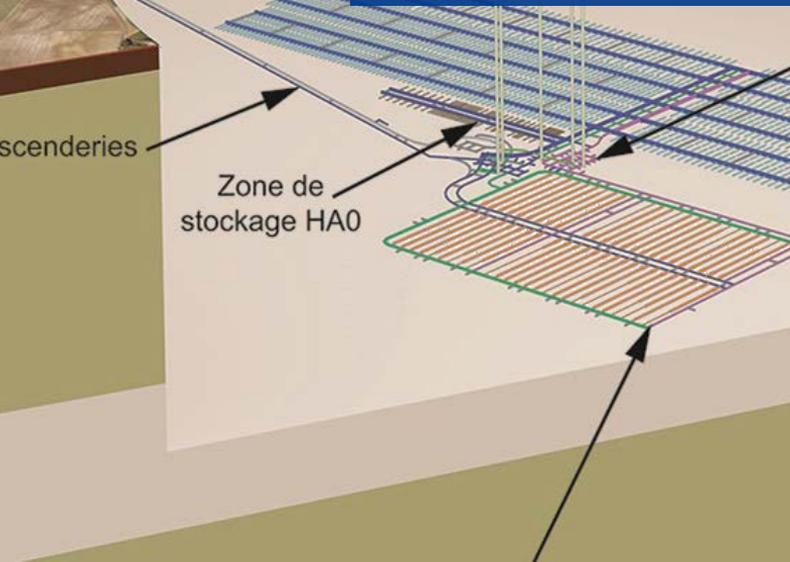




# LA SURVEILLANCE DES INSTALLATIONS FOND DU PROJET CIGEO

Des fonctions de sûreté au développement  
de capteurs

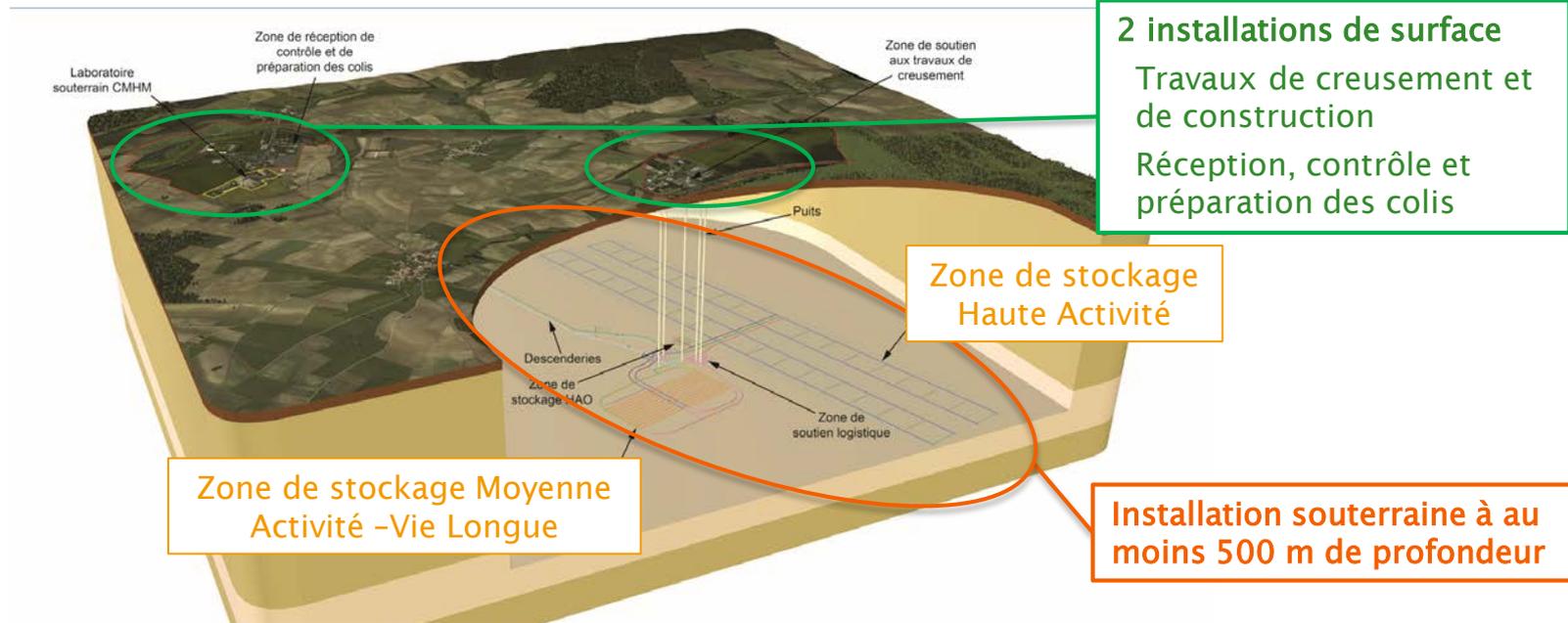


Béatrice Yven

*ANDRA - Direction de la Recherche et  
Développement*

# Le projet Cigéo

## Schéma de principe des futures installations



Le stockage permet d'isoler, durablement, les déchets de l'environnement et de l'homme, en retardant la migration des substances radioactives qu'ils contiennent.

- Une exploitation séculaire
- Une construction progressive

# Le projet Cigéo

## Les fonctions de sûreté

### Fonctions de sûreté en exploitation

Confiner les substances radioactives

Maîtriser la sûreté vis-à-vis du risque de criticité, en fonctionnement normal et accidentel

Protéger les personnes contre l'exposition aux rayonnements ionisants

Evacuer la puissance thermique des déchets

Evacuer les gaz formés par radiolyse ou corrosion

### Fonctions de sûreté après-fermeture

1. Isoler

2. Confiner

