

CONSTRUCTIBILITÉ ET TENUE MÉCANIQUE DE L'ALVÉOLE HA

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

La constructibilité des alvéoles HA

Le REX 2009 - 2013

Réalisation de 8 alvéoles chemisés à l'avancement du creusement et sans remplissage de l'annulaire avec la roche par un matériau cimentaire

- 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

La campagne 2016 - 2019 : vue générale des installations



Positionnement de la foreuse dans le banc de poussée



Fonçage du chemisage



Retrait des viroles de collecte



Dispositif d'injection du matériau cimentaire en galerie



La constructibilité des alvéoles HA

Le creusement et le fonçage

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

AHA1602 - 40 m



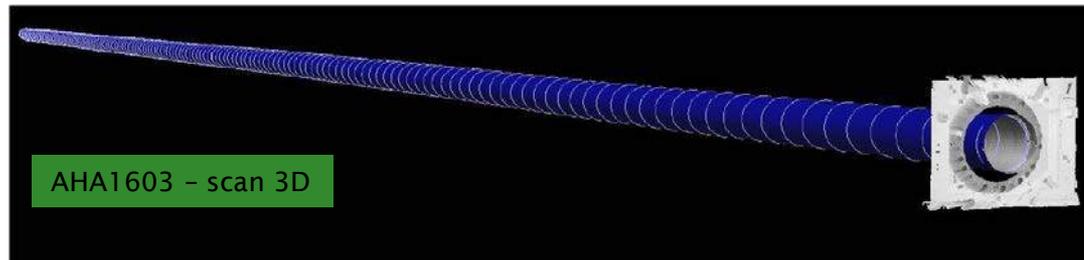
AHA1603 - 80 m



AHA1604 - 110 m



AHA1603 - scan 3D



La constructibilité des alvéoles HA

L'injection du vide annulaire

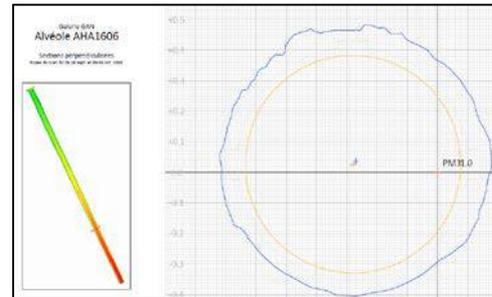
Vérification de la faisabilité d'injection d'un coulis cimentaire en extrados du chemisage :

- 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

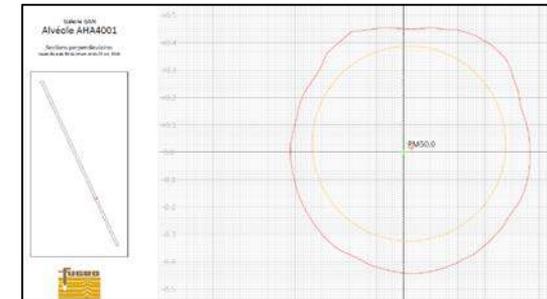
Chemisage équipé de centreurs



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 O_2 et H_2
- 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_{90}

Capteur de corrosion AirCorr (mesure résistive)



Système de protection des capteurs géochimiques

Robot pour auscultation (SAM)



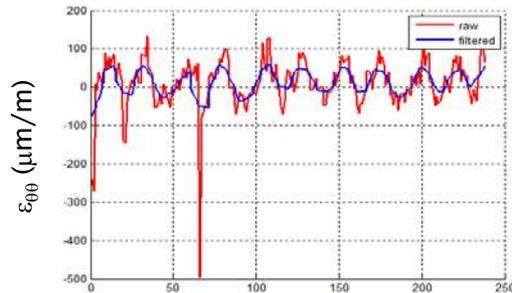
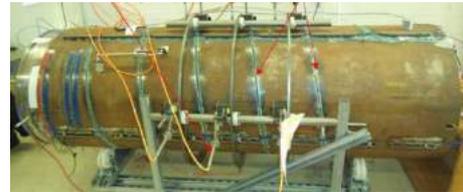
Coupons en acier

