - Permet le creusement au tunnelier avec pose de voussoirs à l'avancement
 - Contribue à la robustesse du dimensionnement
- Atténue partiellement l'anisotropie de chargement du revêtement





Le dimensionnement des revêtements de Cigéo Les critères de dimensionnement

Suivant les recommandations de l'AFTES

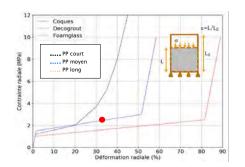
Vérification de la contrainte de compression maximale du béton à 100 ans

- o σ_{max} < 29,6 MPa pour le béton coffré (BC)
 - pour résistance initiale du béton > 60 Mpa (C60)
- o σ_{max} < 34,2 MPa pour le béton préfabriqué (voussoirs-BV)
 - pour résistance initiale du béton > 60 Mpa (C60)
- o Coefficient de sécurité 1,35 σ_{max} et R_c/1,5 (BC) ou R_c/1,3 (BV)

Vérification de la contrainte/écrasement du matériau compressible

- o Ratio (limite palier plastique (PP)/déformation radiale)
 - > 1,5 pour l'essentiel des ouvrages
 - > 1,2 pour quelques ouvrages spécifiques

Différents matériaux compressibles







Synthèse Cadre général

Un REX montrant la capacité de constructibilité d'ouvrages horizontaux de grande dimension

o Différentes méthodes de construction CTM et TBM possibles

Une maitrise du comportement hydromécanique et de la tenue des ouvrages dans le temps

- o Comportement similaire quelque soit la méthode de construction
 - Convergence anisotrope rapide pendant les premiers mois puis lente après conduisant à un chargement des structures en béton
 - Pas d'effet d'échelle entre les ouvrages de 5 m à 9 m de diamètre
 - Comportement suivi sur déjà 13 ans pour certains ouvrages
- o Apport des revêtements/soutènements « souples » pour accroitre la tenue mécanique des ouvrages

Une utilisation de ce REX pour le dimensionnement





Synthèse

La poursuite des travaux : le chantier 4 au LS - 1/2

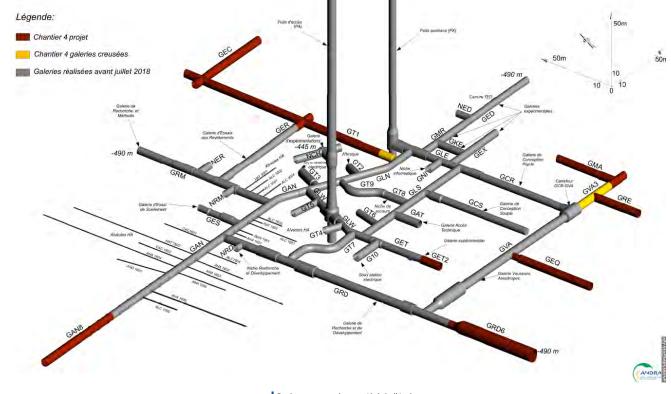
Chantier 4 engagé début 2019 pour une durée de 6 ans, afin de disposer à ce terme d'un complément de connaissances sur :

- o L'emploi des matériaux compressibles pour les revêtements/soutènements
 - en particulier pour les « carrefours en X »
- o La capacité à déposer des voussoirs en partie courante et en « carrure en T »
- La mise en place de « remblais courants » dans des conditions représentatives des opérations de comblement des galeries de Cigéo
- La réalisation de prototypes représentatifs des concepts des 2 types d'alvéoles. HA et MA-VL



Synthèse

La poursuite des travaux : le chantier 4 au LS - 2/2





DRD/MFS/19-0152

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



Merci de votre attention



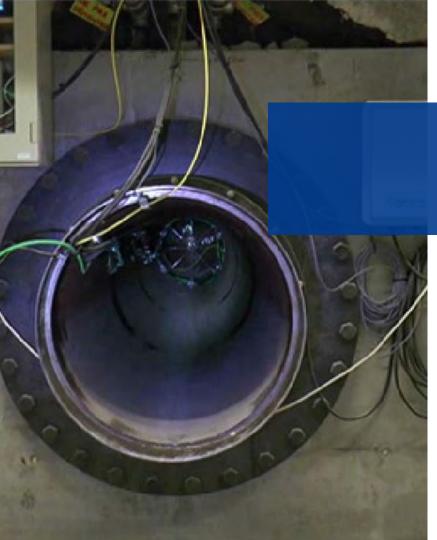


Annexe : essais grande échelle futurs au Laboratoire souterrain L'expérimentation OMA