*/e. limiter le transfert par voie aqueuse, jusque dans la biosphère*

S'opposer à la circulation d'eau

Limiter le relâchement des RN et les immobiliser dans le stockage

Retarder et atténuer la migration des RN

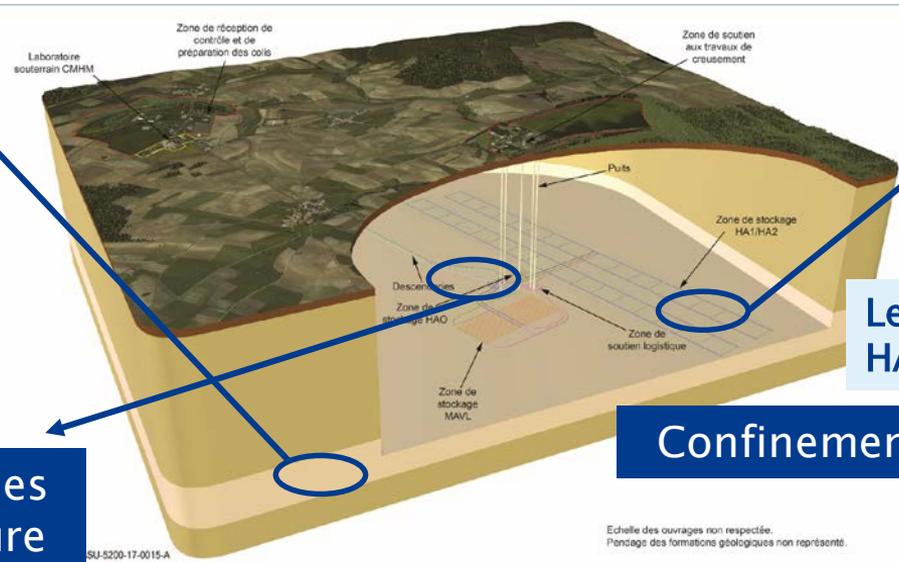
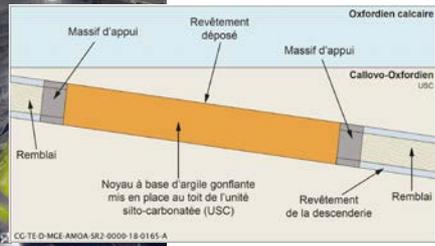
# Le projet Cigéo

## Des choix de conception pour répondre à la sûreté après fermeture

Le Callovo-Oxfordien, le pilier de la sûreté après fermeture du système de stockage

### Géométrie et propriétés T-H-M-C-G de la roche hôte

### Les scellements



Les colis de stockage HA et les avéoles HA

### Confinement et récupérabilité

### Performances hydrauliques des ouvrages de fermeture

Echelle des ouvrages non respectée. Ponçage des formations géologiques non représenté.



# La surveillance des installations fond du projet Cigéo

## Guide de l'ASN 2008 relatif au stockage géologique

« Un programme de surveillance de l'installation doit être mis en œuvre pendant la construction des ouvrages de stockage et jusqu'à la fermeture de l'installation »...