Le comportement des alvéoles HA

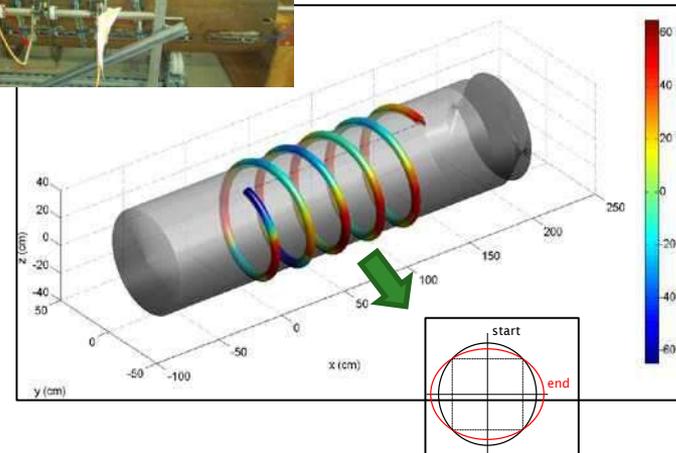
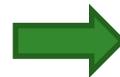
Le monitoring : la fibre optique

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

- 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



Signature mécanique chemise 9 (50 jours après injection) - déroulé des 5 spires de la FO



$\epsilon_{\theta\theta}$ ($\mu\text{m}/\text{m}$)

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

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

Injection du vide annulaire avec un coulis cimentaire

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

Mise en place et fonctionnement de dispositifs de surveillance non intrusifs

- 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 nuances d'acier « bas carbone »

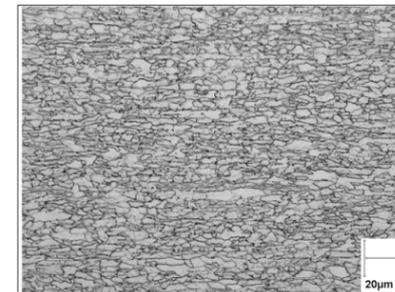
Des nuances d'aciers bas carbone retenus pour :

- leurs propriétés mécaniques
- leur composition et leur microstructure, minimisant les risques de corrosion sous contrainte (CSC) et de fragilisation par l'hydrogène (FPH)

Nuances d'aciers :

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

Structure métallurgique de l'acier API 5L X65 MS
(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

- Une atmosphère humide pour le conteneur pendant la période d'exploitation, peu corrosive (pas de cycles d'humidité/séchage)
- Appauvrissement en oxygène du milieu (milieu géologique anoxique)
- Contact avec un matériau cimentaire pour le chemisage
- 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

- 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

- Vitesses de corrosion généralisée atteignant des valeurs $< 10 \mu\text{m}/\text{an}$ (température $< 100^\circ\text{C}$)
- 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



Mesures électrochimiques (CEA)



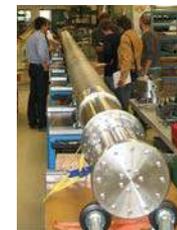
Corrosion sous contrainte (Institut de la Corrosion)



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)

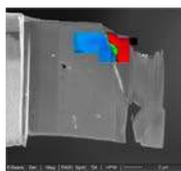


Expérimentations en laboratoires de « surface »

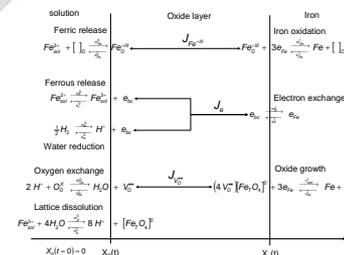
Expérimentations en Laboratoire Souterrain

Apport des analogues archéologiques (rôle des produits de corrosion)

Modélisations



Caractérisation des produits de corrosion (NIMBE/Lapa)



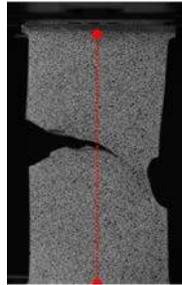
Développement de modèles et couplages avec codes géochimie-transport



Le comportement mécanique des composants métalliques de l'alvéole HA

3 axes d'études

Essais de fissuration ductile (LASMIS - UTT)



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)



Comportement court terme

- ◆ 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, ...)