Démonstrateur (prototype) d'une alvéole MA-VL

- o se rapprochant le plus possible du concept proposé par les Maîtrises d'œuvre du projet Cigéo en fin de la phase APS (Avant-Projet Sommaire),
- o adapté aux contraintes opérationnelles de réalisation du Laboratoire souterrain (diamètre, sections divisées, ventilation, marinage, bétonnage...)
 - Objectifs
 - Faisabilité technologique
 - Test de dispositifs de suivi d'un ouvrage de grand diamètre avec la définition future d'un programme de surveillance
 - Consolidation de la compréhension HM en particulier l'interaction roche et soutènement/revêtement, à cette échelle
 - Tests sur 2 portions longitudinales dont une comprenant un matériau compressible
 - Planning prévisionnel : 2020-2024





CONSTRUCTIBILITÉ ET TENUE MÉCANIQUE DE L'ALVÉOLE HA

Réunion d'information et d'échange Andra - CLIS 9 décembre 2019



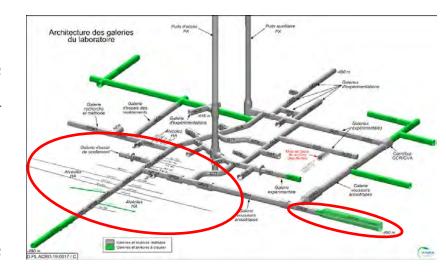
Les démonstrateurs d'alvéole HA au Laboratoire souterrain (LS) Un programme expérimental engagé depuis 2009

22 démonstrateurs d'alvéoles HA réalisés au LS depuis 2009

- o 18 alvéoles chemisés
- \circ 18 alvéoles selon σ_{H}
- o 8 alvéoles du concept développé depuis 2015
 - Avec remplissage de l'annulaire par un coulis cimentaire
 - Avec un chemisage en acier API5L
- o 900 m de linéaire cumulé

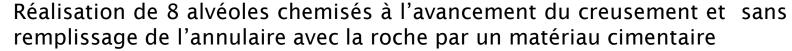
Deux grands objectifs

- Vérifier la faisabilité technique de construction
- Confirmer le domaine de comportement attendu, notamment la tenue mécanique





La constructibilité des alvéoles HA Le REX 2009 - 2013

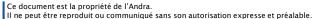


- Difficulté à creuser et chemiser suivant σ_h
- Faisabilité d'un alvéole chemisé de 100 m de longueur (HAT1602)
- Paramètres prépondérants pour atteindre cet objectif de longueur :
 - Espace annulaire initial chemisage / roche
 - Creusement en continu
 - Souplesse du chemisage (liaisons semi-rotulées des tronçons)

Retour d'expérience et optimisation :

- Fonçage du chemisage après le creusement pour faciliter la mise en place
- Injection d'un matériau cimentaire en extrados du chemisage pour favoriser la limitation des cinétiques de corrosion



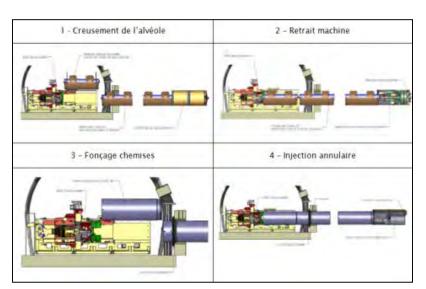


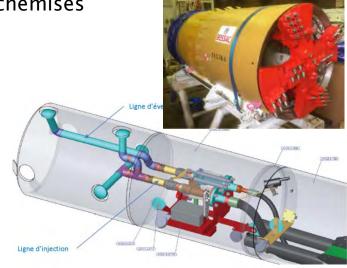


La constructibilité des alvéoles HA Le phasage de construction depuis 2016 : objectifs

Garantir une qualité de remplissage du vide annulaire chemisage/roche satisfaisante

Limiter l'effort de poussée sur le train de chemises





Dispositif d'injection du matériau cimentaire



La constructibilité des alvéoles HA La campagne 2016 - 2019 : vue générale des installations





Retrait des viroles de collecte



Fonçage du chemisage



Dispositif d'injection du matériau cimentaire en galerie





DRD/MFS/19-0153

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

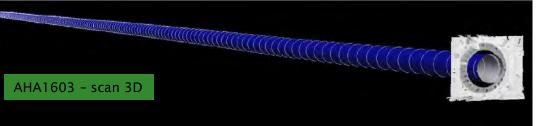
La constructibilité des alvéoles HA Le creusement et le fonçage

Démonstration de la faisabilité du creusement avec trajectoire maitrisée et du fonçage du chemisage sur 110 m a minima













