

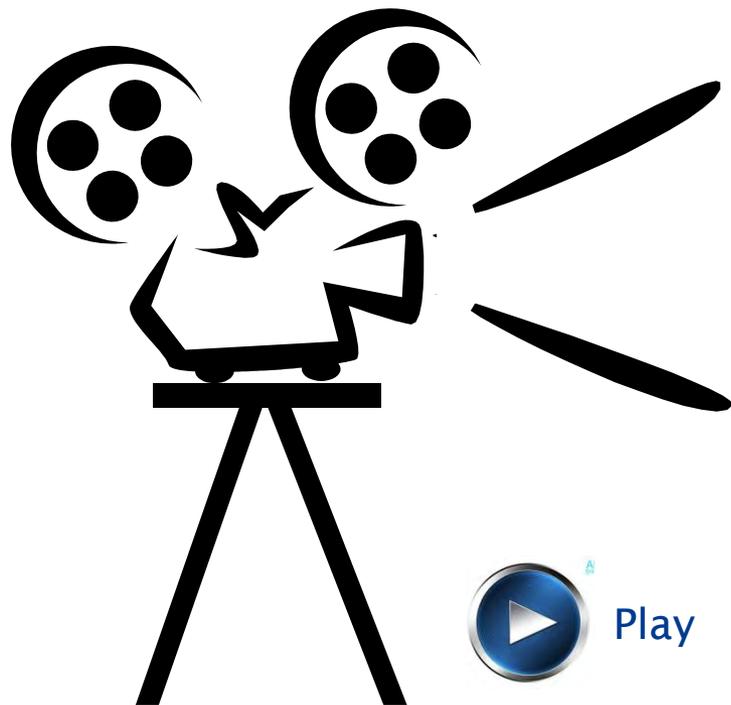


## Mise en perspectives des 20 ans de recherches qui ont conduit au projet Cigéo

*Frédéric PLAS - Directeur de la R&D*

*Journées NEEDS 2014*





### Sûreté d'exploitation

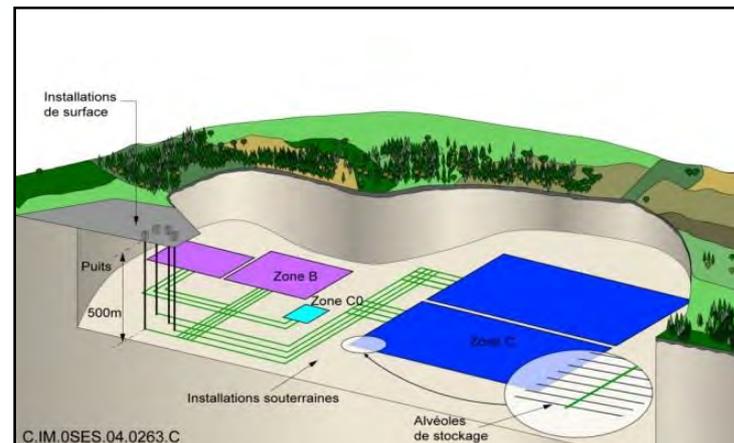
- ◆ Analyse des risques radiologiques ou non radiologiques
- ◆ Définition de mesures de prévention, détection et protection contre les risques identifiés (situation normale ou accidentelle)
  - Impact radiologique en situation normale pour le personnel d'exploitation et pour le public inférieur aux valeurs réglementaires
  - Conséquences maîtrisées en situation accidentelle (incendie, chute de colis...), sans risque de dissémination de matière radioactive

### Sûreté long terme

- ◆ La sûreté à long terme se fonde sur :
  - Les dispositions de conception aptes à rendre le stockage plus robuste face aux incertitudes de connaissances,
  - La maîtrise scientifique de la compréhension de l'évolution du stockage,
  - Les performances de fonctions de sûreté multiples permettant de maintenir la sûreté du stockage même en situation dégradée,
- ◆ Maîtrise des impacts induit par le stockage, en particulier par rapport à des seuils
- ◆ Evaluation au moyen d'analyses, de modélisation et de simulation du stockage jusqu'à 1 million d'années)

### Elle intègre les connaissances acquises

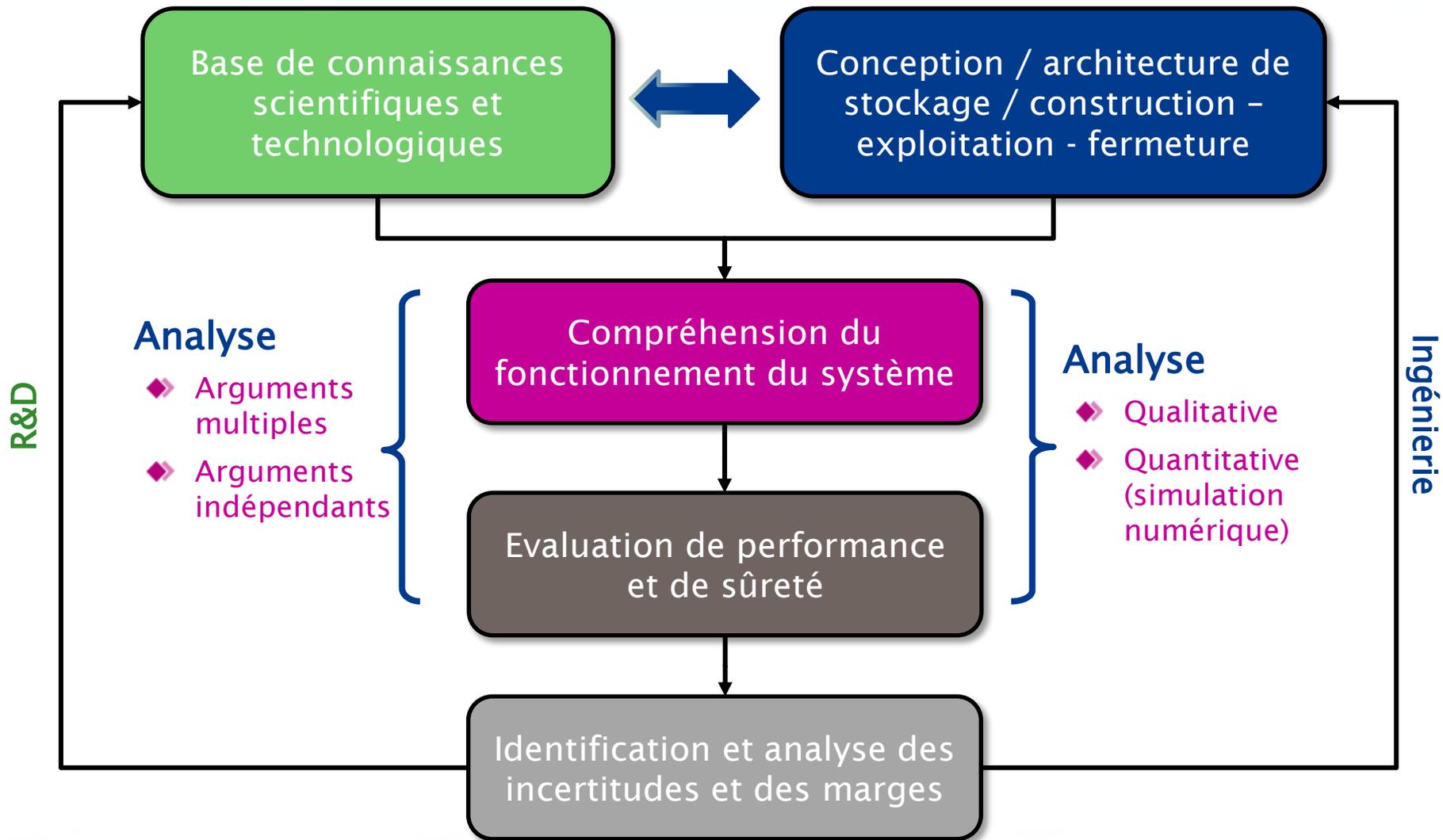
- ◆ Les colis de déchets
- ◆ Les architectures
  - Composants (alvéoles...liaisons surface-fond)
  - Organisation spatiale des composants
  - Matériaux ouvragés constitutifs
- ◆ Le milieu géologique (roche hôte et encaissants)
- ◆ Les radionucléides (et les toxiques chimiques)



### Elle conduit à la description spatiale et temporelle du stockage et de son environnement

- ◆ Des éléments d'analyse pour comprendre l'influence des différents phénomènes et préciser les éléments majeurs
- ◆ Des données d'entrée pour la modélisation et la simulation numérique des phénomènes et de leurs couplages

Elle est fondée sur les concepts de stockage mais elle en oriente aussi la définition



Simulation numérique

Caractérisation et Comportement THMCR des composants des stockages

Déchets

Milieu géologique

Radionucléides et Toxiques

Composants ouvragés

Environnements de surface

R&D

Ingénierie des stockages

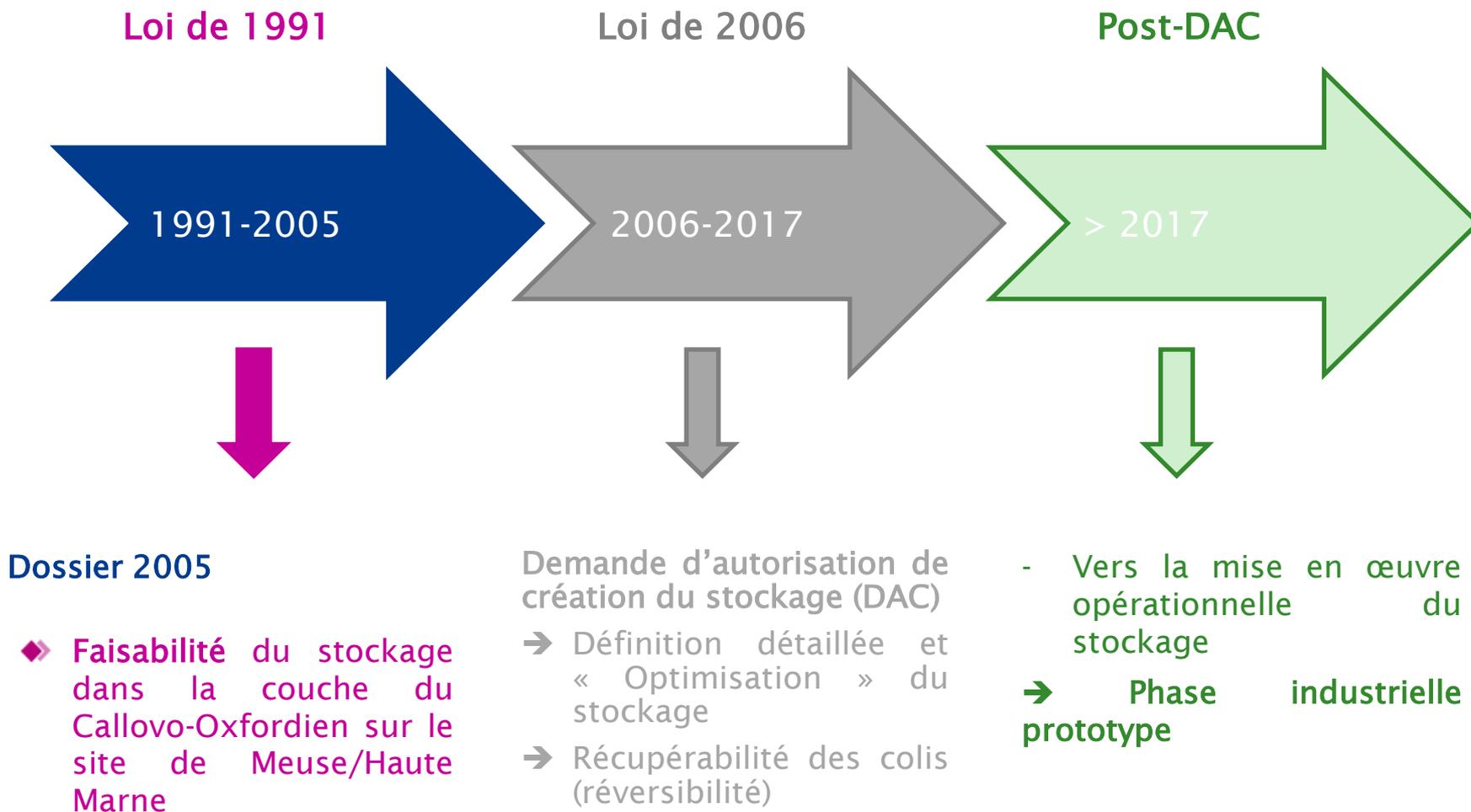
SHS

Observation et surveillance des stockages

Tri/Traitement des déchets

Construction et exploitation des stockages

Contrôle de 2<sup>nd</sup> niveau des colis de déchets



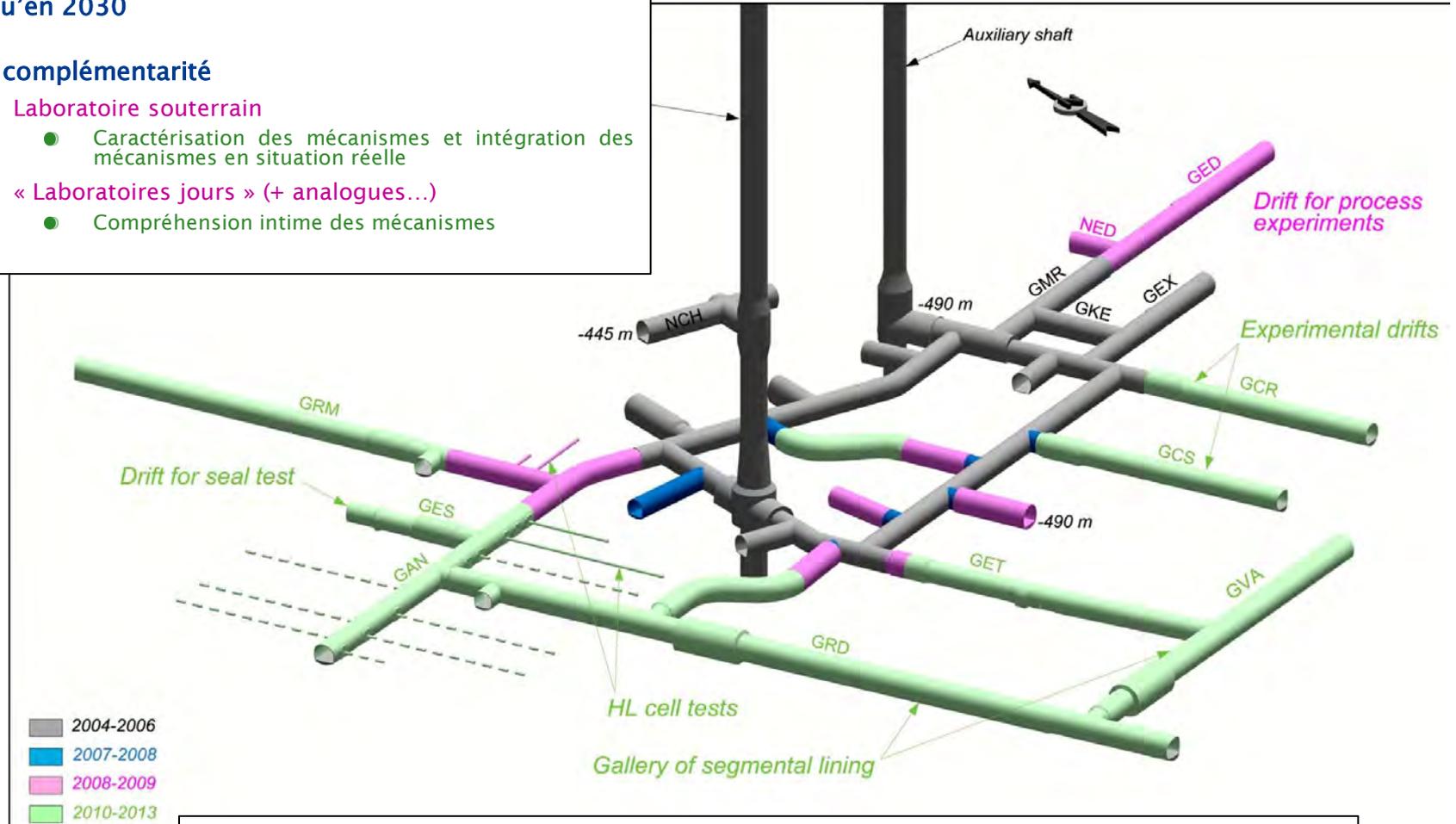
# Le Laboratoire souterrain (LS)

## Un outil majeur pour la R&D sur le stockage

Création en 1999 - Autorisation de fonctionnement jusqu'en 2030

### Une complémentarité

- ◆ Laboratoire souterrain
  - Caractérisation des mécanismes et intégration des mécanismes en situation réelle
- ◆ « Laboratoires jours » (+ analogues...)
  - Compréhension intime des mécanismes



D/PL ADSD 09-0040 / C

◆ Aujourd'hui 1,4 km de galeries, 600 forages et 10.000 points de mesure



1991-2005

## La faisabilité du stockage

- La sûreté long terme

La couche du Callovo-Oxfordien assure la sûreté à long terme (avec les scellements)

- La constructibilité du stockage

### Caractérisation

- ◆ Le milieu géologique à l'actuel et sur le prochain million d'année
- ◆ Les grandes caractéristiques du comportement
  - Des colis de déchets majeurs HA/MAVL et des combustibles usés
  - Des matériaux ouvragés (béton, argile et aciers)
  - Des radionucléides dans les matériaux et le milieu géologique
- ◆ Les principales perturbations du stockage sur le milieu géologique et entre composants
  - Zone endommagée autour des ouvrages
  - Interactions THMC-gaz
    - » *Perturbations alcaline et Fer sur les argiles ; Surpression interstitielle d'origine thermique ; Transfert du gaz dans les argiles*

### Evaluation de l'évolution du stockage et du milieu géologique aux différentes échelles de temps et d'espace

#### Essais technologiques coordonnés avec les expérimentations scientifiques (entre 2001 et 2005)

- ◆ Etudes d'ingénierie préliminaires permettant un pré-dimensionnement
- ◆ Travaux de construction des infrastructures d'accès et de service du laboratoire souterrain
- ◆ Premiers prototypes industriels

- ◆ Identifier la géométrie de la formation argileuse callovo-oxfordienne et ses encaissants
  - Epaisseur, profondeur, séquences sédimentaires...
  