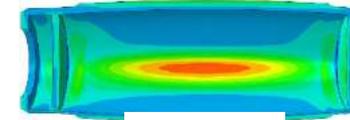
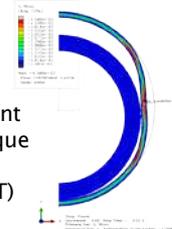
Simulations numériques

Chemisage d'alvéole HA au LS

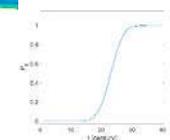


DRD/MFS/19-0153

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



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



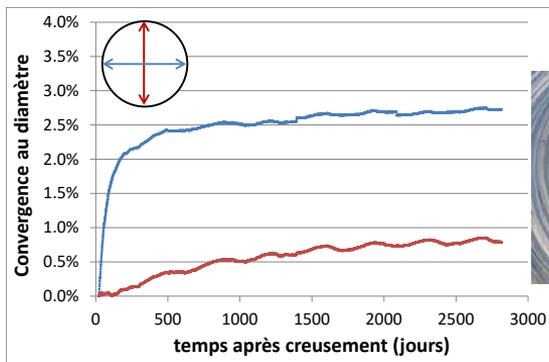
Le chargement mécanique du chemisage HA

La convergence de la roche

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

- 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)
- Convergence maximale à court terme (moins d'une semaine) comprise entre 5 et 10% du diamètre
 - REX essais échelle 1 et échelle réduite
- 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

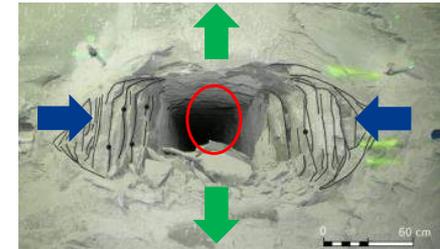
Cas sans remplissage du vide annulaire

Un chargement mécanique anisotrope

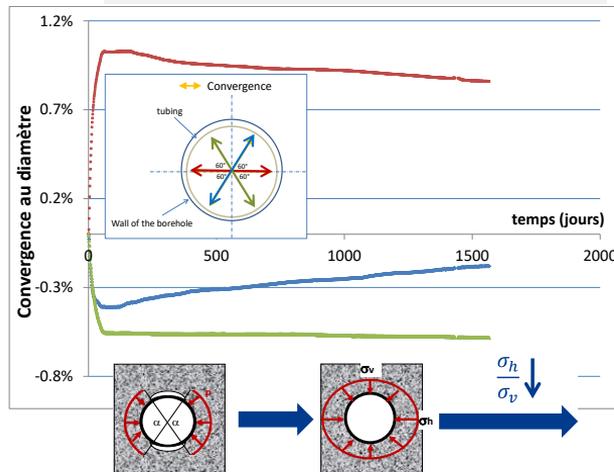
- Mise en charge localisée dans la direction d'extension maximale de la zone endommagée (ouvrage // σ_H)
- Sollicitation du chemisage en flexion radiale

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

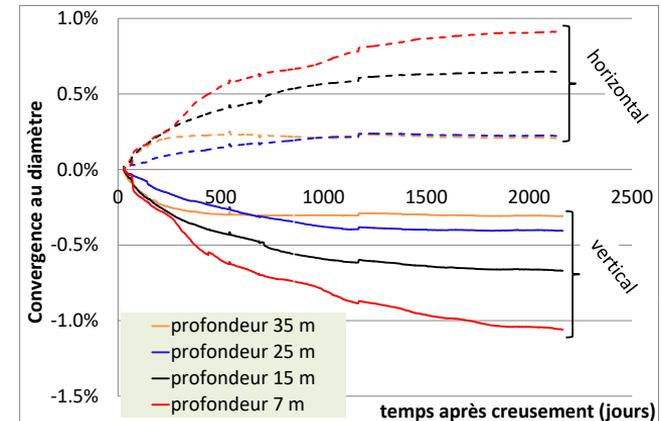
Pas d'effet d'échelle sur le processus de mise en charge