La constructibilité des alvéoles HA L'injection du vide annulaire

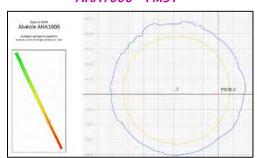
Vérification de la faisabilité d'injection d'un coulis cimentaire en extrados du chemisage :

- o Volume injecté > vide mesuré par scan 3D avant fonçage du chemisage
- Maitrise de l'homogénéité géométrique améliorée par la pose de « centreurs »
 - AHA1606 (2018) de 40 m de longueur
 - AHA4001 (2018) de 70 m de longueur

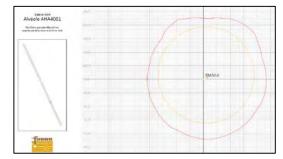
Chemisage équipé de centreurs



AHA1606 - PM31



AHA4001 - PM50





Le comportement des alvéoles HA Le monitoring : un ensemble de dispositifs disponibles

Instrumentation en 2019 de l'alvéole AHA1605 de 80 m (longueur de l'alvéole HA0)

- Mesure de **déformation orthoradiale du chemisage par fibres optiques** (mesures réparties)
 - Vérification de faisabilité sur 80 m
 - Optimisation du nombre de spires
 - Acquisition de mesures complémentaires pour validation de la méthode de calcul de l'ovalisation à partir des signatures mécaniques
- Mesure de déformation axiale / température du chemisage par fibres optiques (mesures réparties)
 - Vérification de faisabilité sur 80 m
- Mesure de déformation orthoradiale du chemisage par extensomètres à cordes vibrantes (mesures ponctuelles)
 - Comparaison avec les mesures par fibres optiques
- Mesure des teneurs en O₂ et H₂
- Mesures de corrosion
 - Mesures résistives et par électrochimie
 - Coupons en acier à prélever ultérieurement
- Mesures géométriques de l'intérieur de l'alvéole par un véhicule autonome pour auscultation (SAM)



Chemise équipée de fibres optiques pour mesure de ε_{θθ}

Capteur de corrosion AirCorr (mesure résistive)





Système de protection des capteurs géochimiques

Robot pour auscultation (SAM)



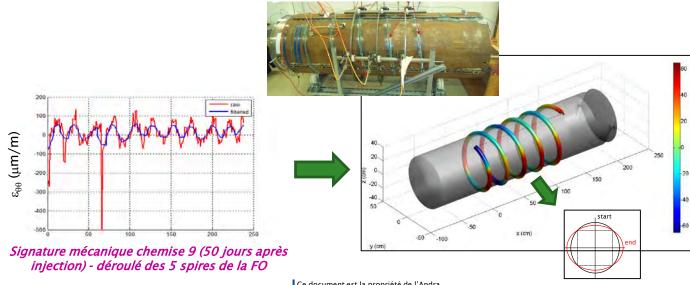
Coupons en acier



Le comportement des alvéoles HA Le monitoring : la fibre optique

Mesures indirecte de l'ovalisation du chemisage avec des Fibres Optiques

- o Traitement des mesures de déformation orthoradiale en face externe
 - Signatures mécaniques conformes à une sollicitation de flexion radiale
 - Convergence verticale / Divergence horizontale
- Détermination de l'ovalisation correspondante





_{θθ} (mm/m)

DRD/MFS/19-0153

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



La constructibilité des alvéoles HA Synthèse des résultats pour le dépôt du dossier de DAC

Creusement d'un micro-tunnel borgne d'au moins 100 m de longueur avec maîtrise de la trajectoire et mise en place d'un chemisage en acier

- o Faisabilité démontrée sur HAT1602 (100 m ; chemisage à l'avancement du creusement)
- o Faisabilité démontrée sur AHA1604 (112 m ; fonçage après creusement)

Injection du vide annulaire avec un coulis cimentaire

- o Faisabilité démontrée sur tous les alvéoles réalisés depuis 2016 et des optimisations constantes
 - Amélioration de la maitrise de l'homogénéité géométrique avec la présence de « centreurs »

Mise en place et fonctionnement de dispositifs de surveillance non intrusifs

- o Faisabilité de pose démontrée sur 80 m et de leur fonctionnement (AHA1605)
 - Des dispositifs de mesure permettant le suivi du chemisage
 - Comportement mécanique
 - Corrosion
 - Environnement en gaz (O₂ ...)