- ◆ Reconstituer les environnements de dépôts des formations
  
- ◆ Définir le cadre structural, l'histoire tectonique du secteur investigué et la sismicité
  
- ◆ Caractériser les propriétés physiques de la formation hôte et leur variabilité spatiale
  - Hydro-dispersives : Perméabilité, diffusion et rétention
  - Thermique et thermo-hydromécaniques
  - Géochimie
  
- ◆ Caractériser les écoulements dans les formations encaissantes et les échanges avec le Callovo-Oxfordien



1993-1995

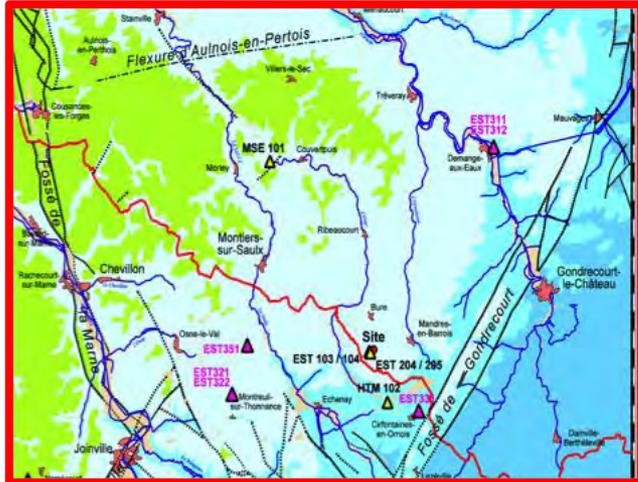
Echelle régionale

500 km<sup>2</sup>

Première phase : 1993-1995

- ◆ 15 km de campagne sismique 2D
- ◆ 7 forages profonds carottés

LEGENDE  
 — Lignes sismiques pétrolières existant en 1994  
 ● Forages pétroliers réalisés avant 1994



2001-2004

Secteur

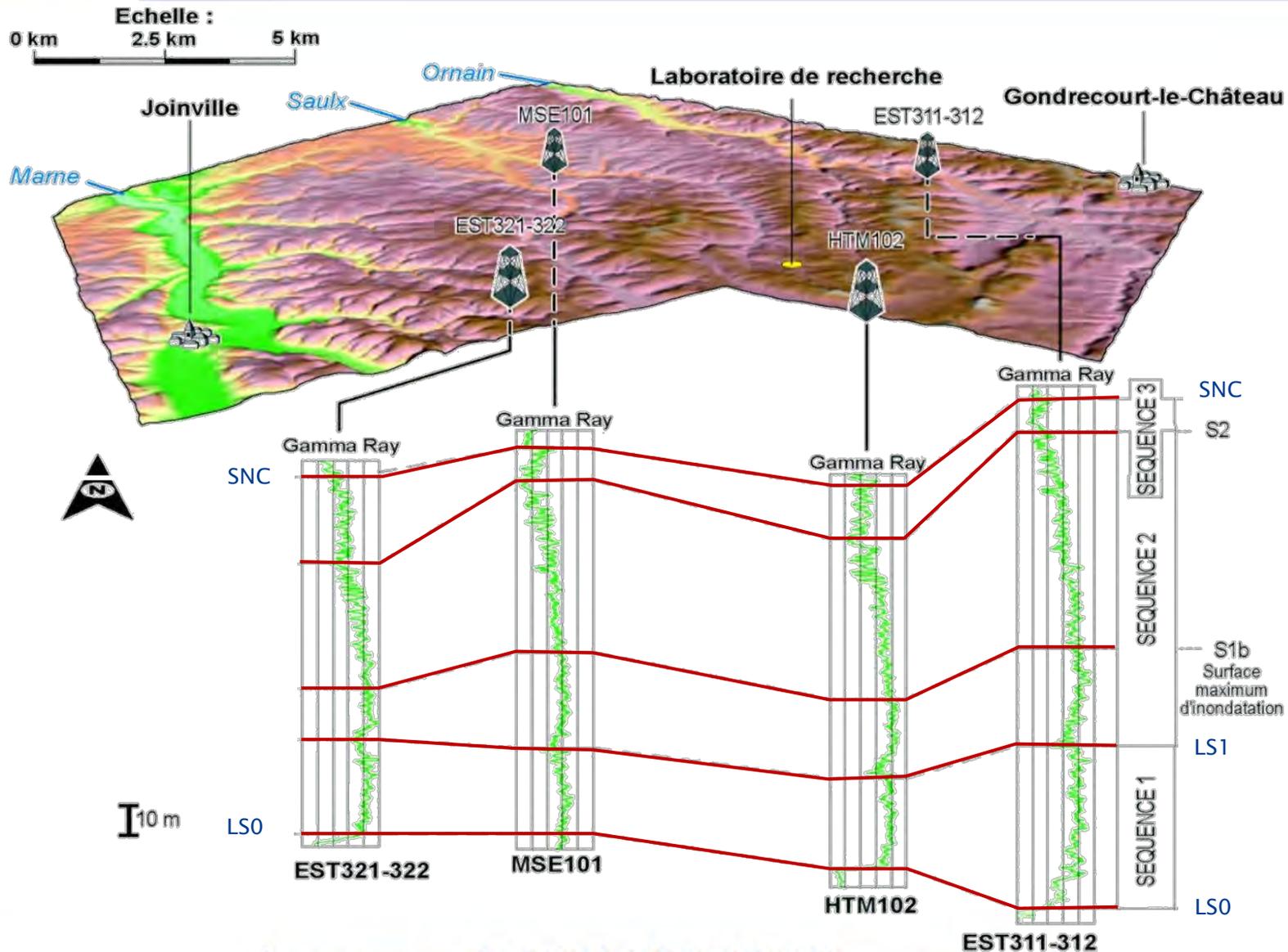
300 km<sup>2</sup>

Seconde phase : 2001 -2005

- ◆ 14 forages carottés sur le secteur et le Laboratoire souterrain
- ◆ 3,5 km campagne sismique 2D
- ◆ Première sismique 3D de 4,4 km<sup>2</sup>
- ◆ 1300 km de lignes sismiques pétrolières retraitées

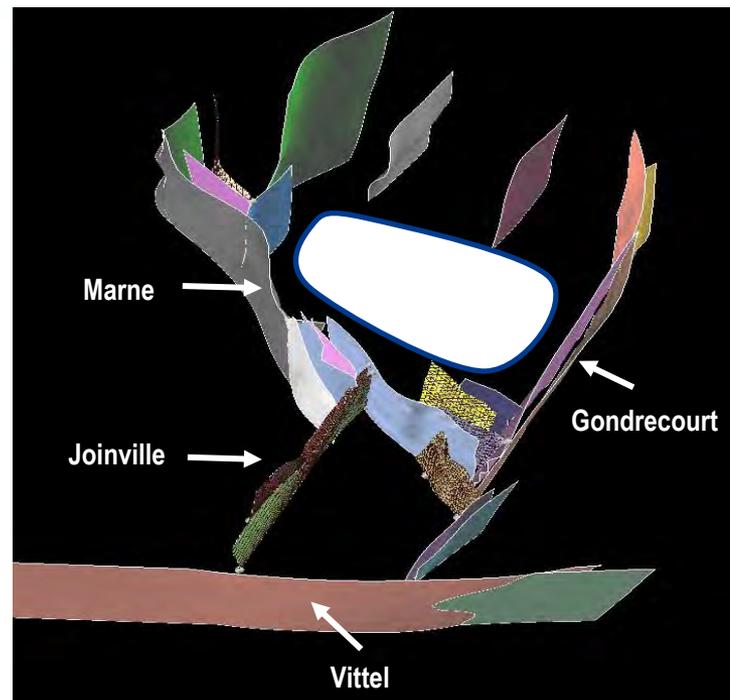
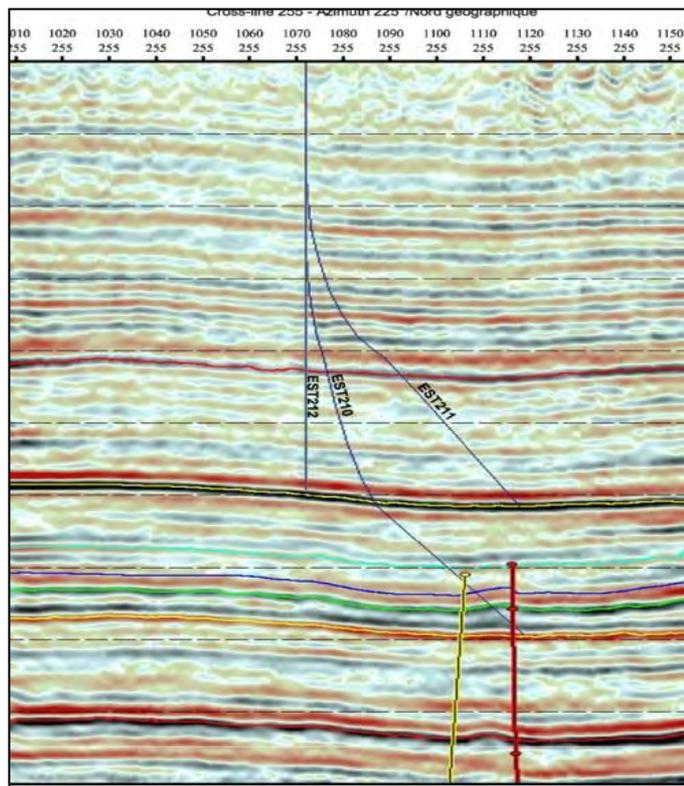
# La caractérisation du milieu géologique 1991-2005

## La continuité latérale



### A l'échelle de la zone étudiée

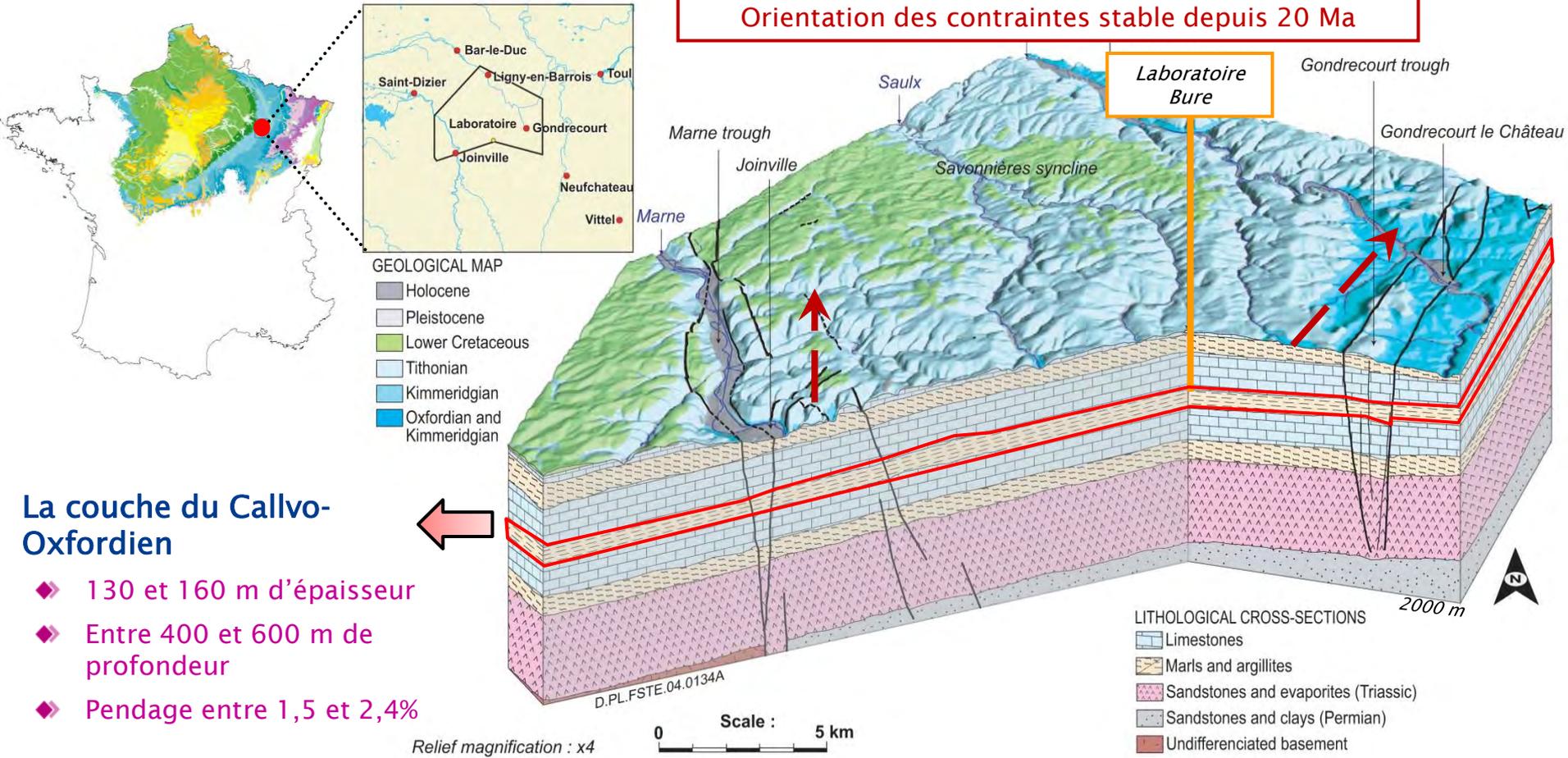
- ◆ Cadre structural bien appréhendé
- ◆ Champ de contrainte stable depuis 20 Ma
- ◆ Faible fracturation en dehors des grandes failles régionales



### A l'échelle du site du Laboratoire

- ◆ Pas de faille de rejet > 2 m détectée par la sismique 3D
- ◆ 4 forages dirigés (1377 m d'échantillons), 38 m de fissures sans mouvement et n'affectant pas les propriétés hydrauliques
- ◆ Quelques fissures remplies avec des sulfates formées au très jeune âge durant la compaction

2 orientations de fracturation : N40°E et N140 à 150°E  
Tectonique surtout tertiaire  
Orientation des contraintes stable depuis 20 Ma



### La couche du Callvo-Oxfordien

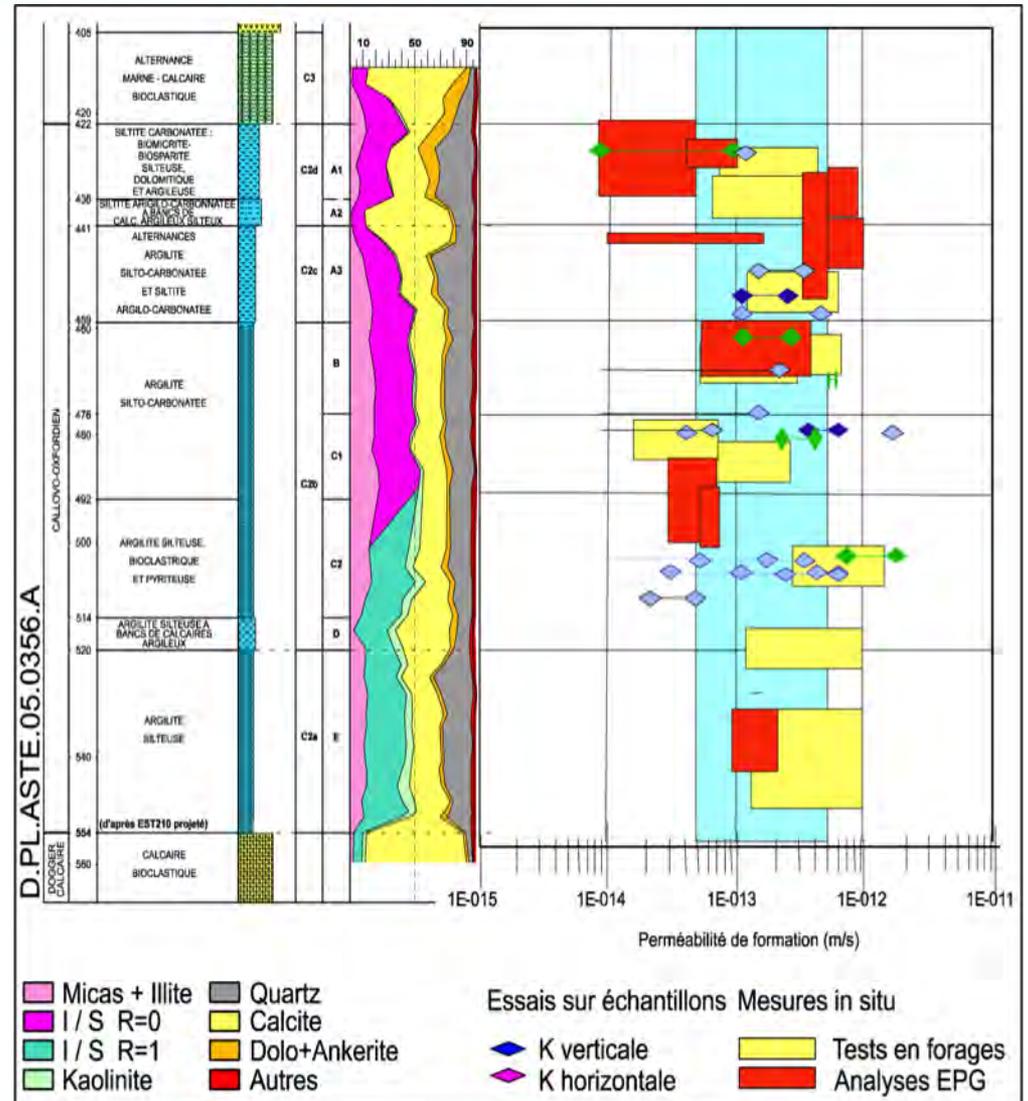
- ◆ 130 et 160 m d'épaisseur
- ◆ Entre 400 et 600 m de profondeur
- ◆ Pendage entre 1,5 et 2,4%

### ◆ Très faible perméabilité

- Mesurée à différentes échelles
- Similaire entre mesures in situ et mesures sur échantillons

### ◆ Faibles coefficients de diffusion

### ◆ Faible variation des valeurs des paramètres dans une zone de 250 km<sup>2</sup> autour du laboratoire de recherche



Construction d'un modèle hydrogéologique fusionné région-secteur en plusieurs états :

◆ Sa représentation à l'actuel

- Construit et calé sur les données géologiques, géo-hydro-chimiques et isotopiques, piézométriques acquises à mi-2003
- Intégrant les failles à l'échelle du secteur