Essai TEC1202 (échelle 1:5) : $\varnothing/e \approx 32$



Essai CAC1601 (échelle 1) : $\varnothing/e \approx 35$

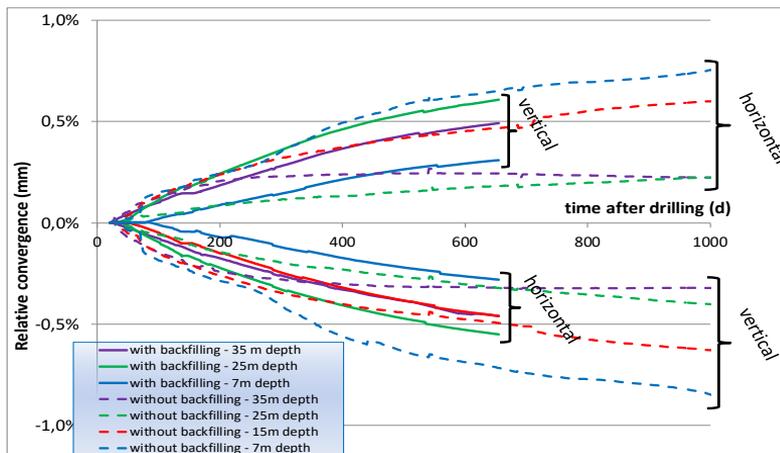


Le chargement mécanique du chemisage HA

Cas avec remplissage de l'annulaire

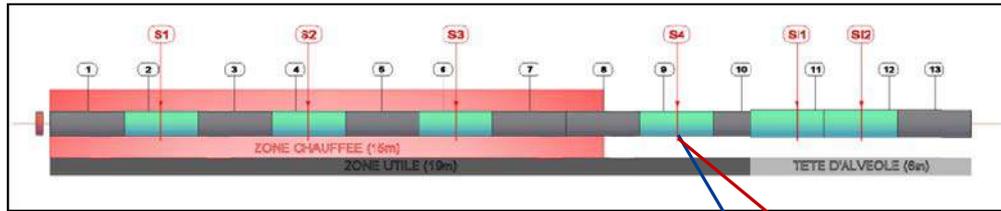
Expérimentation AHA (chemisage mis en place post-creusement)

- Injection d'un coulis cimentaire/bentonitique optimisé chimiquement
 - $E \approx 20$ MPa à 90 jours, épaisseur théorique de remplissage = 80 mm
- Rotation de 90° de l'axe de chargement maximal
- 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

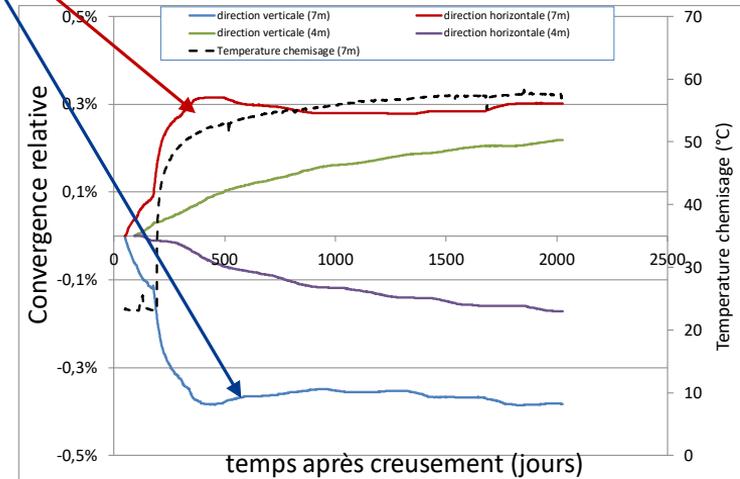


Avant chauffe

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

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

- 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

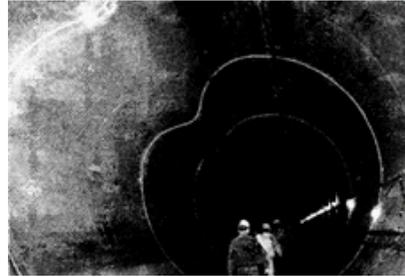


Le comportement mécanique du chemisage HA à long terme

Le flambement sous contact : cadre général

Un mode de ruine attendu : le flambement radial sous contact

- Flambement monobloc d'un liner en acier (Newhall Tunnel, Californie, 1994) – *Berti et al. 1998*



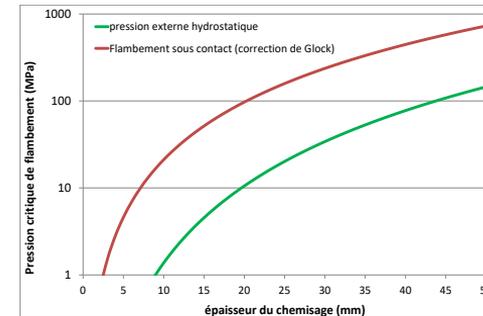
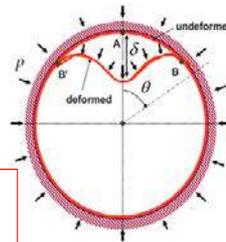
Des travaux connus dans la littérature pour l'industrie pétrolière essentiellement : pression critique de flambement