Un programme de surveillance pour :

- « suivre l'évolution de certains paramètres caractérisant l'état des composants de l'installation de stockage et du milieu géologique, ainsi que les principaux phénomènes responsables de cette évolution... »
- « ...montrer que les phénomènes précités ont bien été anticipés et restent maîtrisés » ie pas de dérive en dehors du domaine de fonctionnement attendu
- « ...apporter également les éléments nécessaires pour la gestion, l'exploitation et la réversibilité de l'installation »

« Les moyens utilisés pour la surveillance ne doivent pas diminuer le niveau de sûreté du stockage »

**+ Surveillance réglementaire classique d'une INB**

# La surveillance des installations fond du projet Cigéo

## Les spécificités de Cigéo

### Installation souterraines et exploitation séculaire

- Mesure des paramètres liés au dimensionnement et au comportement des ouvrages pour permettre l'exploitation sur une centaine d'années

### Assurer la récupérabilité des colis

- Vérification de la préservation du jeu fonctionnel permettant le retrait des colis

### Satisfaire les fonctions de sûreté après fermeture

- Dispositifs de surveillance pour
  - le Callovo-Oxfordien, le pilier de la sûreté après fermeture ;
  - les autres composants du stockage pour leur rôle complémentaire dans la sûreté après-fermeture
    - Alvéoles
    - Galeries
    - Ouvrages de fermeture
- Un niveau approprié de contrôle et de surveillance dès la construction puis pendant son exploitation en tant que de besoin

# R&D sur les capteurs et dispositifs de surveillance

## Etudes selon 3 axes

Dans l'objectif de disposer de technologies qualifiées et d'éléments probants de faisabilité pour la Demande d'Autorisation de Création puis le démarrage de la phase industrielle pilote :

- Adapter des capteurs et dispositifs existants qui deviennent **durables** aux conditions d'environnement de Cigéo et qui **s'adaptent aux contraintes** de Cigéo
- Développer des moyens **mobilisables**, peu intrusifs et **maintenables**
- Développer des capteurs et dispositifs innovants permettant d'accéder à une **meilleure représentation** des phénomènes (variabilité spatiale : mesures discrètes vs mesures réparties)

# Les capteurs et dispositifs de surveillance

## Une démarche de qualification par étapes

Démarche de qualification	Description de l'étape
1- Analyses méthodes de mesure	Etat de l'art
2- Sélection du matériel/capteur	REX industriels + exigences Andra
3- Test en conditions contrôlées	Vérification des performances, étalonnage, paramètres d'influence...
4- Test sur chantier (démonstrateurs au laboratoire souterrain)	Compatibilité avec les contraintes génie civil , mode opératoire de pose
5- Durcissement, vieillissement accéléré	Tenue aux radiations, anticiper dérives, quantifier durée de vie, prévoir maintenances

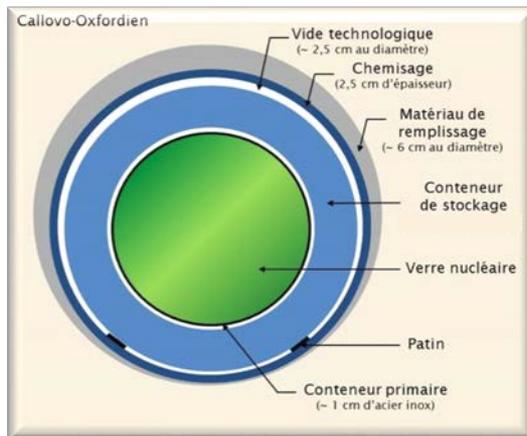
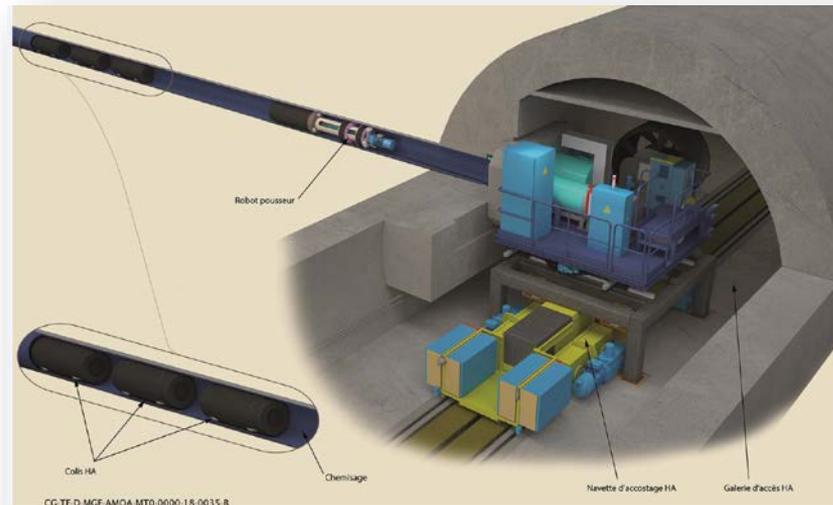