Le comportement mécanique des composants métalliques de l'alvéole HA Le choix des aciers « bas carbone »

Matériaux utilisables en épaisseurs pluri-centimétriques permettant de concilier plusieurs exigences :

- o Le comportement mécanique
- o la perte d'épaisseur par corrosion généralisée
- o la protection contre les rayonnements

Robustesse des évaluations de corrosion

- Capacité de prévision du comportement : corrosion généralisée prédominante
- o Risques de corrosion localisée limités par :
 - o les choix de nuances d'acier (Corrosion sous contrainte)
 - o la conception des alvéoles HA (limitation de l'apport d'oxygène)
- o Pas de risque de couplage galvanique conteneur de stockage/chemisage

Retour d'expérience

- o Capacité de mise en forme, soudabilité
- o Existence d'analogues industriels (pipelines...) ou archéologiques sur des durées pluriséculaires







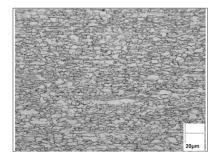
Le comportement mécanique des composants métalliques de l'alvéole HA Le choix des nuances d'acier « bas carbone »

Des nuances d'aciers bas carbone retenus pour :

- o leurs propriétés mécaniques
- leur composition et leur microstructure, minimisant les risques de corrosion sous contrainte (CSC) et de fragilisation par l'hydrogène (FPH)
 Structure métallurgique de l'acier API 5L X65 MS

Nuances d'aciers :

- o Chemisage: API5L X65 MS « sour service »
 - o Résistance mécanique élevée
 - o Résistant à différentes formes de corrosion
 - Norme de l'industrie pétrolière provenant de la R&D sur les pipelines
- o Conteneur de stockage : acier non allié P285NH
 - o acier forgé à haute ductilité (Norme DIN EN 10222-4)
 - o abaissement les teneurs en S et P pour une meilleur résistance à la CSC et FPH
 - o détensionnement thermique local des soudures par induction



(essentiellement ferritique à grains fins)





Le comportement mécanique des composants métalliques de l'alvéole HA La corrosion des aciers « bas carbone » dans le contexte du stockage - 1/2

Un environnement favorable à de faibles vitesses de corrosion généralisées et limitant fortement les risques de corrosion localisée

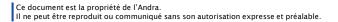
- o Une atmosphère humide pour le conteneur pendant la période d'exploitation, peu corrosive (pas de cycles d'humidité/séchage)
- o Appauvrissement en oxygène du milieu (milieu géologique anoxique)
- o Contact avec un matériau cimentaire pour le chemisage
- o Rayonnements : débit de dose limité à 10Gy/h par l'épaisseur du conteneur
 - pas d'effet sur la corrosion

Un processus de corrosion généralisée dominant

o Plus robuste pour la prédictibilité du comportement à long terme

Des cinétiques de corrosion décroissantes en milieu anoxique permettant d'atteindre de faibles vitesses de corrosion

- o Vitesses de corrosion généralisée atteignant des valeurs < 10 μm/an
- Le matériau de remplissage cimentaire favorise une protection rapide de l'acier et des vitesses de corrosion faibles



Le comportement mécanique des composants métalliques de l'alvéole HA La corrosion des aciers « bas carbone » dans le contexte du stockage - 2/2

Essais paramétriques





Corrosion sous contrainte (Institut de la Corrosion)



Mesures électrochimiques

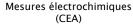
Essai MCO 1703: Au contact de l'argilite (Andra, LS)

Mesures par prélèvements et perte de masse





Essai MCO 1202 : Eau et atmosphère humide (Andra, LS



Maquettes

Cylindres d'acier et verre/acier dans l'argilite (ArCorr - CEA)





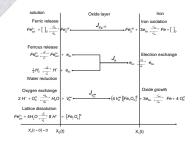
Caractérisation des produits de corrosion (NIMBE/Lapa)

Expérimentations en laboratoires de « surface »

Expérimentations en Laboratoire

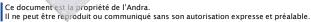
Apport des analogues archéologiques (rôle des produits de corrosion)

Modélisations



Développement de modèles et couplages avec codes géochimie-transport

DRD/MFS/19-0153



Le comportement mécanique des composants métalliques de l'alvéole HA 3 axes d'études





Caractérisation matériau et structure

- Comportement elasto-plastique, endommagement
- Comportement au flambage
- Contraintes résiduelles, métallurgie, ...

Essais sur éprouvettes et maquettes



Essais de flambage sur coques en acier (INSA de Lyon & LEM3 - UL)



- Processus de mise en charge du chemisage
- Ovalisation maximale
- Impact d'un chargement thermique

Essais in-situ au LS



Comportement moyen/long terme

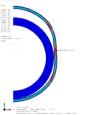
- Chargement mécanique du terrain à long terme
- Impact d'une corrosion généralisée significative
- ♦> Modes de ruine (flambage, fissuration, ...)