Glock

$$P_{\sigma} = \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{t}{D} \right)^{2.2}$$

El-sawy et Moore

$$P_{EM} = \frac{2E}{1-\nu^2} \left(\frac{t}{D} \right)^3 \left(\frac{25 + 700 \left(\frac{t}{D} \right)}{0.15 + 130 \left(\frac{t}{D} \right) + 1400 \left(\frac{t}{D} \right)^2} \right)$$

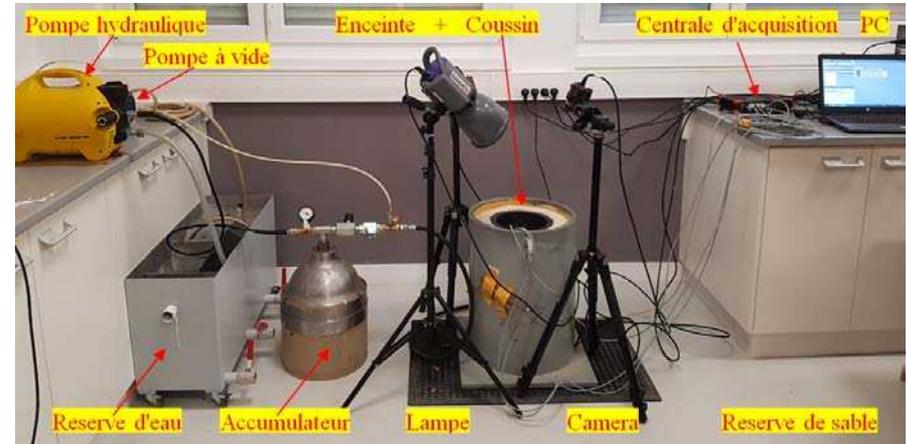


Le comportement mécanique du chemisage HA à long terme

Le flambement sous contact : travaux Insa de Lyon & LEM3 (UL) - 1/2

Un banc d'essai développé spécifiquement

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



CL08

CL09

CL10



CL08

CL09

CL010

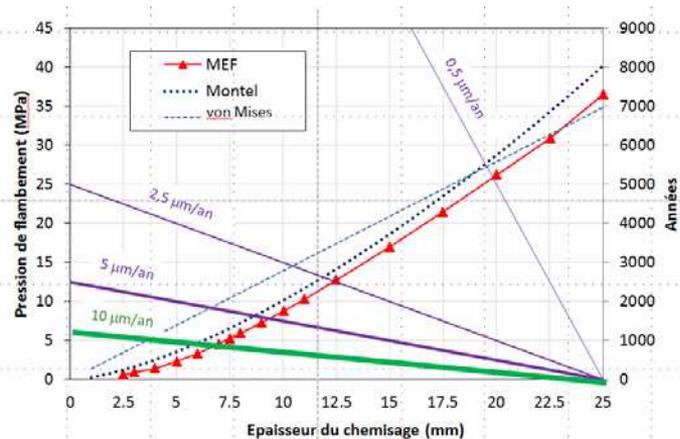
Le comportement mécanique du chemisage HA à long terme

Le flambement sous contact : travaux Insa de Lyon & LEM3 (UL) - 2/2

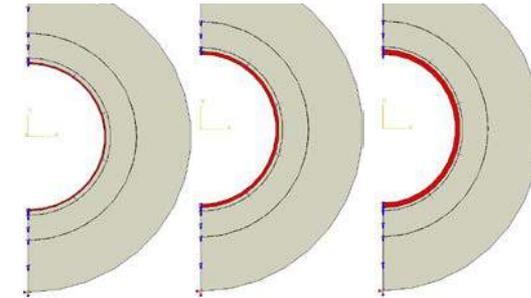
Simulations numériques du flambement du chemisage

- ◆ 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



DRD/MFS/19-0153



t=7,5mm

t=15mm

t=22,5mm

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 $\overline{V}_{corr} = 10$ $\mu\text{m}/\text{an}$

- Epaisseur critique de flambement (et donc de consommation des jeux de manutention) comprise entre 10 et 15 mm, pour une 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)
- 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