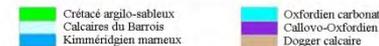
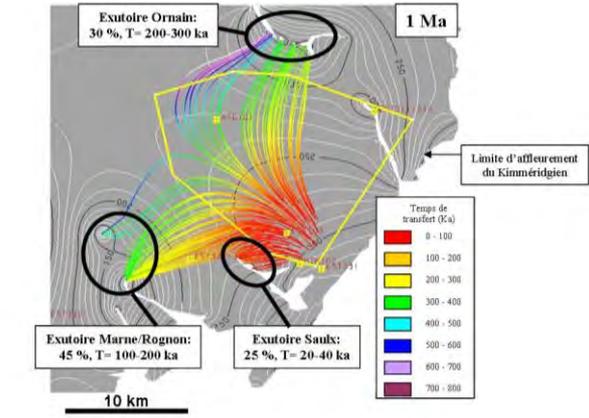
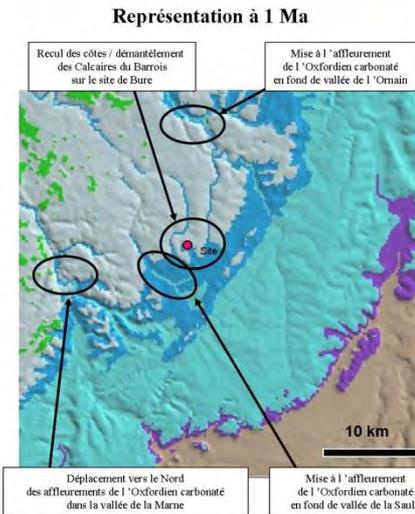
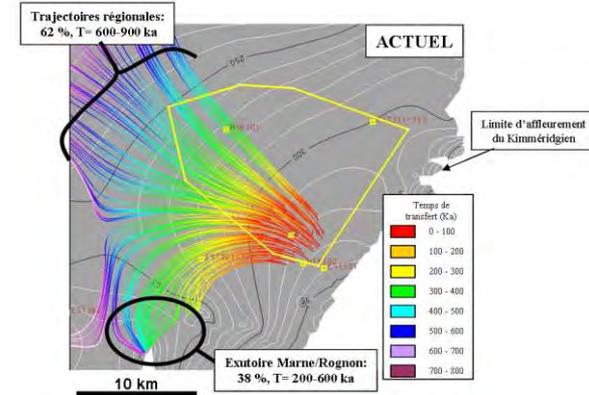
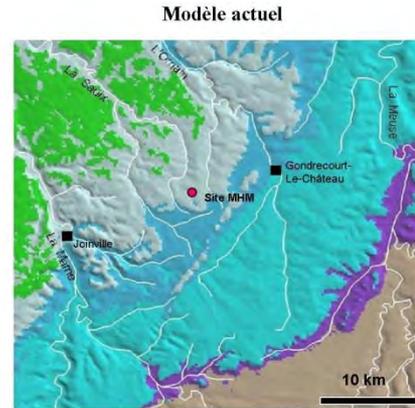
- 2/3 trajectoires → régionales NO
- 1/3 trajectoires → Exutoire naturel SO : Marne-Rognon

◆ Sur le prochain million d'années

- Modèles du climat : scénarios d'évolutions naturelle et fortement perturbée
- Modèles simplifiés de l'érosion et de la surrection tectonique
  - Hypothèses «maximisantes» : Incision des vallées = surrection tectonique, avec taux d'incisions majorés



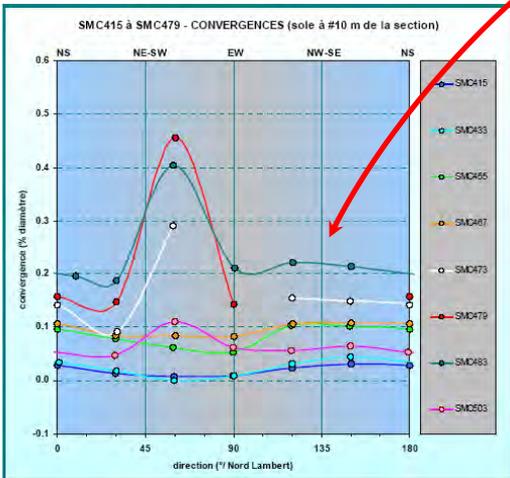
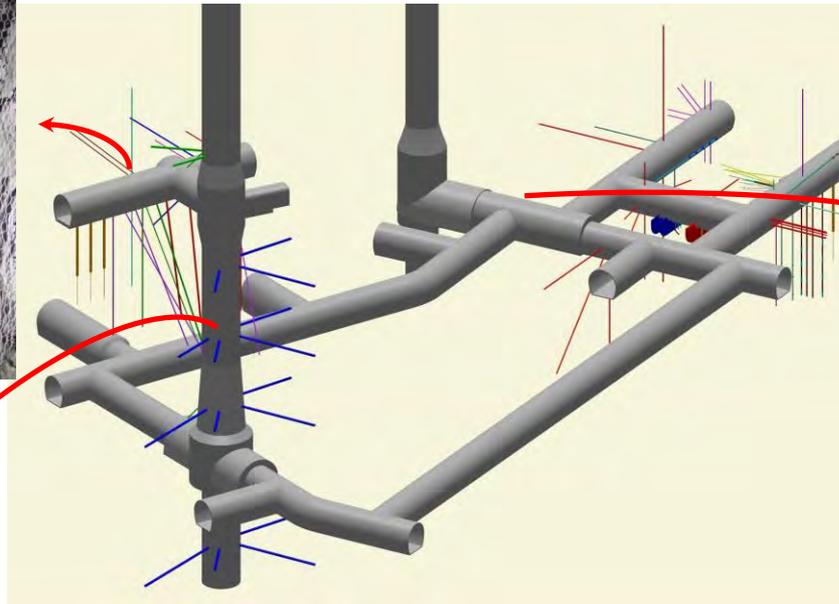
- Une mise à l'affleurement de l'Oxfordien en 3 endroits à partir de 500.000 ans
- Exutoires naturels : Marne-Rognon, Ornain, Saulx



## Écoulements dans l'Oxfordien

- ◆ Suivi du creusement du puits
- ◆ Galerie expérimentale de 40 mètres au niveau 445 m (toit du Callovo-Oxfordien)
- ◆ 750 mètres de galerie au niveau 490 mètres (milieu de la couche)

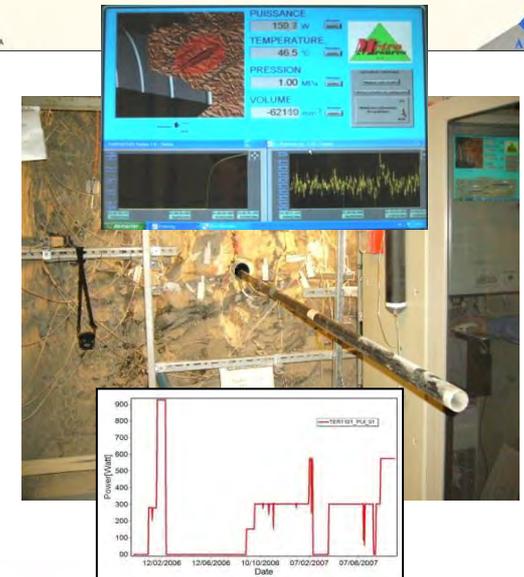
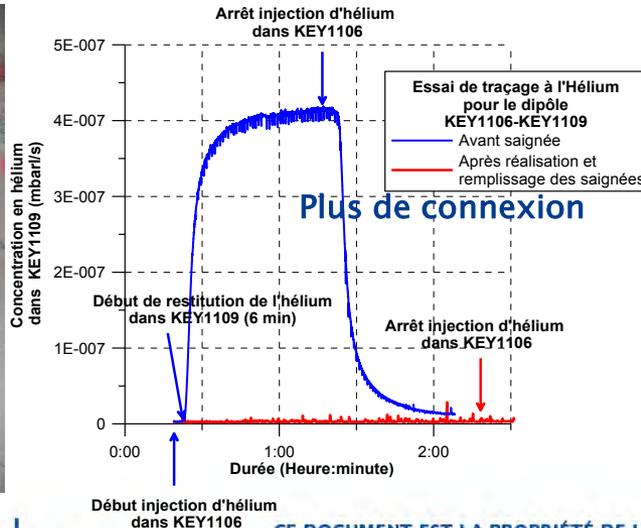
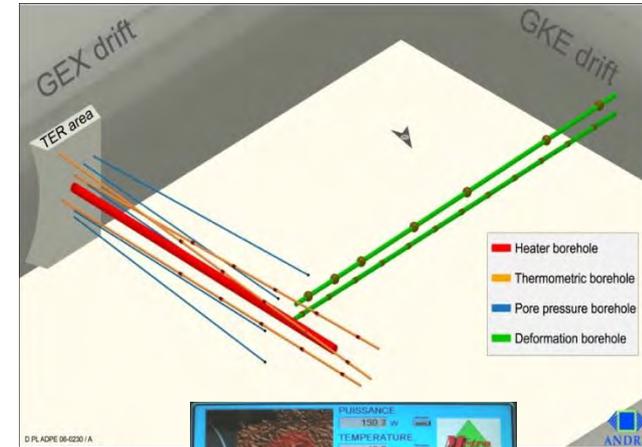
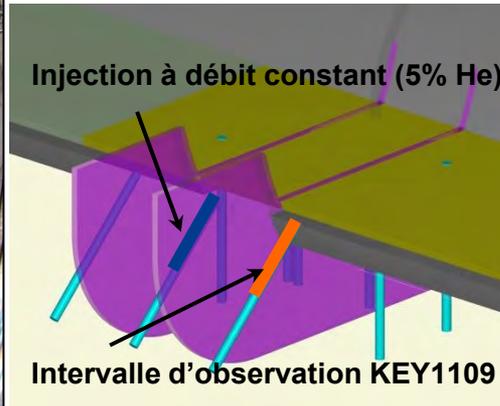




- A 445 m: très faible fracturation induite
- Augmentation de l'endommagement avec le taux d'argile
- A 490 m: fracturation induite importante

◆ Scelllements / coupure hydraulique de la zone endommagée => expérimentation KEY

◆ Réponse THM des argilites => expérimentation TER



### ◆ Spéciation/solubilité

- Première phase de développement de la base Thermochimie

### ◆ Chimie de l'eau

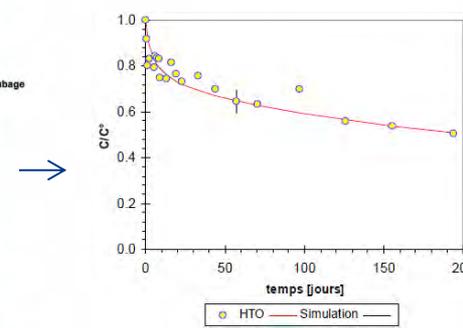
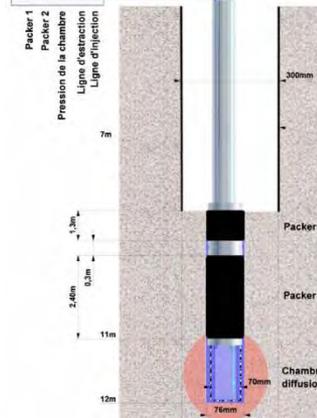
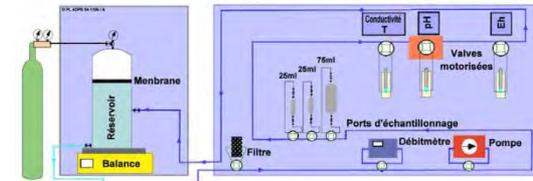
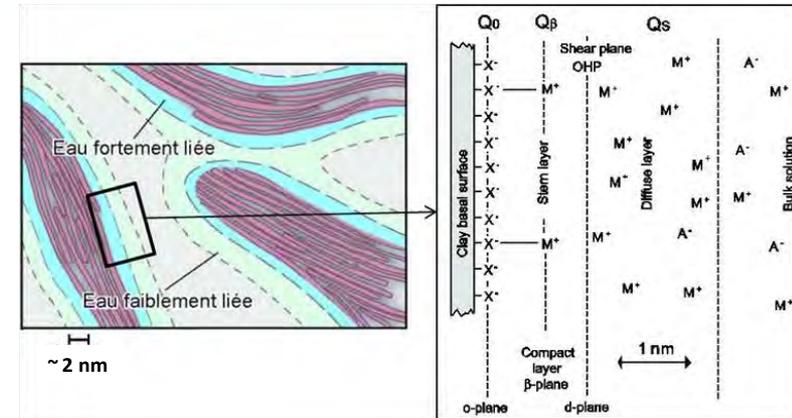
- Premiers modèles de structuration de l'eau et des pores au sein des argilites
- Caractérisation et modèle de chimie des eaux du COx et des encaissants
- Caractérisation des traceurs naturels dans la couche du COx

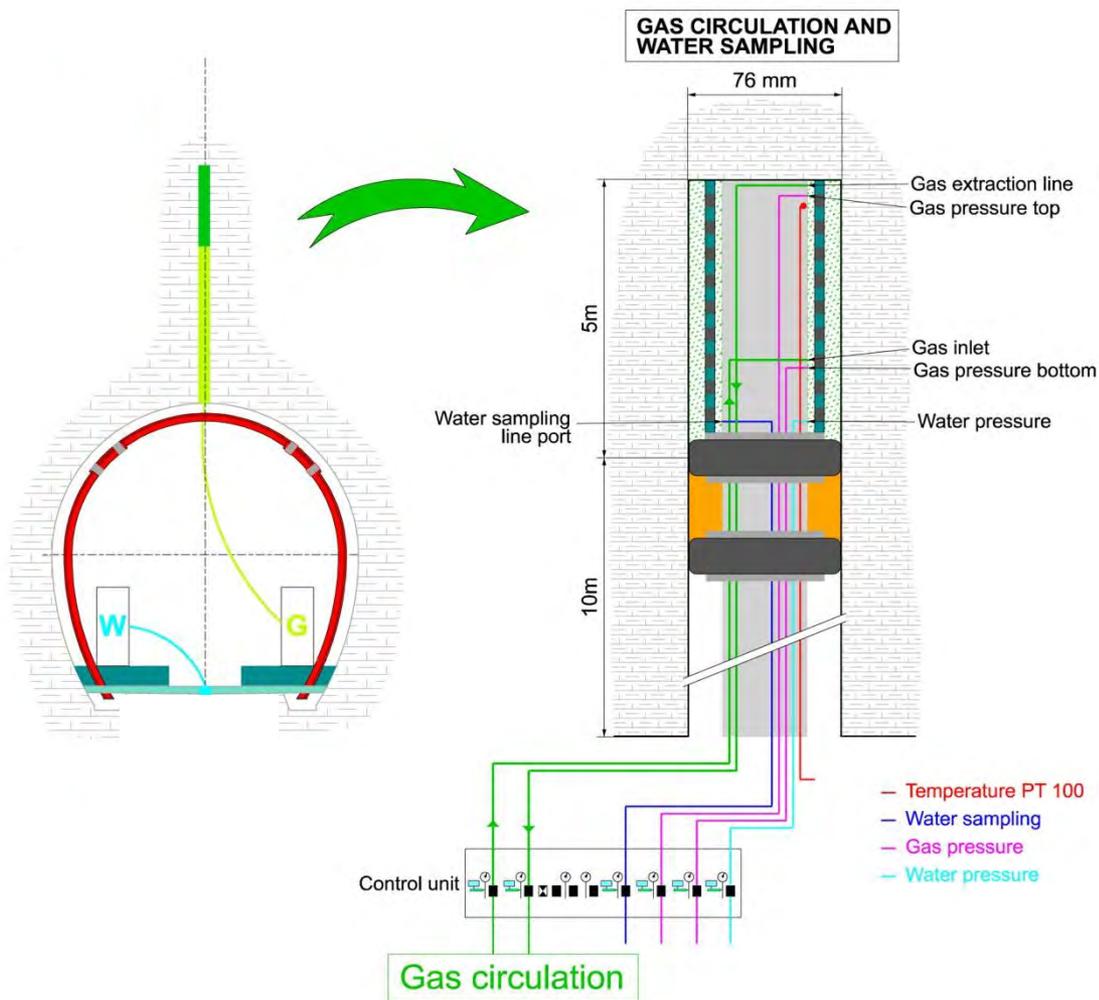
### ◆ Rétention

- Acquisition des propriétés de rétention sur des matériaux cimentaires de référence, les argilites du COx et les bentonites

### ◆ Diffusion

- Acquisition des propriétés diffusion pour le COx et les bentonites
  - Mise en place de l'essai d'injection in-situ DIR + premiers résultats





- ◆ Priorité forte sur le comportement des matériaux dans une optique long terme
- ◆ Première approche des couplages THMC et développement de modèles couplés

- Matériaux argileux

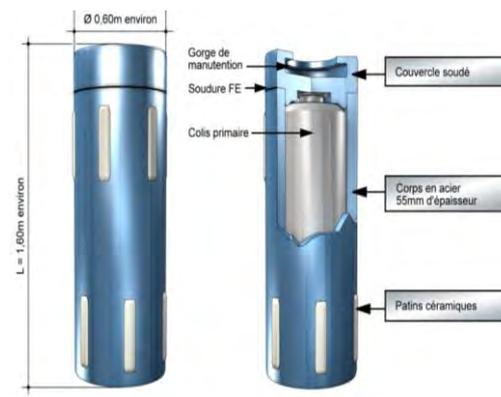
- Bentonites (barrière ouvragée, bouchons, scellements)
- Propriétés THM
- Interactions chimiques Fer et perturbation alcaline

- Matériaux cimentaires

- Bétons classiques (CEM I et V) en priorité
- Les grand processus de dégradations chimiques : hydrolyse / décalcification, carbonations (atmosphérique et en milieu saturé), attaque sulfatique + température

- Matériaux métalliques

- Les cinétiques de corrosion généralisée des aciers non alliés
- Les risques de corrosion localisée des aciers inoxydables et des alliages base nickel
- Les interfaces entre les matériaux (fer/argile et ciment/argile)



## Essais en laboratoire jour

### ◆ Matériaux argileux

- Propriétés THM en fonction de la densité, de la température...
- Hydratation et gonflement à différentes échelles
- Effet de la température, du fluide poral et des rayonnements sur les processus d'altération

### ◆ Matériaux cimentaires

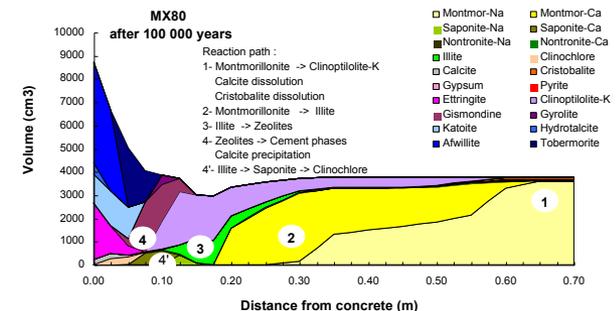
- Développement des modèles d'évolution en milieu saturé pour les bétons classiques (CEM I et CEM V)
- Premiers éléments sur la formulation des bétons à faible chaleur d'hydratation ou bas-pH

### ◆ Matériaux métalliques

- Choix des aciers non alliés pour le surconteneur HA
- Détermination des seuils d'amorçage de la corrosion en atmosphère humide et en milieu insaturé
- Détermination des cinétiques de corrosion généralisée en milieu argileux
- Evaluation des risques de corrosion localisée des aciers non alliés