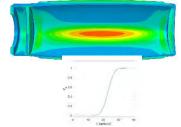
Simulations numériques

Chemisage d'alvéole HA au LS



Comportement elasto-plastique à long terme (LASMIS - UTT)





Calcul de la probabilité de défaillance du conteneur HA (Institut Pascal)



Ce document est la propriété de l'Andra.

Il ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation expresse et préalable.

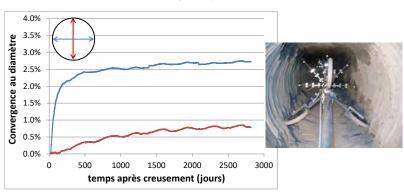


Le chargement mécanique du chemisage HA La convergence de la roche

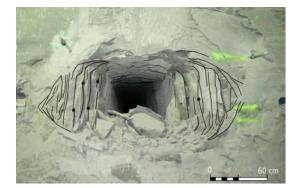
Une convergence anisotrope pilotée par l'anisotropie de la zone endommagée lors du creusement de l'ouvrage

- \circ Vitesse de convergence plus élevée dans la direction d'extension maximale du réseau de fractures (la direction horizontale pour les ouvrages parallèles à σ_H)
- o Convergence maximale à court terme (moins d'une semaine) comprise entre 5 et 10% du diamètre
 - REX essais échelle 1 et échelle réduite
- o Vitesse de convergence relative atteignant 10⁻¹¹ s⁻¹ après quelques années
 - même ordre de grandeur que celles mesurées sur galeries de même orientation

Convergence d'un alvéole non chemisé à 16 m de profondeur (ALC1603, 2010)



Réseau de fractures en périphérie d'alvéole (ALC3005, 2009)





Le chargement mécanique du chemisage HA Cas sans remplissage du vide annulaire

Un chargement mécanique anisotrope

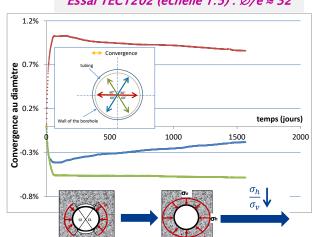
- Mise en charge localisée dans la direction d'extension maximale de la zone endommagée (ouvrage $//\sigma_H$)
- Sollicitation du chemisage en flexion radiale

Un blocage de l'ovalisation une fois le vide annulaire repris dans la direction \perp à l'axe de chargement maximal et une légère chute de l'anisotropie au-delà

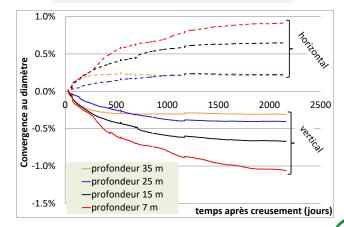


Pas d'effet d'échelle sur le processus de mise en charge

Essai TEC1202 (échelle 1:5) : Ø/e ≈ 32



Essai CAC1601 (échelle 1) : Ø/e ≈ 35



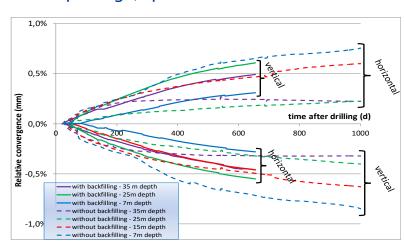


Ce document est la propriété de l'Andra.
Il ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation expresse et préalable.

Le chargement mécanique du chemisage HA Cas avec remplissage de l'annulaire

Expérimentation AHA (chemisage mis en place post-creusement)

- Injection d'un coulis cimentaire/bentonitique optimisé chimiquement
 - $E \approx 20$ MPa à 90 jours, épaisseur théorique de remplissage = 80 mm
- o Rotation de 90° de l'axe de chargement maximal
- o Cinétique de mise en charge comparable avec et sans matériau de remplissage
- Compressibilité moyenne du champ proche (zone endommagée + matériau de remplissage) qui reste très inférieure dans la direction horizontale

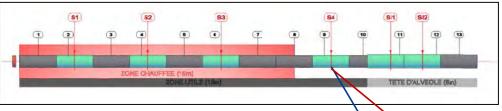








Le chargement mécanique du chemisage HA L'effet de la température

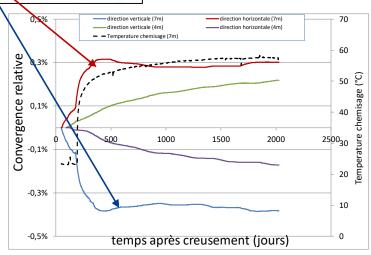


Avant chauffe

- o Processus de mise en charge anisotrope
 - Chargement maximal suivant la direction horizontale