# Surveillance des alvéoles HA

# Le concept de référence de l'alvéole HA de Cigéo

## Micro-tunnels revêtus d'un chemisage métallique en acier au carbone

Alvéole montante de 2% , //  $\sigma_H$   
 Longueur ~150 m  
 Diamètre excavé ~ 90 cm  
 Epaisseur chemisage ~ 25 mm  
 Diamètre alvéole ~ 70 cm



Matériau de remplissage à l'extrados du chemisage  
 (ciment bentonitique)  
 Surconteneur en acier au carbone (Epaisseur ~65 mm)

# La surveillance des alvéoles HA

## Contraintes et conditions d'environnement

Contraintes dues à :

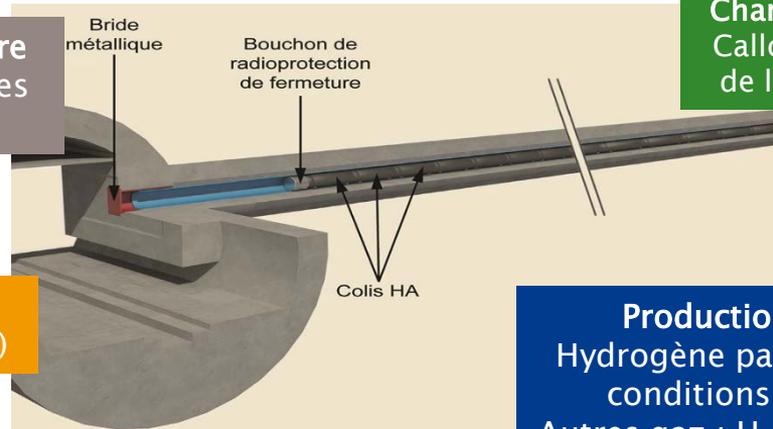
- L'environnement irradiant ( $< 10$  Gy/h)
- Des accès limités pour l'instrumentation
- Des conditions d'environnement THMC variables dans le temps et l'espace
- Une fermeture de l'alvéole envisagée après 10 ans

Une exigence d'accéder à la représentation de l'alvéole dans sa globalité

- des phénomènes variés avec des temps caractéristiques et des localisations différents

Élévation de température jusqu'à  $90^{\circ}\text{C}$  en quelques années

Débit de dose (limité à  $10$  Gy/h par conception)



Chargement du chemisage par le Callovo-Oxfordien : déformations de l'ordre de  $10$  mm en  $100$  ans

Chemisage non étanche : environnement humide probable

Production de gaz :  
Hydrogène par corrosion en conditions anoxiques  
Autres gaz :  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$

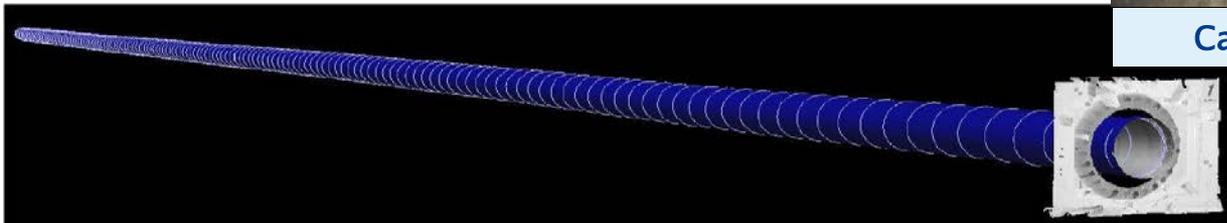
Ex : Surveiller les jeux fonctionnels nécessaires à la mise en place et au retrait des colis 1. Etat de l'art 2. Sélection

## Processus

- Déformation du chemisage

## Dispositifs techniques testés

- Suivi périodique de la géométrie interne du chemisage par Scan 3D et vérification de l'existence d'un jeu fonctionnel autour d'un gabarit virtuel
- Suivi de la convergence par fibre optique et cannes de convergence
- Suivi de la corrosion