### ◆ Interfaces entre les matériaux

- Développement des modèles d'interactions fer/argile et ciment/argile



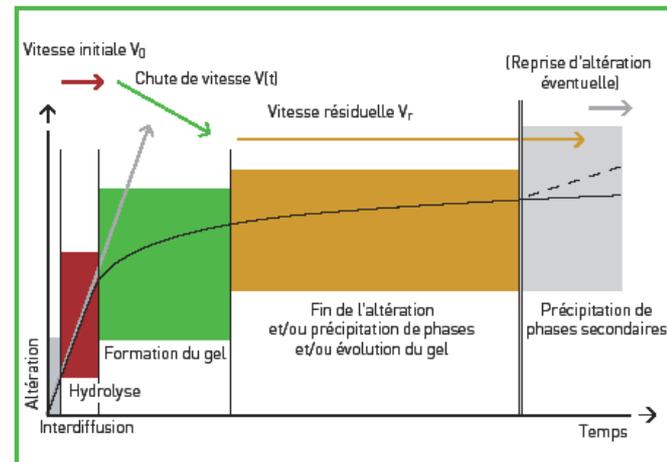
### ◆ Prise en compte des grandes familles de colis de déchets

- Déchets vitrifiés (Verres R7/T7 principalement)
- CSD-C
- Boues bitumées
- + Combustibles usés (UOx principalement)

### ◆ R&D principalement axée sur

- le relâchement des radionucléides sur le long terme
- Le comportement intrinsèque des déchets avec une base en terme de couplage avec l'environnement

### ◆ R&D fondée sur des expériences en laboratoire jour



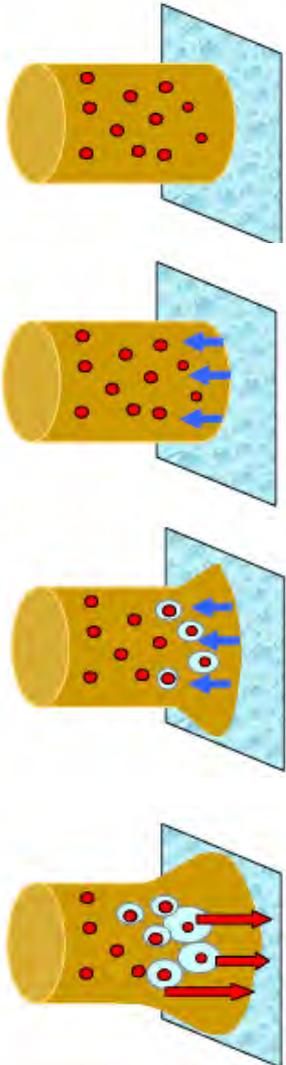
## Principaux résultats

### ◆ Développement des modèles de relâchements

- des déchets vitrifiés, intégrant une chute de vitesse puis une vitesse résiduelle
- des combustibles UOx : Instant Release Fraction (IRF) et modèle d'altération de la matrice
- des CSD-C sur la base de vitesses de corrosion issues de la littérature
- des colis de boues bitumées (Modèle COLONBO)

### ◆ Premiers éléments sur la production de gaz par

- radiolyse des matériaux organiques et cimentaires
- corrosion anoxique des déchets métalliques



◆ Adsorption des molécules d'eau à la surface du bitume et solubilisation de l'eau



◆ Transfert de l'eau dans la masse du bitume par diffusion sous l'effet d'un gradient de potentiel chimique

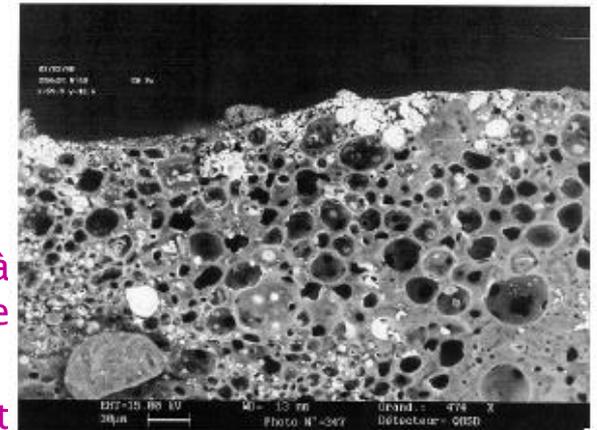
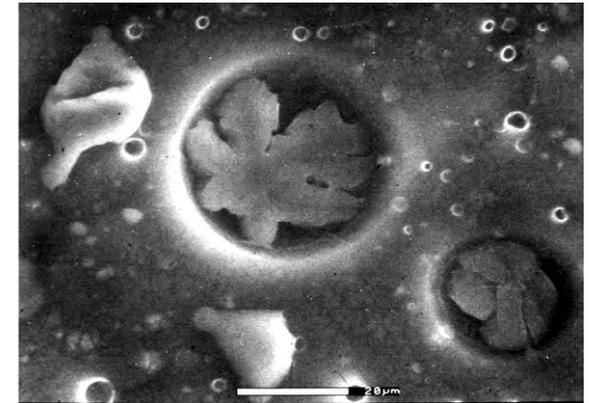


◆ Reprise d'eau par les sels et solubilisation, Gonflement du bitume



◆ Création d'une « zone altérée » perméable à toutes les espèces, propagation de cette couche par diffusion

◆ Relâchement des sels solubles par transfert diffusif et relâchement des sels peu solubles limité par diffusion/concentration à saturation



### Critères géométriques

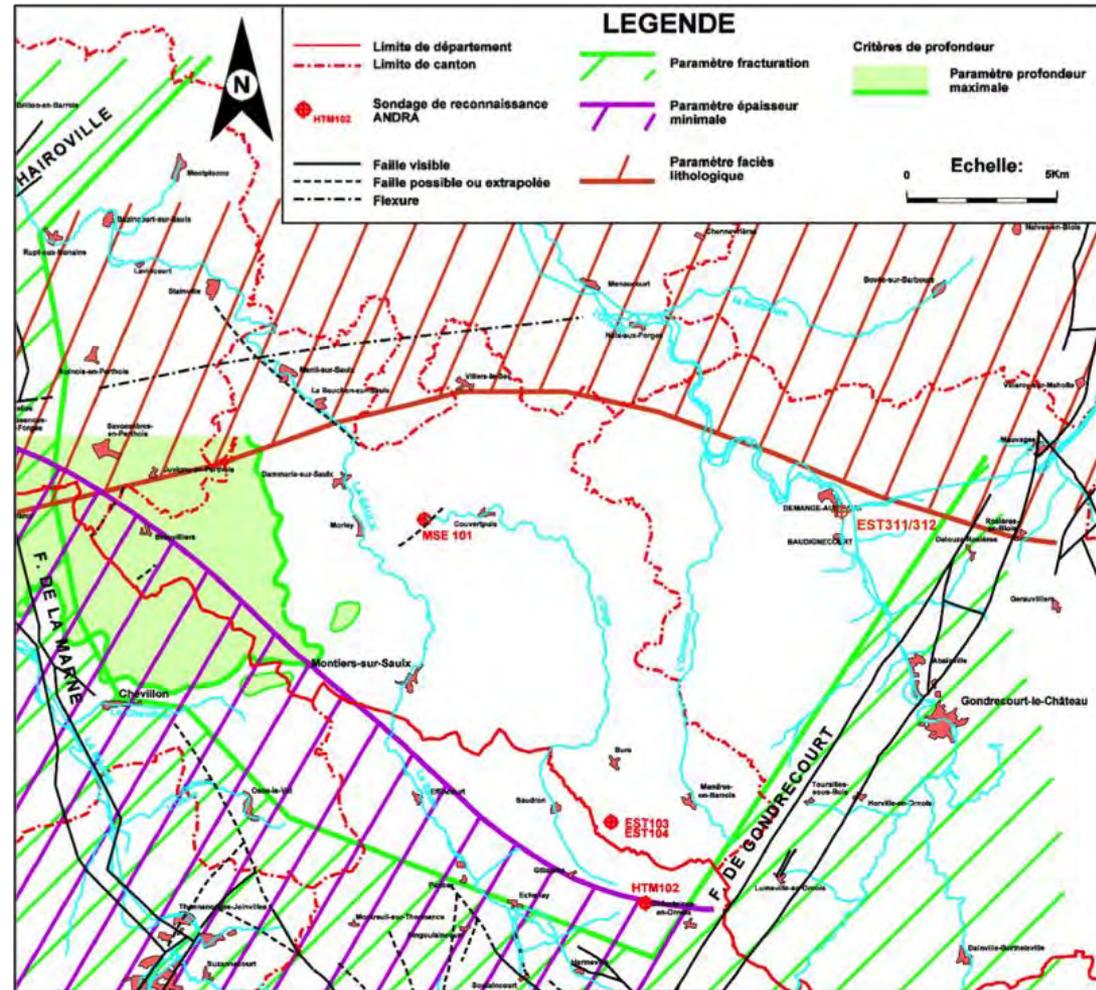
- ◆ Profondeur < 630 m (milieu de la couche)
- ◆ Epaisseur > 130m

### Critère structural

- ◆ Localisation à plus de 1 km des failles majeures

### Critères lithologiques

- ◆ Epaisseur du niveau R0 > 65m
- ◆ % silts < 20-30 %



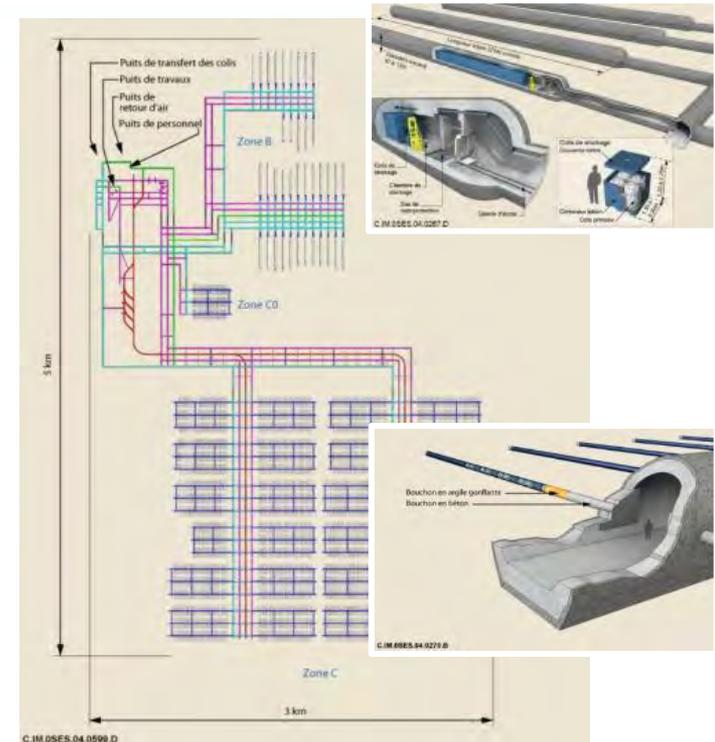
### Le rapport Argile 2005

- ◆ Architecture souterraine, construction, fonctionnement, réversibilité
- ◆ Evolution phénoménologique du stockage
- ◆ Etude sur la sûreté
- ◆ Description du site
- ◆ Modèle pour le stockage des déchets
- ◆ Comportement du colis de déchets
- ◆ Exigences préliminaires relatives au colis de déchets
- ◆ Modèles conceptuels et connaissances basiques

### Revue scientifique et de sûreté 2006

### Revue par les pairs réalisée par l'AEN

- ◆ Autorité de sûreté nucléaire (ASN)
- ◆ Commission nationale d'évaluation (CNE)



- ◆ Près de 100 laboratoires associés, 7 groupements thématiques de laboratoires, 3 groupements de recherche avec le CNRS (FORPRO, MOMAS...)
- ◆ Des partenariats avec les grands organismes de recherche français
- ◆ Des coopérations internationales,
  - notamment avec des agences et instituts européens tels que Ondraf, Nagra, BGR, DBE et Enresa
- ◆ 30 participations aux Programmes Cadre de Recherche et Développement de l'Union Européenne
- ◆ Participations aux activités des organismes internationaux (AEN, AIEA)
- ◆ Près de 300 publications de rang A, 75 thèses de doctorat (35 soutenues), colloques scientifiques de Reims et Tours (500 participants)



ENGINEERING STUDIES  
and  
DEMONSTRATION of REPOSITORY DESIGNS





**2006 - 2017**

**Vers la mise en œuvre industrielle du stockage**

**La demande d'autorisation de création de Cigéo (1<sup>er</sup> tranche)**

### Sûreté après fermeture

- ◆ Consolider et approfondir les connaissances sur l'évolution phénoménologique
  - Réduire les incertitudes résiduelles et accroître la quantification des marges

### Conception du stockage

- ◆ Définir l'implantation du stockage sur la ZT
- ◆ Démontrer la réalisation industrielle en conditions réelles
- ◆ Assurer l'optimisation technico-économique (sans préjudice sur la sûreté)
  - Phase d'esquisse → Avant Projet Sommaire → Avant projet détaillé de Cigéo porté à la Demande d'Autorisation de Création

### Sûreté d'exploitation

- ◆ Consolider la sûreté d'exploitation en lien avec les dispositions de conception détaillées
- ◆ Préparer le plan de surveillance de l'environnement

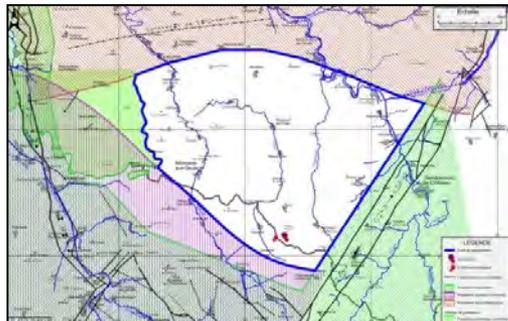
### Réversibilité

- ◆ Assurer / Définir la (les conditions de la ) récupérabilité des colis sur la période d'exploitation séculaire
  - Accroître la maîtrise de la tenue des ouvrages (notamment les alvéoles) et des colis sur la durée séculaire d'exploitation

- ◆ Consolider et préciser la caractérisation du milieu géologique sur la ZT
- ◆ Accroître la maîtrise des phénomènes « élémentaires »
  - » *REX du Dossier 2005, Prise en compte détaillée de l'inventaire complet des déchets...*
  - Comportement en solution et Transfert des RN
  - Dégradation physico-chimique des colis (déchets, matrice, conteneur)
  - Dégradation physico-chimique des matériaux du stockage et interactions avec le milieu géologique
  - Transfert des gaz et auto-colmatage des milieux argileux (argilites et bentonites)
- ◆ Améliorer la représentation des couplages entre phénomènes et aux interfaces entre composants sur le long terme et en exploitation
  - » *REX du Dossier 2005, réversibilité, niveau APD...*
  - Le transitoire (thermo)hydraulique multi-composants gaz
  - L'évolution chimique des alvéoles MAVL à chimie complexe
  - Le comportement THM des composants
    - Focus sur galeries/alvéoles MAVL, alvéole HA, scellements et COX en grand

- ◆ Accroître la simulation numérique des processus de l'évolution phénoménologique,
  - En terme de capacité de représentation des couplages, de précision des calculs et de réduction des temps de calcul
  
- ◆ Développer les démonstrateurs technologiques
  
- ◆ Développer un monitoring et un traitement des données adapté aux spécificités de Cigéo pour l'observation/surveillance de Cigéo
  - Durabilité, durcissement...
  
- ◆ Assurer la maîtrise de l'évolution des environnements de surface de Cigéo sur la durée séculaire d'exploitation
  - Disposer des moyens d'évaluer les évolutions et leurs origines (pressions anthropiques...), notamment vs Cigéo
  
- ◆ Développer une approche SHS, en terme de dialogue avec les parties prenantes sur des thématiques d'intérêt pour ces dernières
  - Gouvernance, démonstration de la preuve et expertise, transmission de la connaissance sur le long terme...

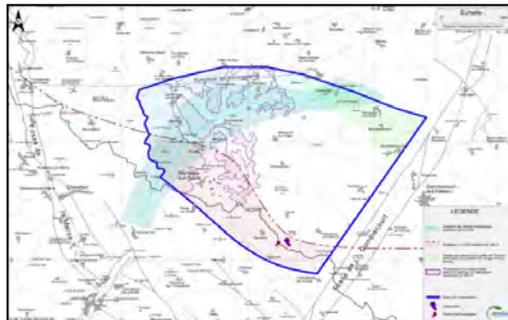
- ◆ Une R&D sur les colis étendue de manière détaillée à l'ensemble des familles de déchets HA et MAVL
- ◆ Une R&D sur l'évolution phénoménologique du stockage
  - plus intégratrice
    - Une vision de plus en plus objet/composant
  - avec un focus particulier sur la période d'exploitation
- ◆ La « montée en puissance » des essais technologiques
- ◆ La « montée en puissance » de la R&D sur la simulation numérique
- ◆ Le développement de la R&D sur le monitoring et le traitement des données en support à l'observation/surveillance
- ◆ Le développement de la R&D sur l'environnement
  - La création d'un Observatoire Pérenne de l'Environnement puis d'une Ecothèque
- ◆ Le développement de la R&D sur les SHS



2005 - 2006

Définition Zone de Transposition

250 km<sup>2</sup>



2007 - 2009

Reconnaissance homogène de la Zone de transposition



2010 - 2015

Choix de la ZIRA  
40 km<sup>2</sup>

### Troisième phase : 2007-2008

- ◆ 150 km de campagne sismique 2D
- ◆ 14 forages profonds carottés (dont un forage profond de 1700 m de profondeur)

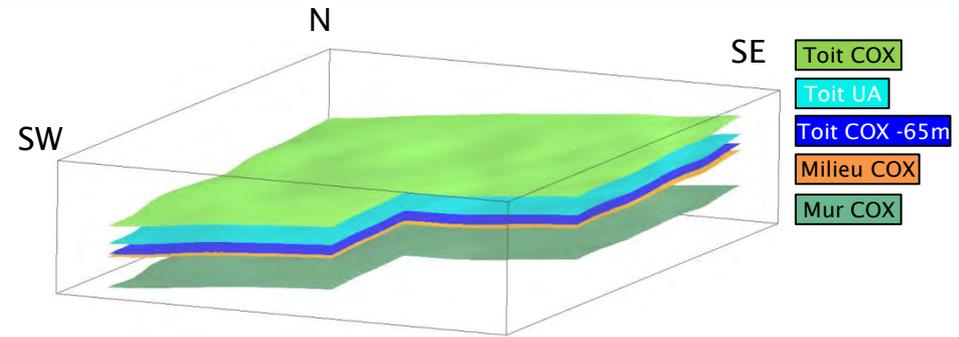
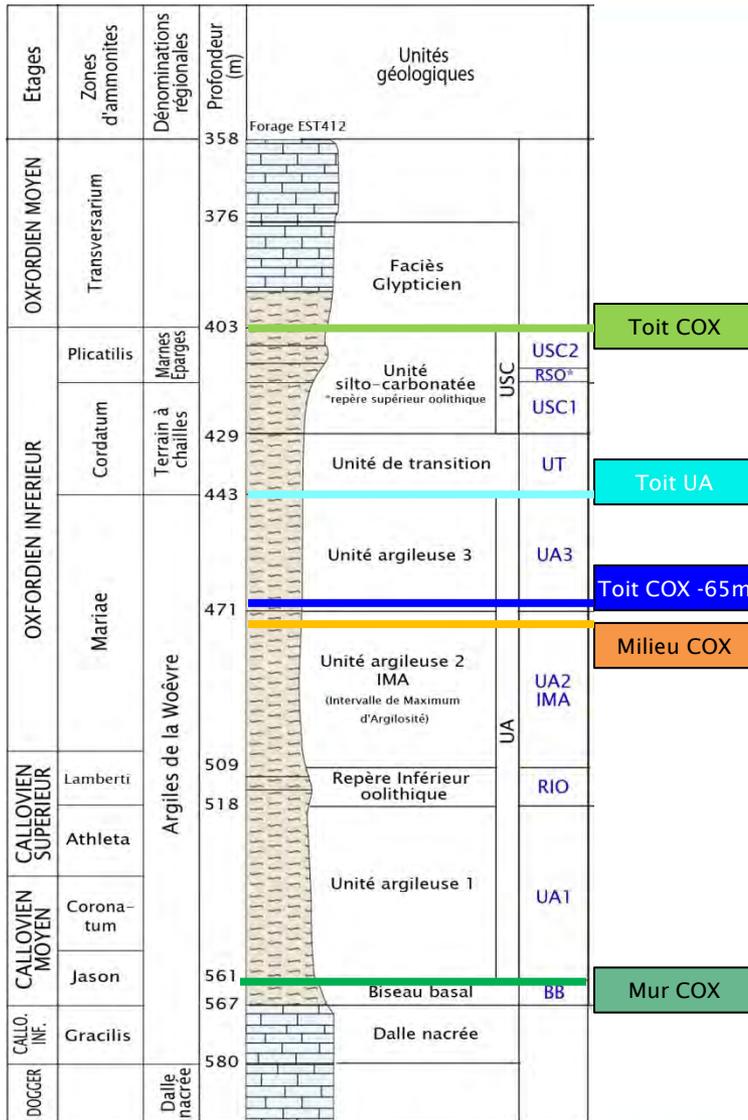
- Sélection d'une zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondies (Zira)
  - Profondeur du niveau d'implantation possible du stockage dans le Cox < 600m
  - Épaisseur du Cox > 130 m
  - ...