Chargement thermique ($\Delta T \approx 35^{\circ}C$)

- même comportement avec augmentation de la vitesse de chargement radial
 - Dilatation thermique de la roche
 - Augmentation de la vitesse de déformation différée de la roche







Le comportement mécanique du chemisage HA à long terme Le flambement sous contact : cadre général

Un mode de ruine attendu : le flambement radial sous contact

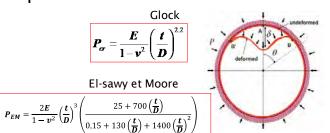
o Flambement monobloc d'un liner en acier (Newhall Tunnel, Californie, 1994) - Berti

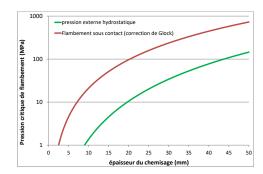
et al. 1998



Des travaux connus dans la littérature pour l'industrie pétrolière essentiellement :

pression critique de flambement





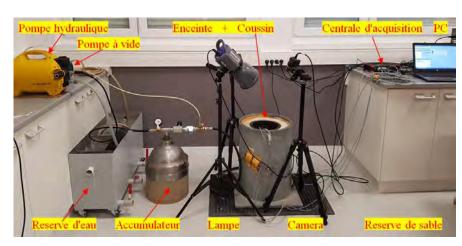


Le comportement mécanique du chemisage HA à long terme Le flambement sous contact : travaux Insa de Lyon & LEM3 (UL) - 1/2

Un banc d'essai développé spécifiquement

- Essais sur coques cylindriques en acier
- o Pilotage de la pression externe
- Chargement radial transmis par le milieu confinant
 - Chargement de type solide/solide







CL010 CL08 CL09

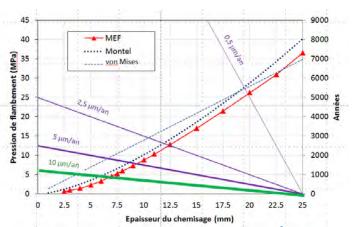


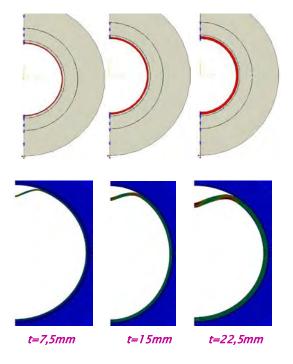
Le comportement mécanique du chemisage HA à long terme Le flambement sous contact : travaux Insa de Lyon & LEM3 (UL) - 2/2

Simulations numériques du flambement du chemisage

- Pression externe uniforme
 - Appliquée directement au tube confiné
- Rigidité du confinement : 4000 MPa
- Corrosion généralisée
 - perte d'épaisseur

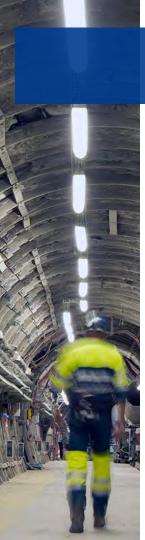
Une épaisseur critique de flambement estimée entre 10 et 15 mm







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



La tenue mécanique du chemisage HA Synthèse des connaissances acquises

Un chargement anisotrope mais une ovalisation du chemisage qui reste compatible avec le maintien des jeux de manutention ($\Delta \varnothing \leq 10$ mm après 100 ans)

- Extrapolation et modélisation de nombreuses mesures réalisées au LS Souterrain
- Comportement reproductible

Sous un régime de corrosion généralisée, un flambement du chemisage attendu au-delà de quelques centaines d'années pour $\overline{V_{corr}} = 10 \ \mu \text{m/an}$

- Epaisseur critique de flambement (et donc de consommation des jeux de manutention) comprise entre 10 et 15 mm, pour nune épaisseur initiale de 25 mm
 - La vitesse de corrosion pilote directement la durée de flambement du chemisage





La récupérabilité des colis HA Les essais mécaniques de retrait des colis HA

Essais de récupérabilité

- Dans un alvéole enrouillé
- En présence d'eau condensée s'écoulant en génératrice inférieure
- En température (90°C = proche du paroxysme thermique)
- o Démonstration de la possibilité de récupérer les colis malgré une stade de corrosion avancée
 - Développement de robot pour nettoyer la rouille et éviter le blocage