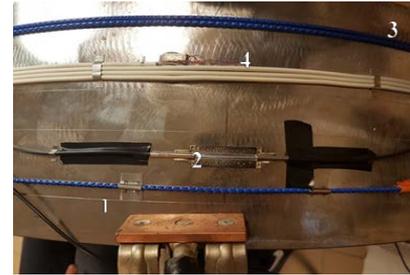
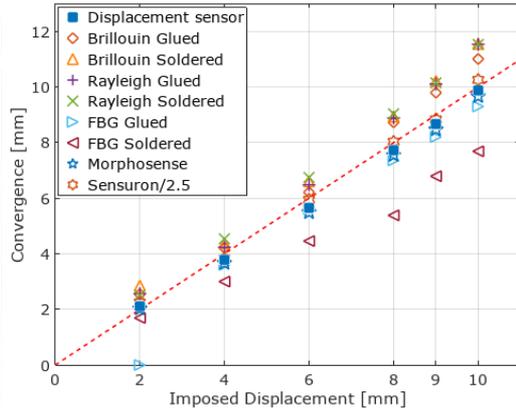


# Ex : Surveiller les jeux fonctionnels nécessaires à la mise en place et au retrait des colis **3. Test en conditions contrôlées**

## Benchmark de méthodes de mesures de convergence

1. Câble FO sous bride soudée
2. Réseau Bragg embase soudée
3. Câble FO collé
4. Jauges résistives
5. Cannes de convergence

Convergence for different measurement techniques



Comparaison entre méthodes (figure de gauche) et avec les résultats de simulations numériques des chargements (figure de droite)

**Mesure ovalisation par FO → OK**



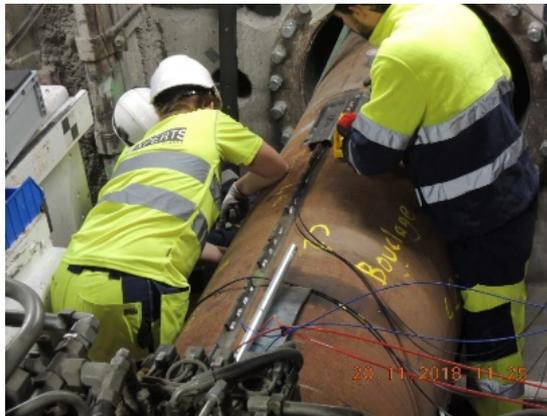
Mesure de convergence : Thèse A. Piccolo 2017-2020

Ex : Surveiller les jeux fonctionnels nécessaires à la mise en place et au retrait des colis **4. Essai sur chantier (démonstateur)**

Installation non intrusive de fibres optiques

Mise en œuvre réussie en extrados du chemisage sur une longueur de 15m puis 28m pour mesures réparties de température et de déformation (pose longitudinale et en spirale)

Aucune rupture de fibres lors de l'installation



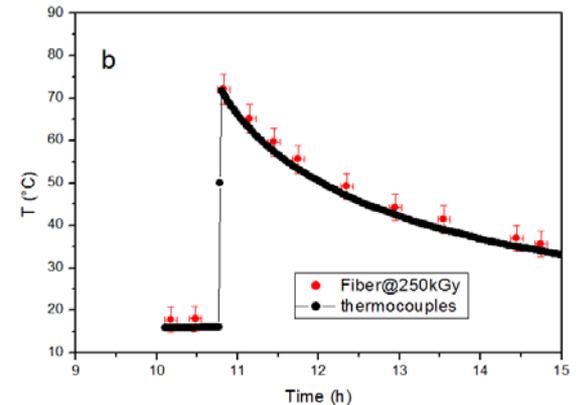
## Ex : Surveiller les jeux fonctionnels nécessaires à la mise en place et au retrait des colis **5. Durcissement**

De nombreux résultats sur les capteurs retenus en référence pour T, rayonnements gamma : fibres optiques (T et déformation)...