### Quatrième phase : 2009 -2010

- ◆ Campagne sismique 3D de 40 km<sup>2</sup> sur la Zira

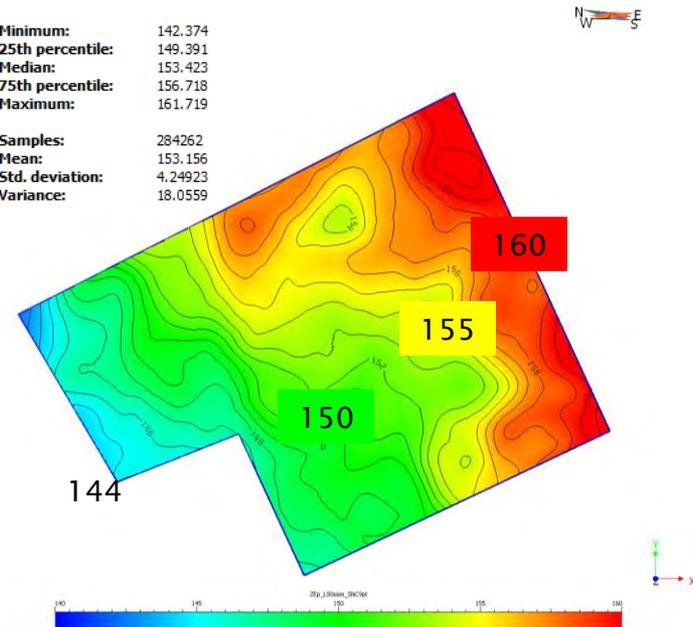
# La R&D sur le milieu géologique 2007-2010

## La consolidation du modèle géométrique COx sur la Zira

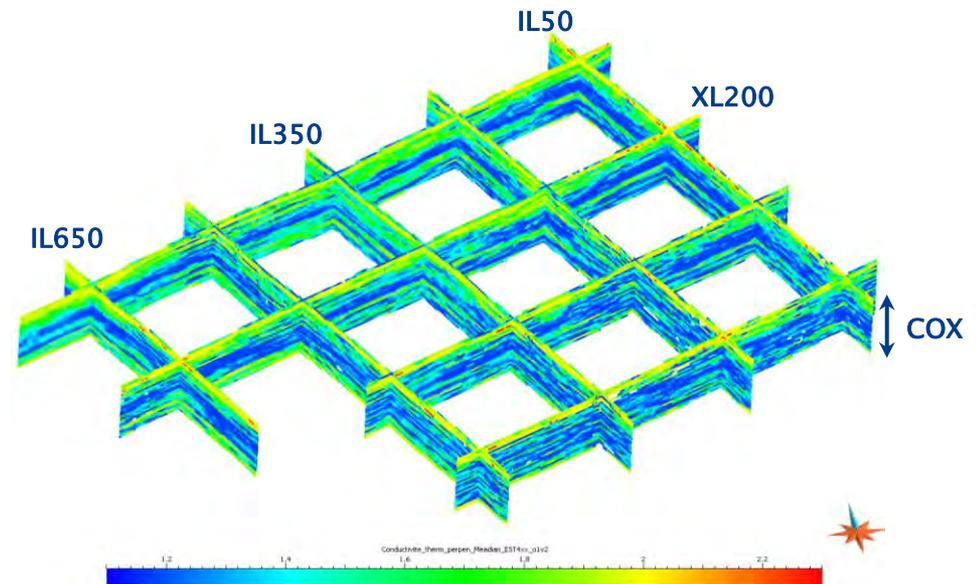
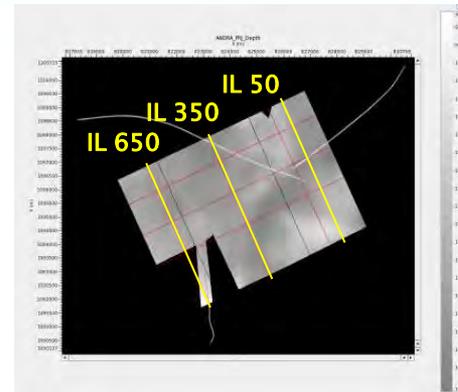
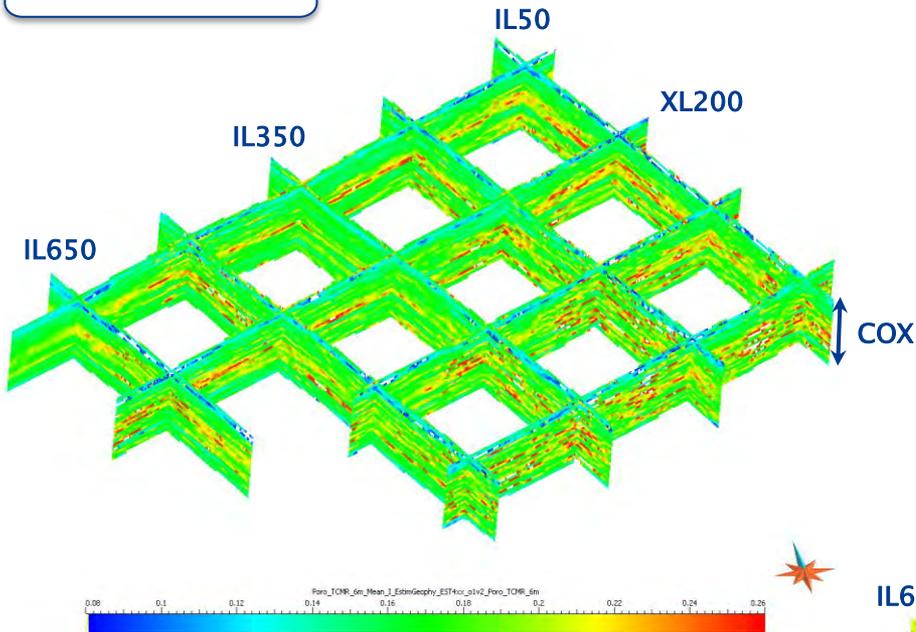


**Minimum:** 142.374  
**25th percentile:** 149.391  
**Median:** 153.423  
**75th percentile:** 156.718  
**Maximum:** 161.719

**Samples:** 284262  
**Mean:** 153.156  
**Std. deviation:** 4.24923  
**Variance:** 18.0559



Maille 6 m



### Une consolidation du modèle hydrogéologique à l'Actuel

- ◆ Nouvelles données géologiques, géométriques, pétrophysiques et hydrodispersives issues du programme de reconnaissance depuis la surface (FZT, ...)
  - Intégration fine de la série grise
  - Intégration des failles régionales sur l'ensemble du bassin de Paris y compris le secteur de Meuse/Haute-Marne
- ◆ Conditions aux limites intégrant une méthode mettant en relation le potentiel des aquifères avec la recharge efficace



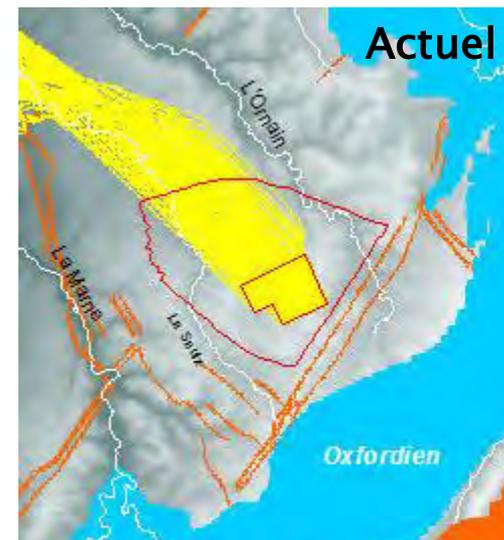
- 100% trajectoires → régionales NO
- Pas d'exutoires naturels

### Une amélioration du modèle hydrogéologique sur le prochain million d'années

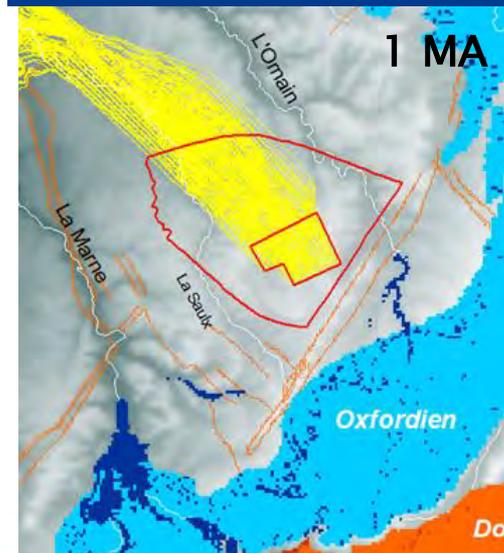
- ◆ Une vision continue par pas de 1000 ans
- ◆ Des vitesses d'érosion non-stationnaires et non-linéaires résultant de modèles numériques
- ◆ Un modèle de surrection tectonique plus réaliste, calé sur des données isotopiques de datation des terrasses
- ◆ Une évolution de la recharge, avec mise en place et retrait du pergélisol



- 100% trajectoires → régionales NO
- Pas de mise à l'affleurement de l'Oxfordien sur le prochain MA
- Trajectoires et temps de transfert identiques à ceux à l'actuel
- Pas d'exutoires naturels



Écoulements dans l'Oxfordien



### Meilleure représentation de la zone endommagée

- ◆ Formation
  - ◆ Géométrie, distribution et caractéristiques HM-Gaz de la fracturation
  - ◆ Propriétés HM à moyen et long terme : fluage, gonflement, consolidation...
  - ◆ Comportement au cisaillement
  - ◆ Auto-colmatage et transfert des gaz
- Vs les différents ouvrages souterrains (et leur orientation) et les méthodes de creusement et de soutènement

### Meilleure représentation des couplages THM -gaz des argilites en grand

- ◆ État d'équilibre mécanique en grand de la couche du Callovo-Oxfordien
- ◆ Critère de rupture

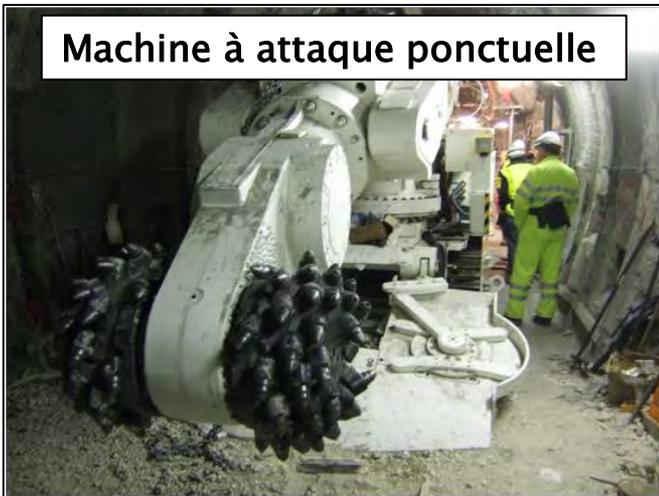
### Caractérisation du comportement THM-gaz des interfaces avec les matériaux / composants du stockage

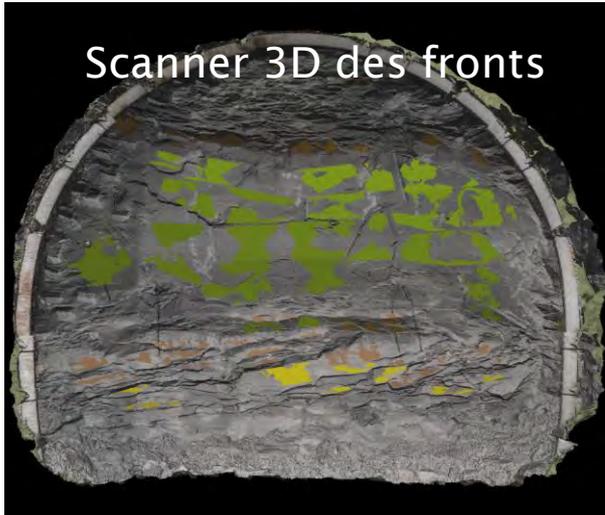
Brise roche hydraulique



Machine à attaque ponctuelle sous jupe

Machine à attaque ponctuelle

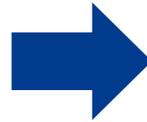




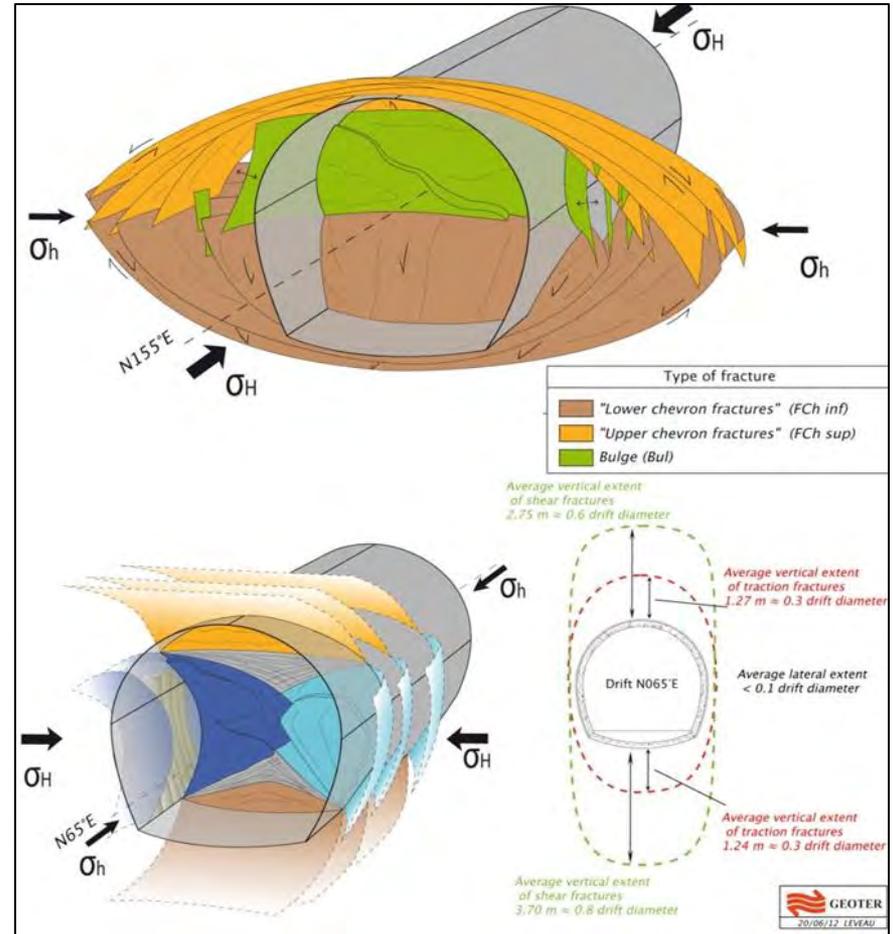
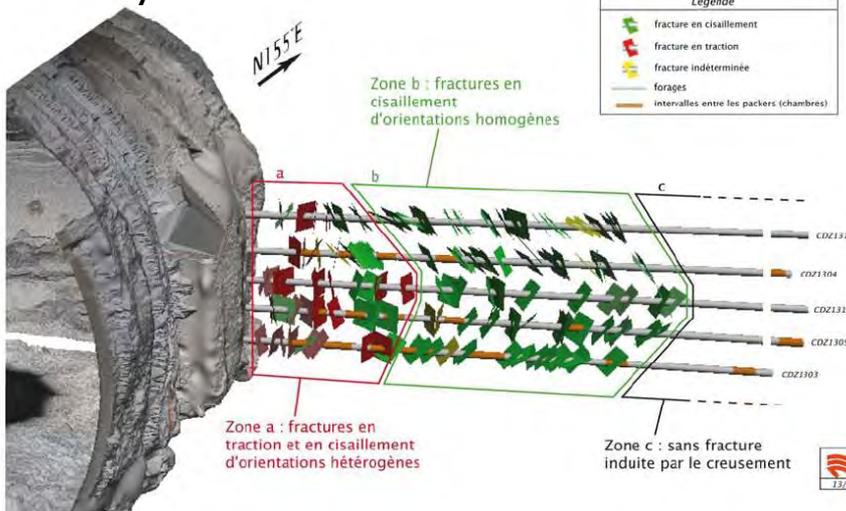
Scanner 3D des fronts