LE PROJET CIGÉO : STOCKAGE DES BITUMES

Réunion d'information et d'échange Andra - CLIS 9 décembre 2019



Les filières de gestion pour les déchets bitumés



Environ 75 000 colis de déchets bitumés ont été produits depuis 1966 dans les installations de Marcoule et 1989 dans celles de la Hague - entreposés aujourd'hui à Marcoule et à La Hague

Les colis de déchets bitumés MA-VL (13 000 à La Hague + 29 000 à Marcoule)

- o sont dans **l'inventaire de référence** de Cigéo
- o rappel de l'avis de l'ASN du 11 janvier 2018 (sur le DOS Cigéo):
 - privilégier la recherche de la neutralisation de la réactivité chimique des colis
 - mener des études visant à modifier la conception pour exclure le risque d'emballement de réactions exothermiques
 - ⇒ Revue internationale (de septembre 2018 à juin 2019)

Les colis de déchets bitumés FA-VL (~ 33 000 Marcoule)

- o sont destinés à un centre de stockage pour déchets FA-VL
- o sont dans <u>l'inventaire de réserve</u> de Cigéo et objets d'une étude d'adaptabilité







La lettre de mission identifiait trois sujets :

- o l'évaluation des connaissances scientifiques relatives à la caractérisation et au comportement des déchets bitumés
- o l'évaluation de la pertinence des recherches en cours sur la neutralisation de la réactivité chimique des colis de déchets bitumés
- o l'évaluation de la pertinence des études de l'Andra visant à modifier la conception de Cigéo pour exclure le risque d'emballement de réactions exothermiques.



Et maintenant?

Actions à mener afin de pouvoir décider, le moment venu, du mode de gestion adapté à ces colis de déchets, le mode de gestion pouvant ne pas être unique

Caractérisation et comportement à long terme

Traitement avant stockage

A court terme

 Rapport quadripartite pour répondre à l'article 48b du PNGMDR : en cours

A moyen terme

 Prise en compte des recommandations de la revue internationale pour un procédé de traitement, soit pour tous les fûts, ou à tout le moins pour un petit nombre de fûts

Stockage en l'état

Définition d'une nouvelle démarche de sûreté au regard du bilan de connaissance et de l'instruction

- Scénarios de sûreté, hypothèses et conséquences associées
- Stratégie de gestion accidentelle/ post-accidentelle
- Exigences pour réduire le risque associé aux scénarios

Avancement : études Andra en cours

Caractérisations complémentaires

- Conforter la démarche de prise en compte de la réactivité des bitumes dans la démonstration de sûreté
- Couvrir la variabilité des bitumes
- Définir des critères d'acceptation vérifiables

Comportement long terme (gonflement sous eau)

- Consolider les calculs et les études de sensibilité
- Intégrer les données producteurs



Les déchets bitumés : Les deux voies de gestion qui seront présentées dans la DAC

Voie 1 : on suppose acquis le développement d'un procédé assurant la neutralisation de la réactivité chimique des déchets bitumés en préalable à leur stockage

- o et on considère des scénarios possibles de traitement, assez nombreux, et encore à l'étude (incinération-vitrification, combustion classique et cimentation ou vitrification, vaporéformage...)
 - pour la démonstration de sûreté du stockage dans Cigéo, on prend des hypothèses de conditionnement sur la base des scénarios possibles
 - les risques associés ne posent pas de difficultés particulières

Voie 2 : évolutions substantielles des options de conception de l'installation de stockage pour exclure le risque d'emballement de réactions exothermiques en cas d'incendie ou d'élévation de température

- o Evolution de la conception du stockage Cigéo étudiée :
 - propositions d'évolution de l'agencement des colis en alvéole et de solutions de renforcement, études et essais associés encore en cours
 - pour des colis de déchets bitumés suffisamment caractérisés permettant une modélisation de leur comportement en stockage
- Les études sur les modalités de stockage associées aux deux voies seront présentées dans le dossier de DAC, au titre de la flexibilité de l'installation

La maîtrise du risque associée au stockage des fûts de déchets bitumés en l'état

Rendre hautement improbable le scénario d'emballement d'un fût de déchets bitumés

- o en réduisant au maximum le risque d'incendie à proximité
- o en maîtrisant la température dans l'ambiance des colis de stockage

Ecarter le risque de propagation d'un emballement vers d'autres colis de stockage

o considérant que l'emballement d'un fût de déchets bitumés, dans un colis de stockage, ne peut pas être exclu.