Effet des rayonnements gamma : faisabilité acquise

Effets couplés T-H<sub>2</sub>-γ : en cours pour la fibre optique >> Projet CERTYF 2017-2021

Effet des neutrons: collaborations à monter



# Fonction de sûreté d'exploitation : le risque explosion

## Besoin de surveillance

- Détecter les gaz explosifs et toxiques dans *les jeux fonctionnels* et surveiller leur niveau de concentration
  - Gaz explosifs : combustible ( $H_2$ ,  $H_2S$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ) + comburant ( $O_2$ )
  - Gaz toxiques :  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $H_2S$
- Besoin redondant avec d'autres fonctions
  - $CO_2 / H_2 / O_2 / H_2O$  vapeur : vis-à-vis de la corrosion du *conteneur* vs sa durée d'étanchéité

## Contraintes

- Contraintes de conception
  - Espaces disponibles limités :
    - Jeux fonctionnels réduits
    - présence d'obstacles (dispositif de radioprotection, bride)
    - Problématiques des passages de câble
- Domaine de fonctionnement phénoménologique : variabilité de concentration des différents composants gaz le long de l'alvéole :
  - Nécessité de pouvoir accéder à des mesures réparties le long de l'alvéole
- Pouvoir assurer une maintenance

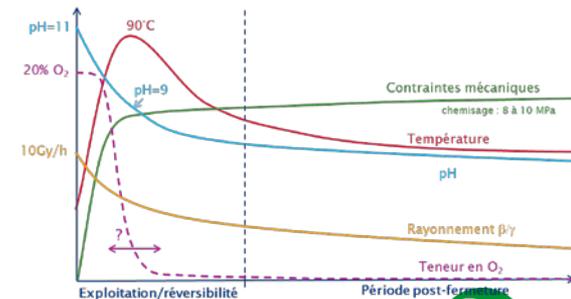
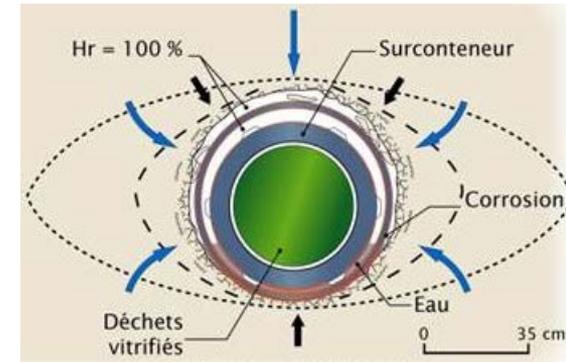
# Fonction de sûreté après fermeture : limiter l'arrivée de l'eau sur les déchets

## Besoins de surveillance

- Surveillance des processus qui déterminent le chargement externe appliqué au conteneur de stockage
- Processus de dégradation chimique du *conteneur* (corrosion)

## Contraintes

- Conditions d'environnement THC complexes et variables dans le temps et dans l'espace
  - Ex : transitoire hydraulique et échanges gazeux avec la galerie en exploitation
- Contraintes temporelles : durée de surveillance (40 ans pour HA0)  $\ll$  durée d'étanchéité min. (500 ans)
- Contraintes technologiques
  - Accessibilité (intrusivité, maintenance)
  - Absence de capteurs de corrosion « sur étagère »



## Fonction de sûreté après fermeture : limiter l'arrivée de l'eau sur les déchets

Des études plus prospectives s'appuient sur des projets d'investissement d'avenir et permettent d'accéder à une meilleure représentation des phénomènes

- **Projet SCCODRA (Suivi et Contrôle de la Corrosion des composants métalliques pour le stockage des Déchets Radioactifs)**
  - Évaluation de techniques de mesures de corrosion et combinaison de méthodes électrochimiques (impédance, résistance de polarisation, bruit électrochimique), électriques (modification de résistivité d'un élément métallique par perte d'épaisseur), d'émissions acoustiques (apparition de fissures de corrosion sous contrainte) et technique de signature du champ électrique (FSM) (mesure épaisseur métal résiduel)
  - CETIM, Institut de la corrosion, INSA Lyon, université Lyon, CNRS, industriels



# Poursuite des travaux de RD&D

Techniques de mesure dont la qualification est non achevée

- Mesures de gaz : poursuite du développement du lidar Raman, des fibres optiques...
- Corrosion : capteurs existants en cours de qualification sur chantier
- Robot : développement de robot permettant de réaliser des scans 3D des alvéoles HA et de porter des dispositifs de mesures...

Intrusivité

- Foisonnement des câbles : études transmission sans fil
- Optimisation du placement de capteurs

Traitement de données : de la mesure brute à l'indicateur et prise en compte des paramètres d'influence

Un planning de développement qui dépasse le dépôt de la DAC et s'inscrit dans un objectif de mise en œuvre possible lors de la Phase industrielle pilote



# Merci de votre attention