Une structure similaire quelque soient les ouvrages et les méthode de creusement testées

◆ Ex. des galeries

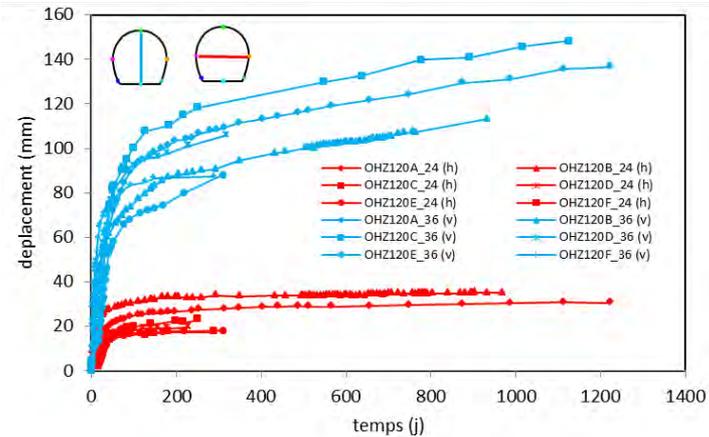
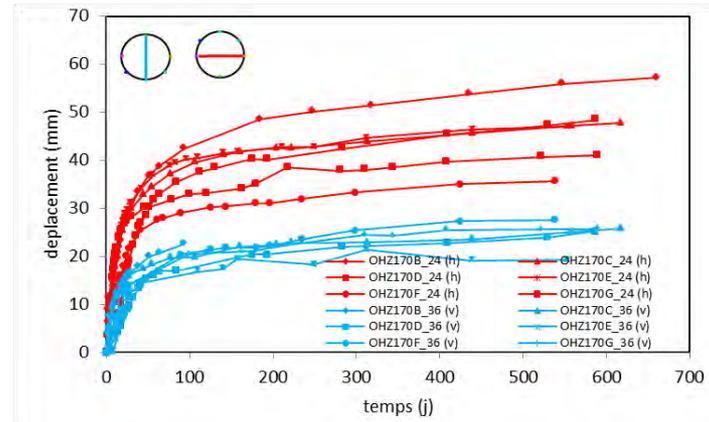
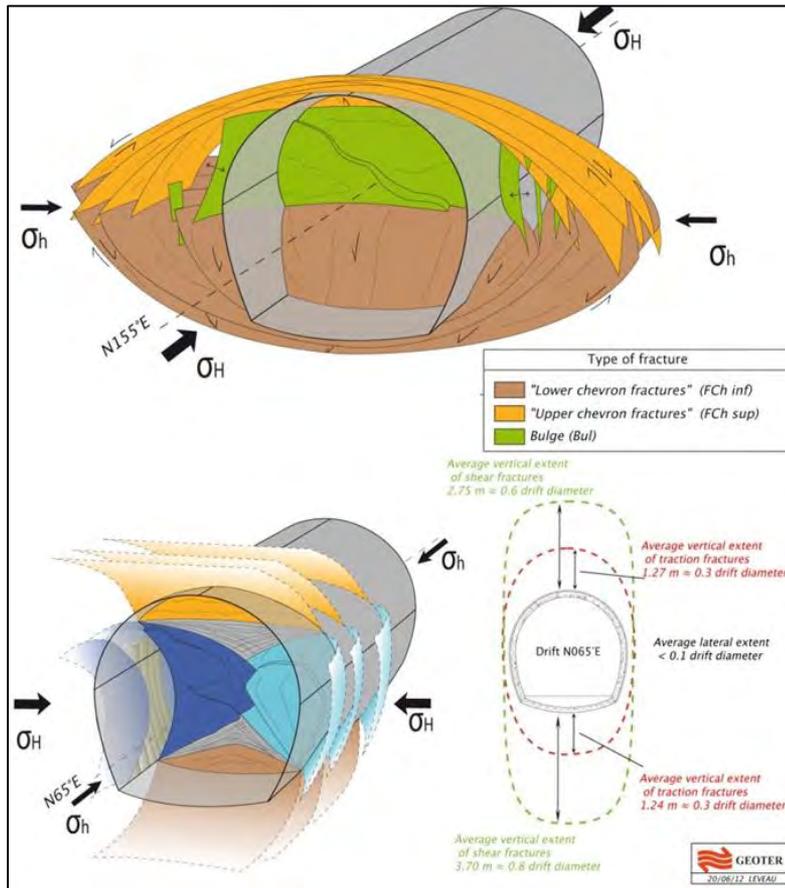


### Analyse structurale des carottes



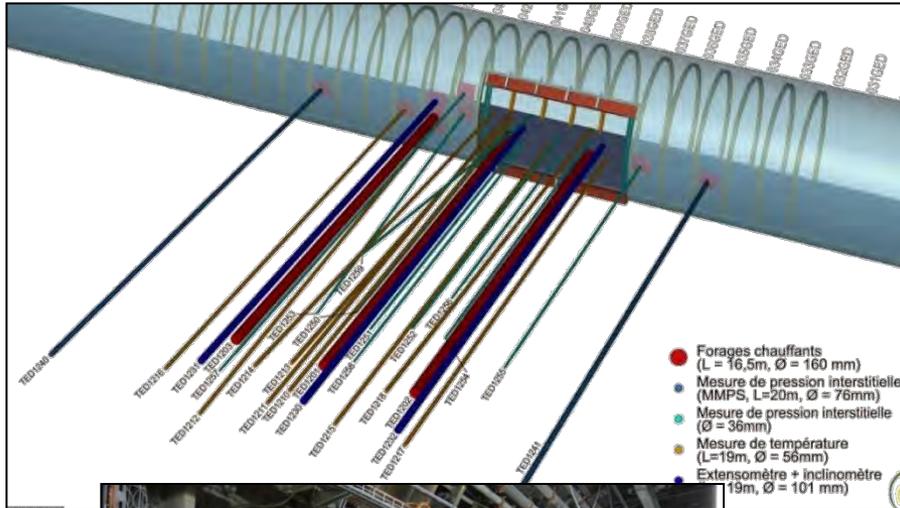
Des cinétiques et une localisation des déformations au niveau des fractures similaires quels que soient les ouvrages et les méthodes de creusement testées

◆ Ex. des galeries



## ◆ Expérimentation TED (3 zones chauffantes)

- caractérisation du comportement THM



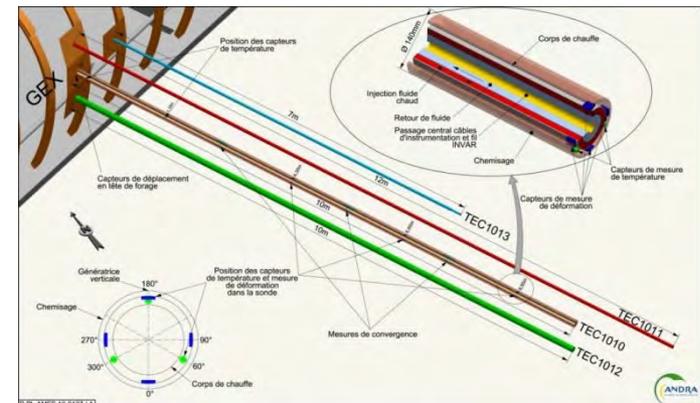
## ◆ Expérimentation ALC

- Comportement de la zone endommagée

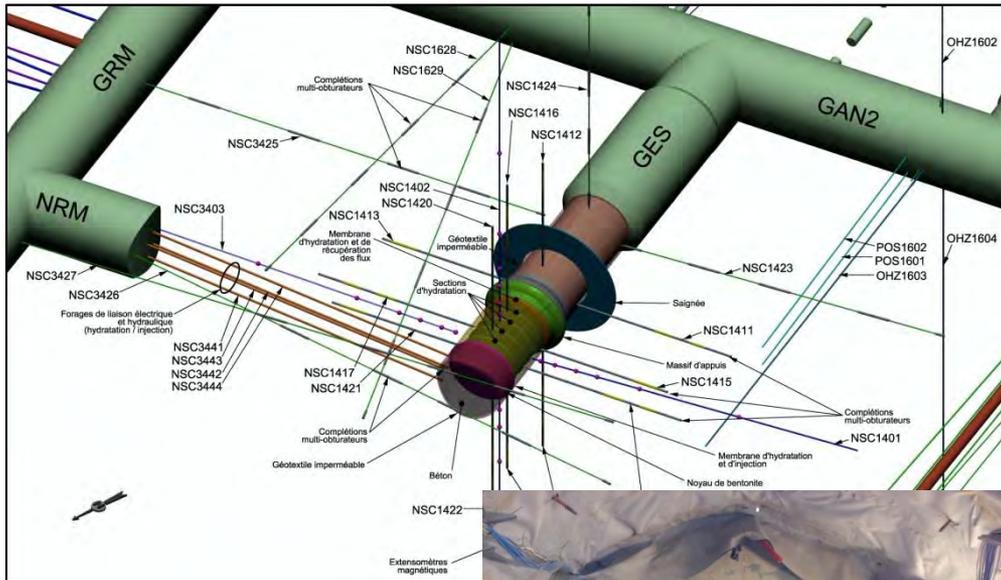


## ◆ Expérimentation TEC

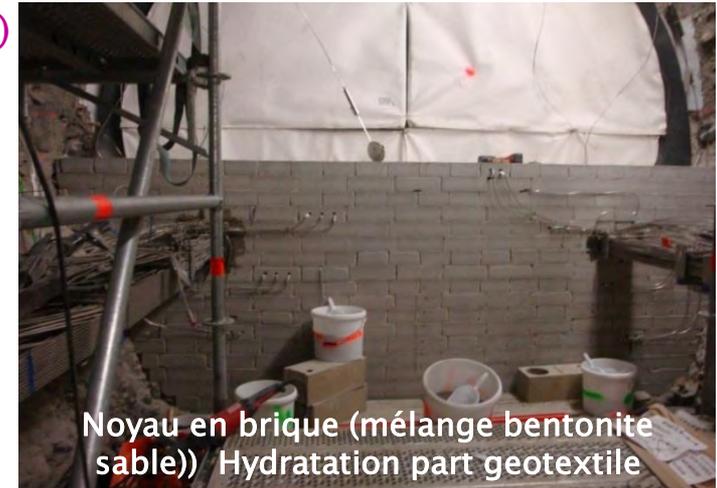
- Comportement d'un chemisage dans un forage sous chargement thermique



- ◆ Evaluer la performance hydraulique du scellement, mais aussi de l'interface et de la zone endommagée en champ proche
- ◆ Suivre la phase de restauration (hydratation artificielle)

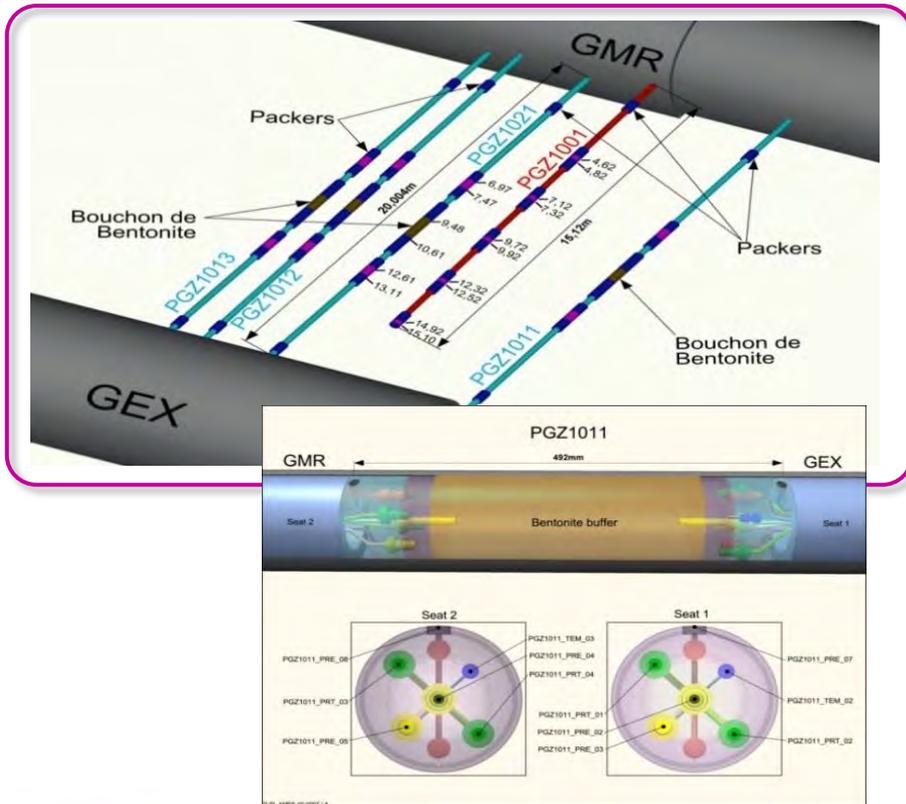


Zone en bout de galerie  
Aucun câble/tubing ne traversant l'ensemble du scellement

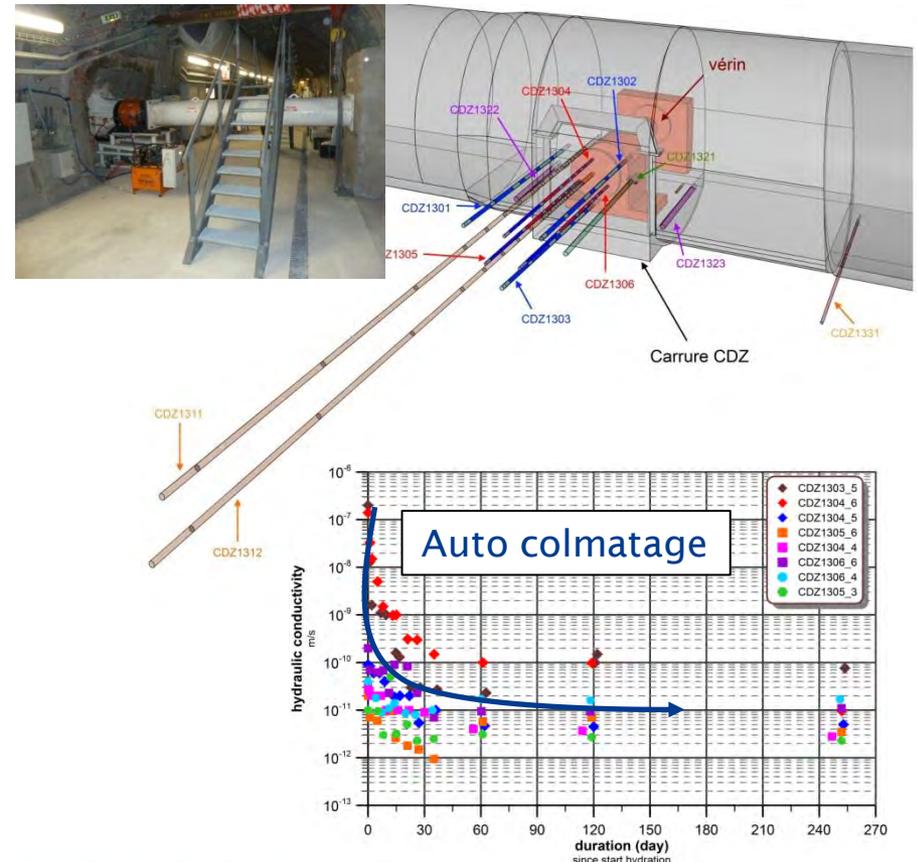


### ◆ Essai gaz à échelle réduite

- Évaluation des poids relatifs de l'arrivée d'eau et de l'arrivée de gaz
- Évaluation de la migration de gaz autour d'un scellement



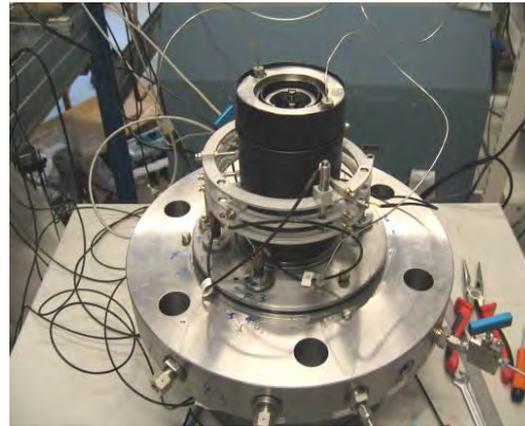
### ◆ Comportement de la zone fracturée lors de son imbibition et sous l'effet de la pression (EDZ autour d'un scellement)



*Biaxial roche*



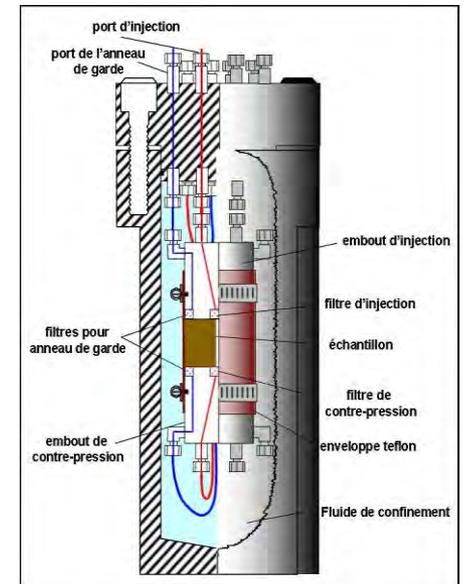
*Cylindre creux*



*Essai mécanique sous microscope*



*Perméamètre*



- Réalisation d'essais intégrés en laboratoire souterrain, en conditions représentatives de celles des ouvrages de stockage

## Matériaux cimentaires

- Développement important de la R&D sur les bétons bas pH pour les scellements
- ◆ Comportement THMC des bétons classiques et des bétons bas pH depuis leur hydratation jusqu'au long terme
- ◆ Couplage évolution mécanique des composants en bétons (bétons classiques et bas pH) vs évolution chimique
  - Évolution chimique du béton
  - Corrosion des composants métalliques
- ◆ Réactivité chimique aux interfaces ciments/argile, notamment pour les bétons bas pH

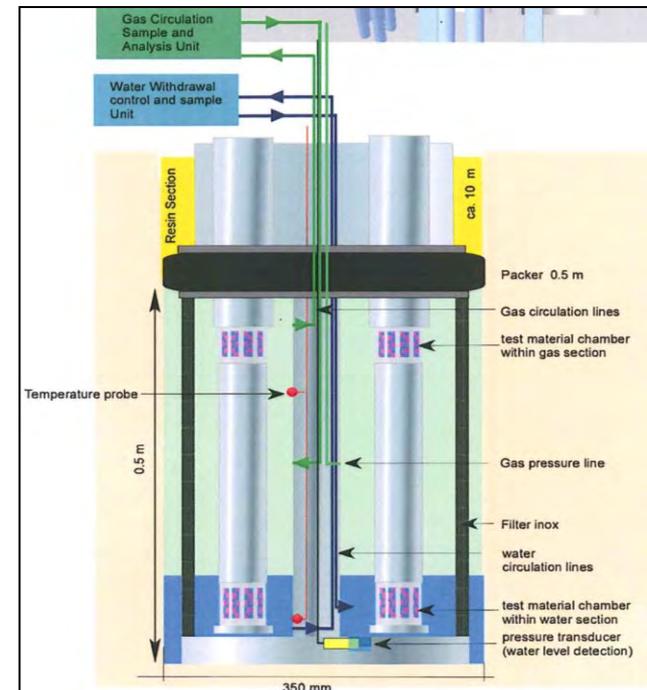
## Matériaux métalliques

- Choix d'aciers ductiles à haute résistance élastique et peu/non sensibles à la corrosion sous contraintes (CSC)
- ◆ Cinétiques de corrosion généralisée (soudure incluse)
- ◆ Risques de corrosion particuliers (CSC, H<sub>2</sub>)



◆ Différents échantillons en acier (intacts, oxydés...) en conditions anoxiques à 80°C.