La maîtrise du risque associée au stockage des fûts de déchets bitumés en l'état Scénarios accidentels

Scénarios dits « de référence »

- o Événements internes et agressions les plus plausibles (principalement l'incendie, dans ou en dehors de l'alvéole de stockage) qui servent de base à la conception
 - Respect d'une température inférieure au critère de 100 °C en peau de fûts de déchets bitumés
 - Dispositions qui permettent, après extinction d'un incendie, de surveiller l'état thermique des colis

Scénario dit « extrême »

- o Emballement des réactions exothermiques au sein d'un fût de déchets bitumés
 - Renforcer la capacité de l'installation pour éviter une propagation aux colis de stockage voisins



La maîtrise du risque associée au stockage des fûts de déchets bitumés en l'état Evolution de la conception des alvéoles de stockage

Disposer de suffisamment d'espace dans l'alvéole pour renforcer

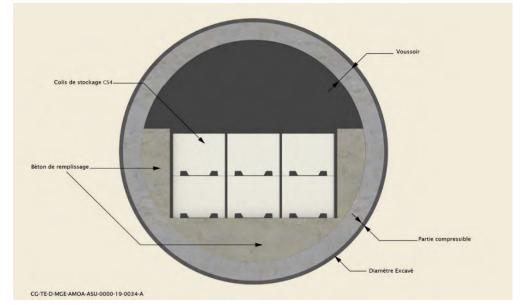
la capacité :

o à surveiller

par des systèmes à demeure, en voûte et sur toute la longueur de l'alvéole (mesure en continu de la température par fibres optiques)

o à intervenir

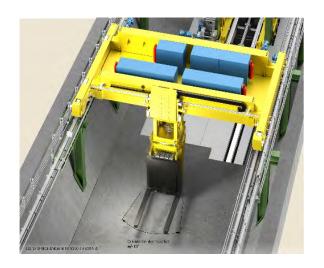
par le pont stockeur

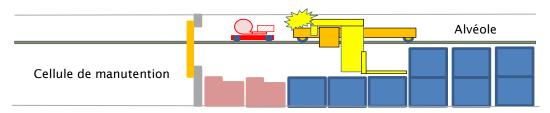




Ajout de systèmes de détection d'incendie, et d'un système complémentaire d'extinction

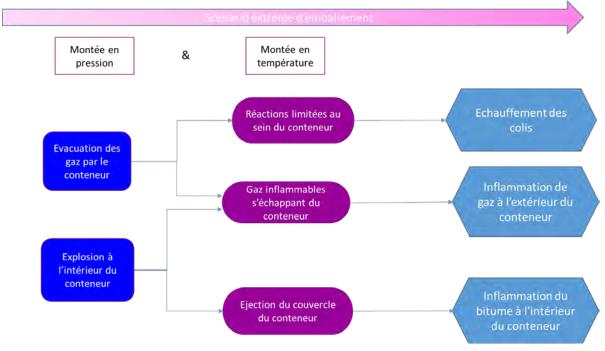
- Systèmes embarqués sur le pont
- Système d'extinction déployé par robot







Etude du risque d'emballement d'un fûts de déchets bitumés





- Moyens de surveillance et d'intervention post-accidentelle
 - Robots équipés d'un bras télémanipulateur, de caméras et d'instruments de mesure



 Système de préhension complémentaire dédié au retrait d'un ou plusieurs colis de stockage, impacté(s) ou non par l'incendie

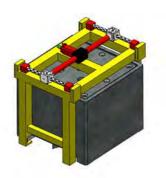




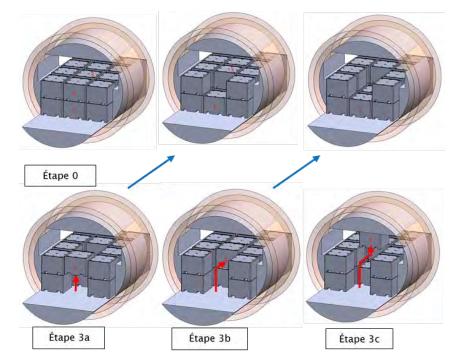


Système de manutention dédié au retrait d'un colis suspect

- afin de n'enlever au maximum que deux colis avant de pouvoir retirer le colis identifié comme suspect,
 - tout en respectant les hauteurs de chute spécifiées









- o Compartimentage au plus près, assuré par le conteneur lui-même
 - Conteneur inertes : enjeux environnementaux et coûts
 - Parois : enjeux de sûreté



- o Valorisation du compartimentage assurée par le conteneur de stockage
 - Tenue à l'explosion
 - Essais conditions AtEx réalisés
 - Evaluations complémentaires sur la sensibilité de la résistance du conteneur à l'explosion (en durée et pression) à réaliser
 - Tenue à un feu externe
 - Simulations réalisées
 - Tenue à un feu interne
 - Essais et simulations à réaliser







Merci de votre attention