- Mesure régulière des taux de corrosion.
- Mesure de l'évolution de la composition chimique des produits de corrosion



### ◆ Matériaux cimentaires

- Validation d'un **modèle d'hydratation** pour les ciments simples et mélangés
- Validation d'un **modèle de comportement THM à long terme** intégrant les couplages avec le fluage et l'endommagement
- Détermination des **cinétiques de corrosion des aciers** dans les bétons classiques en fonction des conditions (saturation en eau, température...)

### ◆ Matériaux métalliques

- Confirmation de **faibles vitesses de corrosion** en milieu argileux
- Observation d'un **transitoire oxydant/acide** conduisant à des **cinétiques élevées**
- Caractérisation des **produits de corrosion** formés aux différentes étapes de corrosion
- Observation d'**amorçage de fissures** sur des nuances d'acier non optimisées ⇒ définition de spécifications de nuances d'acier à utiliser
- Modélisation des **processus de corrosion généralisée et localisée** - couplage avec des codes de géochimie
- Premiers éléments de connaissances sur l'**influence des rayonnements** (faibles doses / milieu anoxique)
  - **Influence non significative en deçà d'environ 10 Gy/h**

- ◆ Prendre en compte de manière détaillée l'ensemble des familles et sous-familles de déchets
  - Focus sur les déchets HA0 et les déchets MAVL de part leur diversité
  
- ◆ Rendre compte de manière plus détaillée des différentes phase de vie / conditions d'environnement dans le stockage, notamment durant la période d'exploitation
  - Consolider les modèles de comportement des déchets majeurs traités dans le Dossier 2005 (Verres, Boues bitumées, CSD-C)
  - Evaluer précisément la production de gaz par radiolyse et relâchement des produits de dégradation hydrosolubles par les déchets organiques MAVL
  
- ◆ Accompagner le développement de nouveaux conditionnement ou traitement des déchets
  - Déchets organiques alpha, Déchets graphite, Déchets contenant Al et Mg
  
- ◆ Développer les modèles de comportement de déchets particuliers pris en compte
  - Déchets d'ITER, Déchets vitrifiés de Superphénix, Déchets de traitement des combustibles civils et militaires du CEA, Déchets de démantèlement...
  
- ◆ Anticiper et répondre aux évolutions envisageables de la politique énergétique française
  - Interaction combustibles usés / produits de corrosion / argilite, IRF des MOx

### ◆ Acquisition des rendements radiolytiques

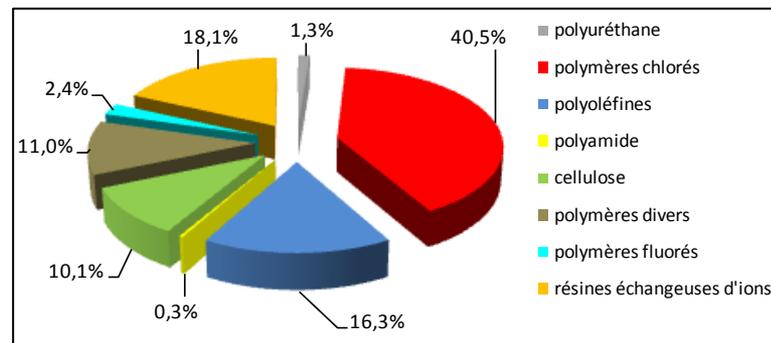
- $G_\alpha$  et  $G_\gamma$
- 15 polymères différents : PE, PUR, PMMA, PVC, Viton, Cellulose, REI...
- Polymères modèles et industriels
- Plusieurs gaz :  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $HCl$ ,  $HCN$ ,  $HF$
- Sous air ou sous He
- Effet de la dose, de l'humidité relative et de la température



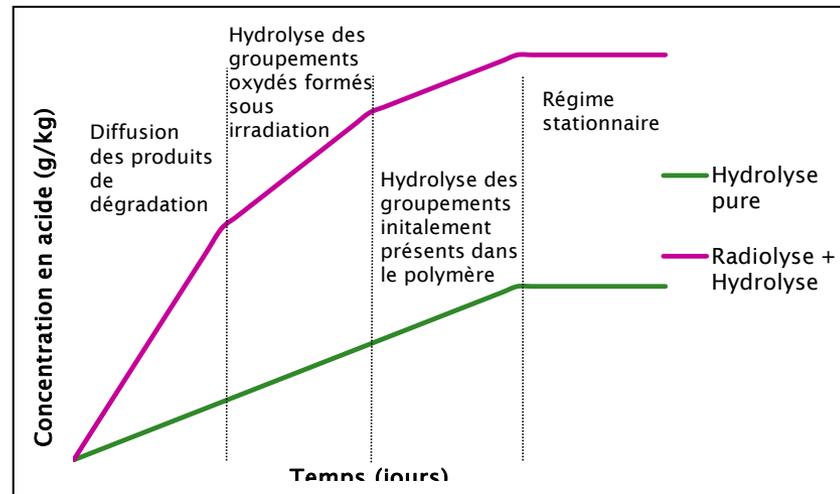
PVC pur PVC Plastunion EPR pur EPR joint PUR Mapa PUR Estane

### ◆ Influence sur le relâchement des espèces hydrosolubles

- Nature de l'irradiation (gamma, ions lourds)
- TEL (pouvoir d'arrêt)
- Dose
- Solution de lixiviation
- Formulation



40 000 colis soit 16,9 % des colis MAVL (MID2009)



Evolution schématique de la concentration des PDH avec et sans irradiation

## Spéciation/solubilité

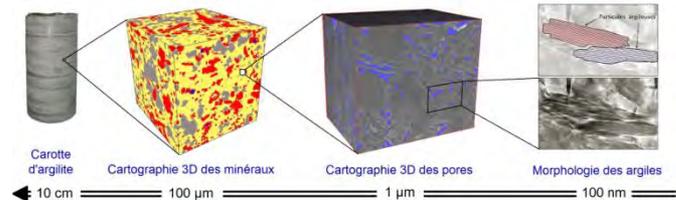
- ◆ Poursuite du développement de la Base de données Thermochimie (TDB)
  - Spéciation/solubilité de RN/Tc en conditions de stockage
  - Cinétiques



[www.thermochimie-tdb.com](http://www.thermochimie-tdb.com)

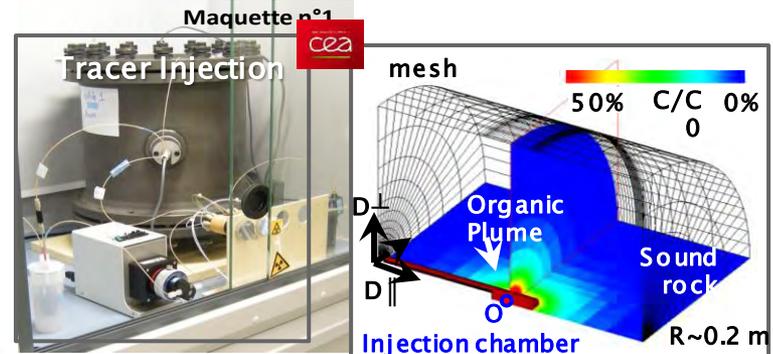
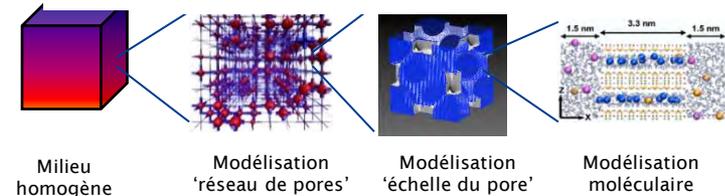
## Chimie de l'eau

- ◆ Développement détaillé de modèles de chimie de l'eau du COx perturbée
  - Température
  - Oxydation



## Rétention et diffusion

- ◆ Caractérisation dans le COx en conditions perturbées (Salines, molécules Organiques, température)
- ◆ Consolidation des données et mécanismes dans argilites et bétons
  - Interprétation des essais in-situ DIR
  - Caractérisation « petites échelles » de la structure des argilites



- ◆◆ Méthodes de creusement et de construction des ouvrages souterrains
  - Galeries – Alvéoles MAVL
  - Alvéoles HA
  
- ◆◆ Faisabilité technologique des scellements
  - Galeries – Alvéoles MAVL
  
- ◆◆ Développement des conteneurs de stockage
  - Conteneur en béton pour les colis primaires MAVL
  - Sur-conteneur en acier pour les colis primaires HA
  
- ◆◆ Faisabilité technologique de la récupérabilité des colis

Les principaux types de soutènements mis en œuvre au Laboratoire souterrain, autres que « miniers »



*Revêtement souple*

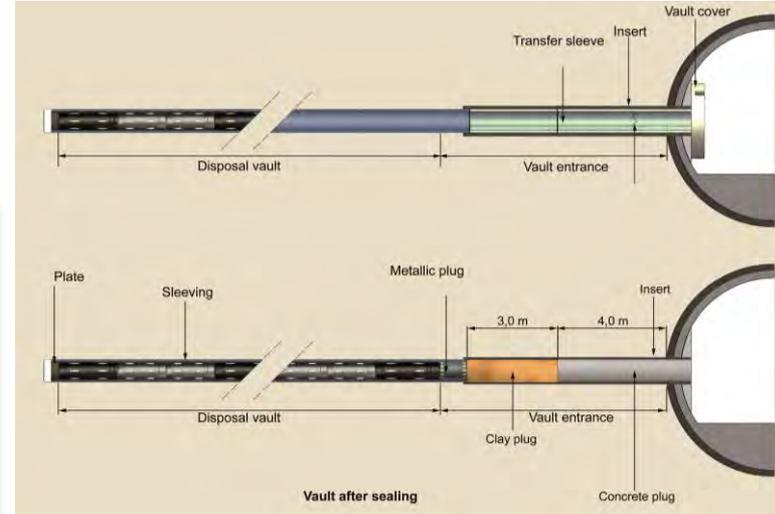
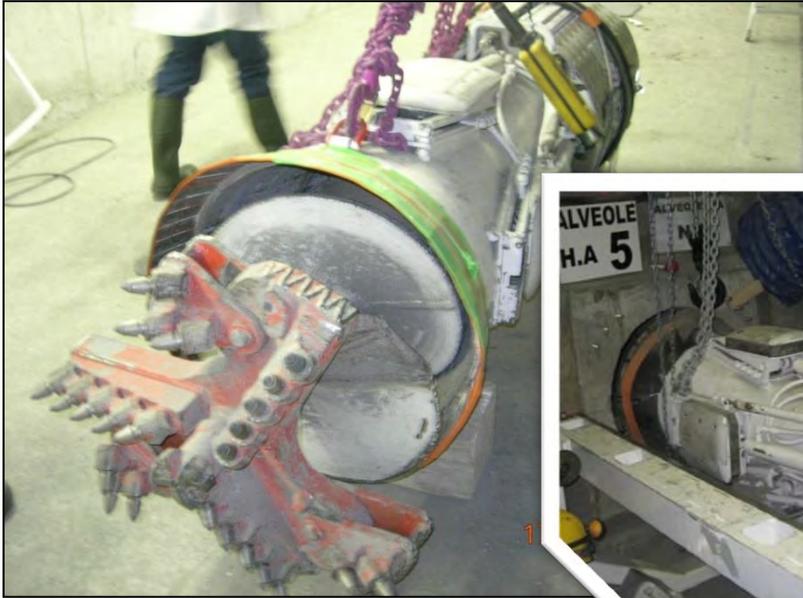
*Béton projeté épais*

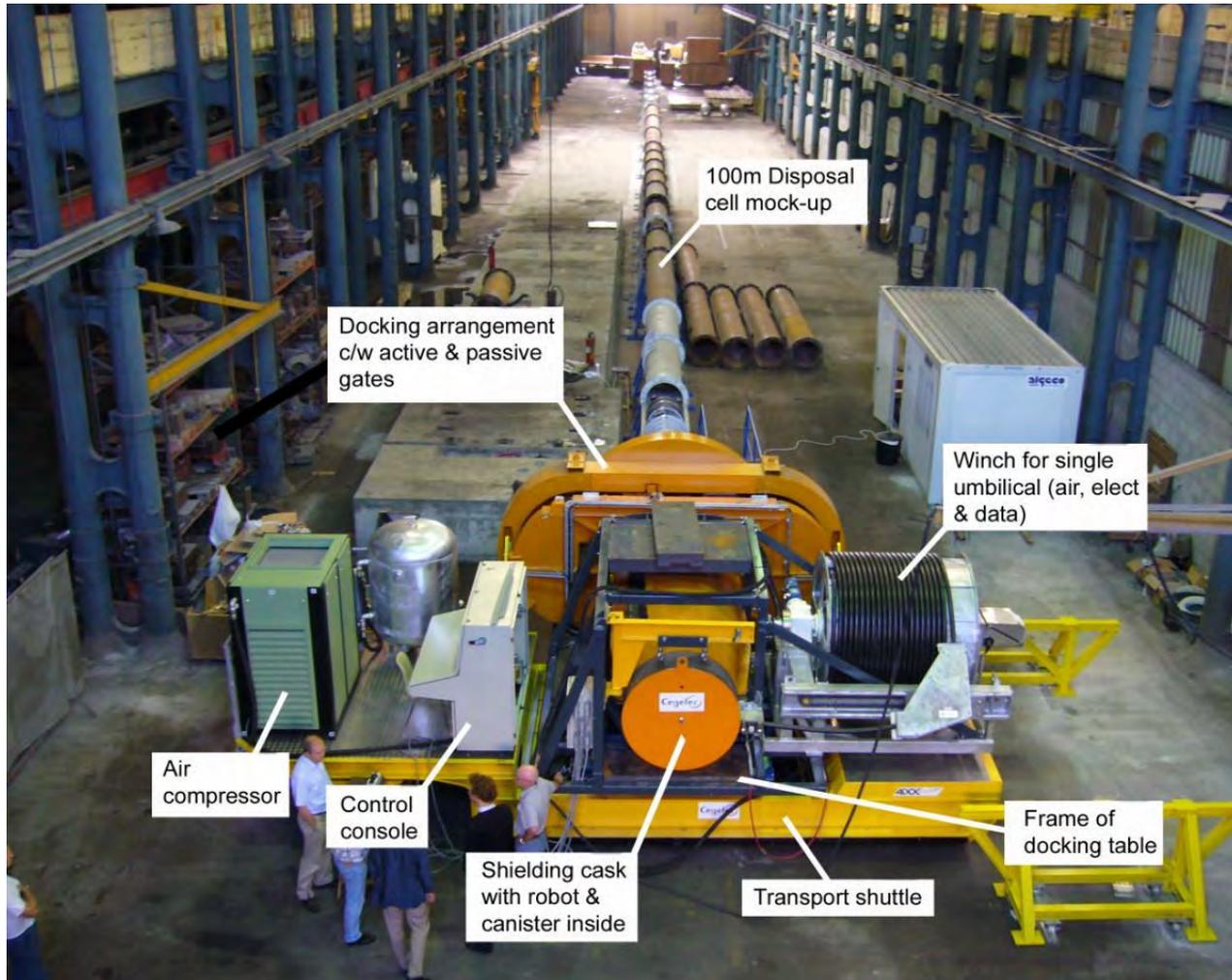
*Tunnelier attaque ponctuelle*



Technologies réutilisables pour Cigéo







Fabrication des composants (viroles, couvercles et fonds) de conteneur en acier forgé ou percé-étiré (100 & 65 mm d'épaisseur) :

- ◆ Propreté inclusionnaire conforme,
- ◆ Structure métallurgique conforme,
- ◆ Propriétés mécaniques et chimiques conformes.

Soudage par FE circulaire continu, pleine épaisseur et étanche, avec détensionnement local, suivant CODAP :

- ◆ Propriétés mécaniques et chimiques du cordon de soudure conforme,
- ◆ Santé du cordon et de la ZAT contrôlé par US multiéléments conforme,
- ◆ Vérification des contraintes résiduelles après détensionnement (en cours).

Les résultats consolident la faisabilité des colis de stockage et montrent que la fabrication est fiable et reproductible

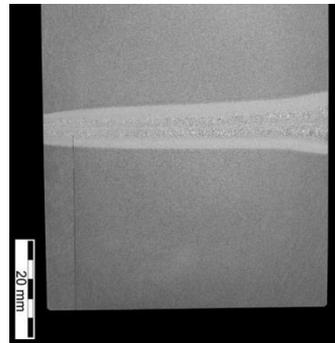


*Viroles forgées usinées*

*Soudage FE*



*Soudure ép. 55 mm*



*Cordon soudure*



### ◆ Détensionnement thermique local

- Par induction de la zone soudée suivant CODAP pour réduire les contraintes résiduelles internes

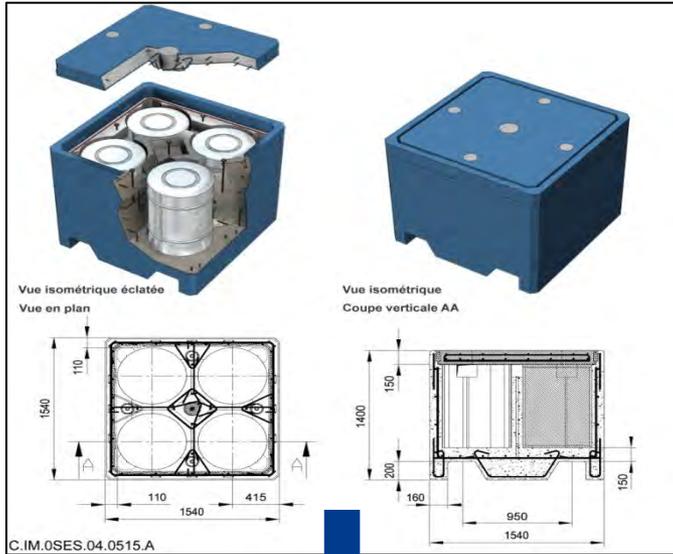


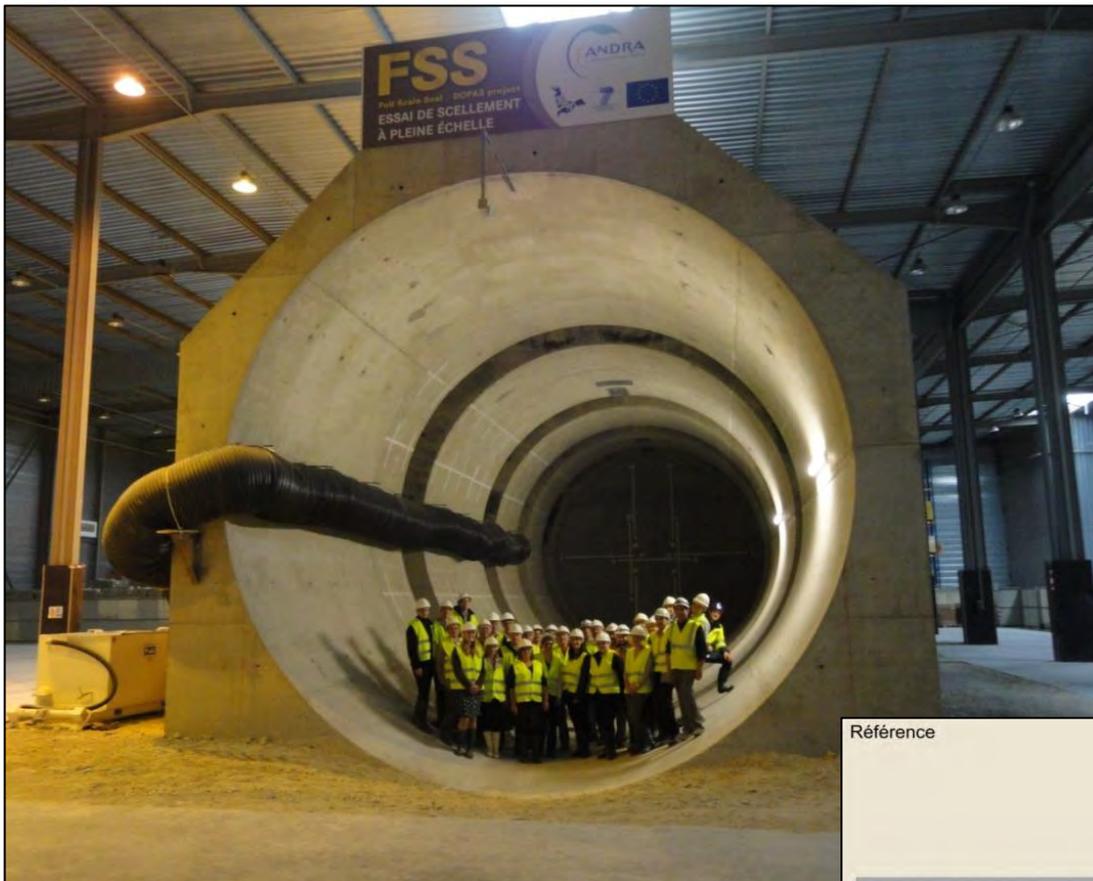
### ◆ Contrôle US de la soudure circulaire suivant CODAP.



### ◆ Mesure des contraintes résiduelles dans la zone détensionnée



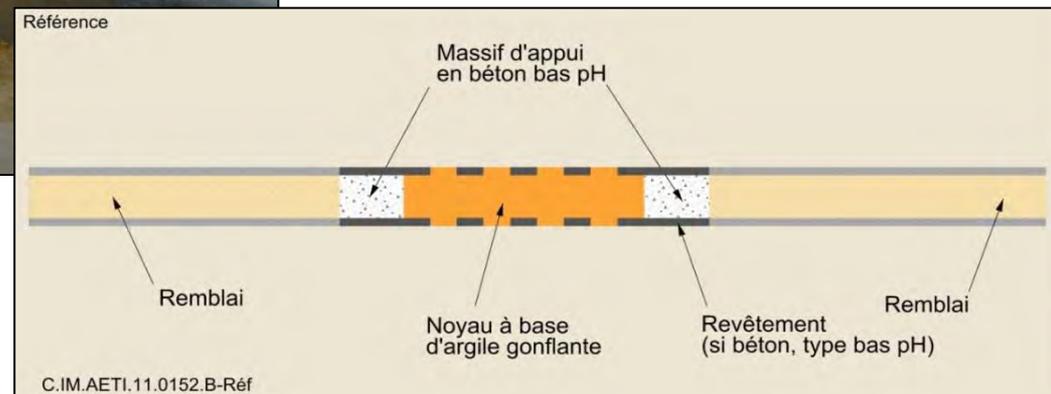




## L'essai FSS mené en surface

◆ Projet Européen DOPAS sur les scellements

Schéma de principe du concept de scellement de galerie testé



### ◆ La simulation des processus physiques

- Implémentation de modèles de comportement et de couplages multi-physiques
  - Corrosion
  - Ventilation et milieu poreux (vs Risque Atex, ...)
  - Écoulements multi-composants gaz et mécanique en approche double milieu
  - Transport réactif et hydraulique insaturée multi-composants gaz...

### ◆ Les méthodes de résolution numériques, sur les 3 thématiques (i) « hydraulique et transport en milieu poreux saturé (ii) écoulements et transferts diphasiques multi-composants gaz (iii) transport réactif

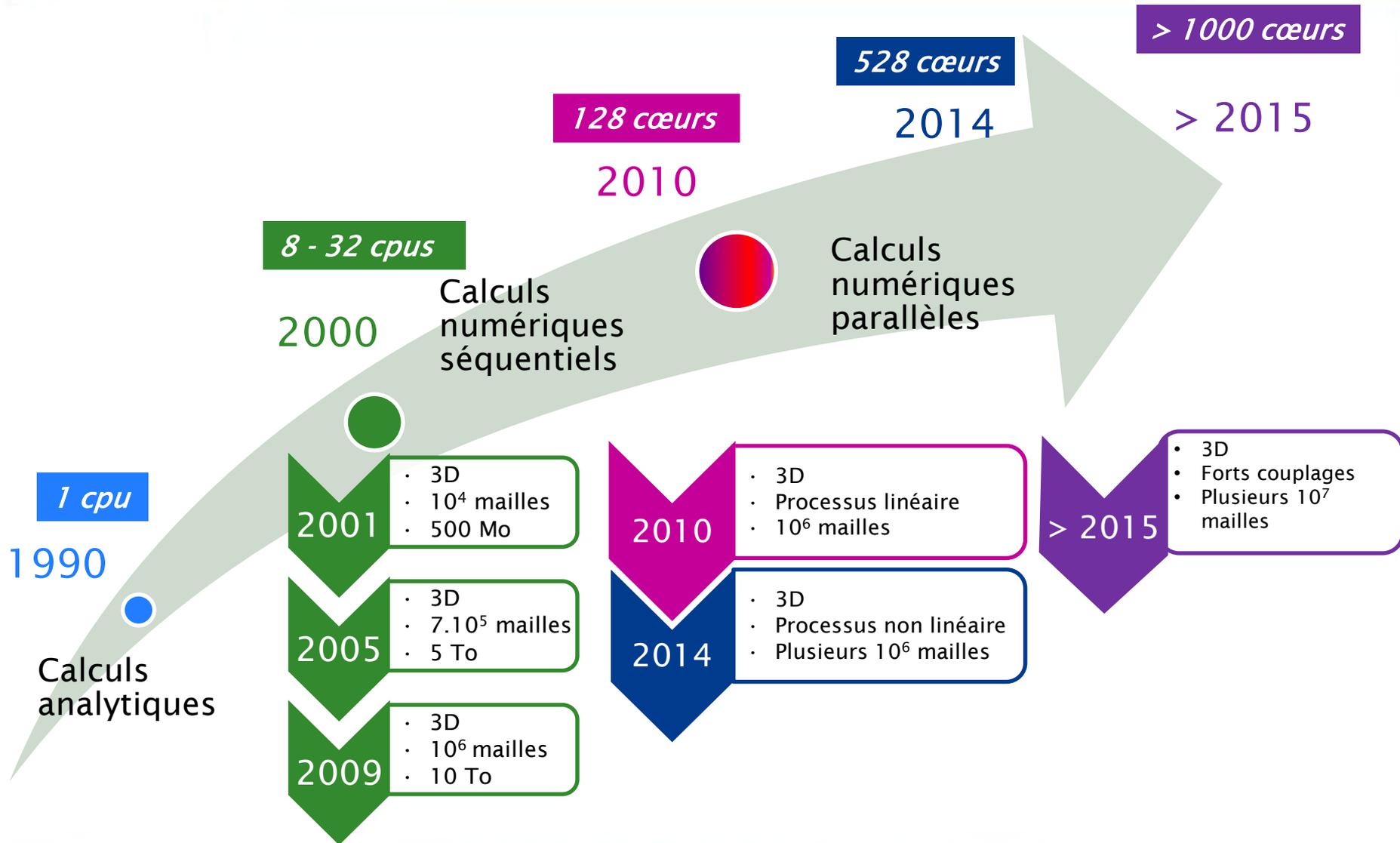
- Capacités de calculs « haute performance »
  - Parallélisme des solveurs et calcul intensif
  - Méthodes de décomposition de domaine espace/temps
- Algorithmes de résolution robustes et précis
  - Solveurs/préconditionneurs de matrice performants (sur maillage déformé, ...)
  - Contrôle d'erreur (estimateurs a posteriori)
- Algorithmes de maillage performants (adaptatifs, hybrides)

### ◆ Les méthodes d'analyse

- Analyse d'incertitudes et de sensibilité
  - Méthodes intrusives / non intrusives
  - Méthodes locales (gradients) versus globales (probabilistes)
- Assimilation de données et outils d'aide à la décision

# La R&D en simulation numérique > 2006...

## Une « montée en puissance » accrue à partir de 2010



### ◆ Des moyens matériels adaptés

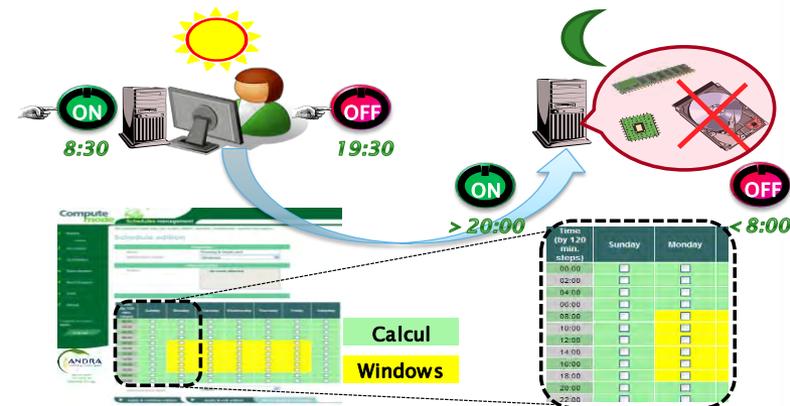
- Taille des simulations (plusieurs millions d'éléments)
- Physique traitée (fortes non-linéarités)
- Parallélisme et Calcul Haute Performance (nœuds/processeurs/cœurs)
- Etudes de sensibilité multiparamétriques

### ◆ Un moyen de référence : clusters de calcul Linux

- Puissance disponible en 2014 : possibilité de mener **650 calculs en simultané**
- Puissance envisagée post-2015 : > 1000 à 1500 cœurs (+ CPU/GPU)

### ◆ Des moyens spécifiques

- Grille de calcul, basée sur la ressource bureautique de l'Agence
- Accès aux centres de calcul intensifs nationaux (GENCI)

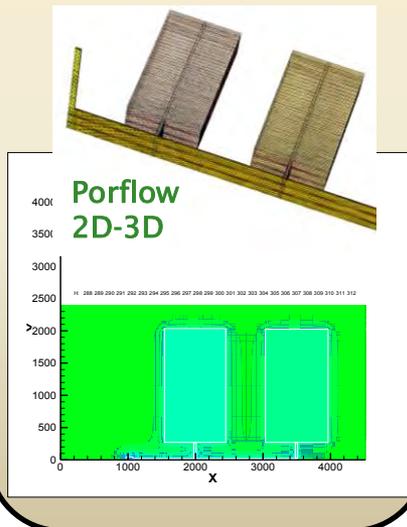


# La R&D en simulation numérique > 2006... Le transfert de solutés dans le stockage Cigéo

- ◆ D'une représentation simplifiée et partielle du stockage en 2005 à une représentation détaillée et complète des composants ouvrages (EDZ incluse) du stockage et de son environnement

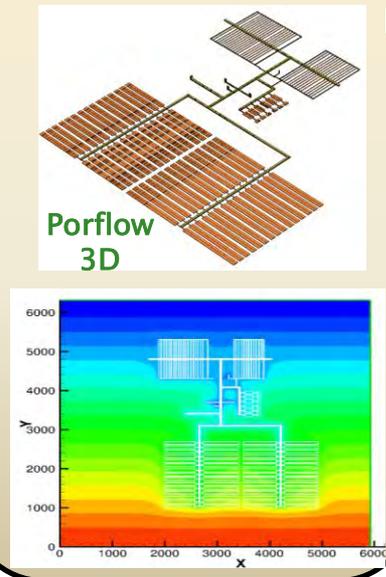
**2001-2005**  
*(dossier 2005)*

Représentation NUMERIQUE simplifiée d'une seule partie du stockage (zone HA) + COX  
maillage de **600.000 éléments**  
Temps CPU = 5 jours



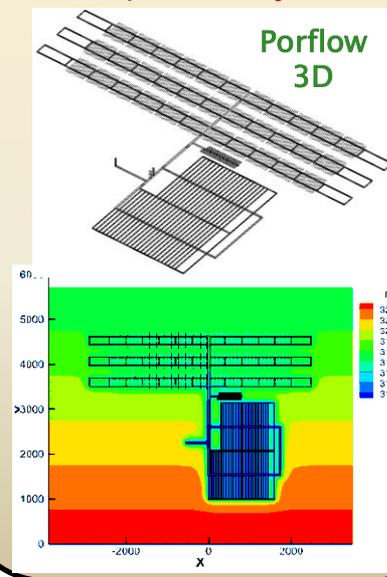
**2009**  
*(choix ZIRA)*

Représentation NUMERIQUE simplifiée de tout le stockage (modules/puits/galeries) + COX  
maillage de **8.000.000 éléments**  
Temps CPU = 5 jours



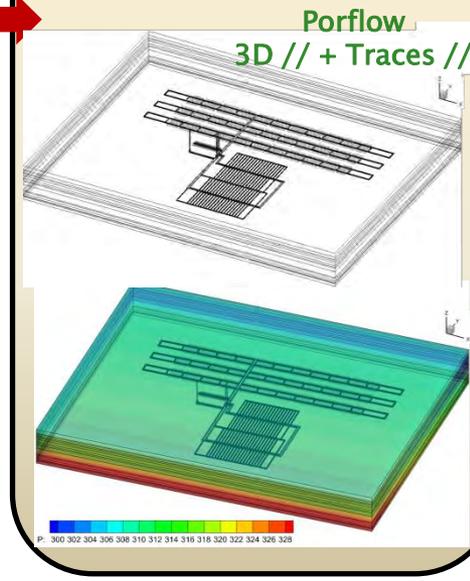
**2012**  
*(comparaison esquisses + DAC)*

Représentation NUMERIQUE détaillée de tout le stockage (alvéoles /puits/galeries) + COX  
maillage de **12.000.000 éléments**  
Temps CPU = 3 jours



**2015-2017**  
*(DOS + DAC)*

Représentation NUMERIQUE détaillée de tout le stockage (alvéoles + puits + galeries) + milieu géologique multi-couches  
maillage de **> 30.000.000 éléments**  
Temps CPU = 3 jours



- ◆ D'une représentation simplifiée et partielle du stockage en 2005 à une représentation détaillée et complète des composants ouvragés (EDZ incluse) en 2012

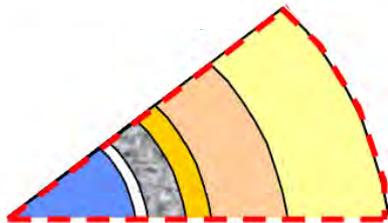
**2005**  
*(dossier 2005)*

Représentation simplifiée de chaque composant (alvéole, galerie, puits) + COX + gestion des enchainements

Maillage 1D/2D de  $10^2$  à  $10^3$  éléments  
Temps CPU = 5 jours

- Zone de stockage
- Vides résiduels
- Béton
- Zone fracturée
- Zone micro fissurée
- Cox sain

Alvéole MAVL 1D/2D



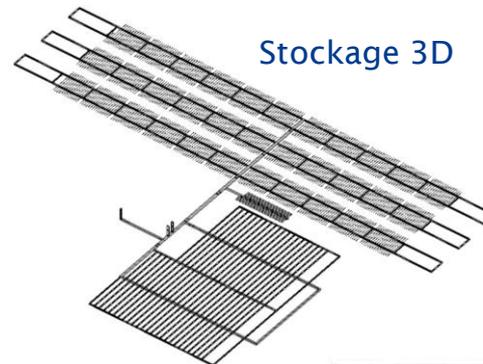
Tough2

Réalisation  
AF-Consult  
/Andra

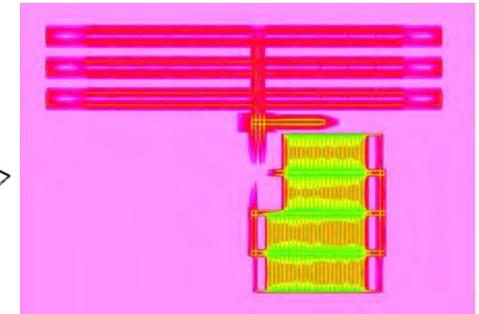
**2012-2015**

Représentation détaillée de tout le stockage (alvéoles + puits + galerie) + COX

Maillage 3D de 300.000 éléments (2012)  
> 1 million (2015-2017)  
Temps CPU = 15 jours



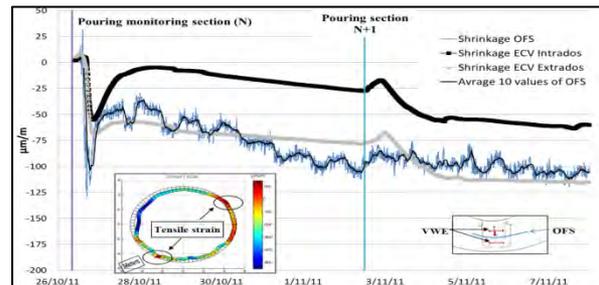
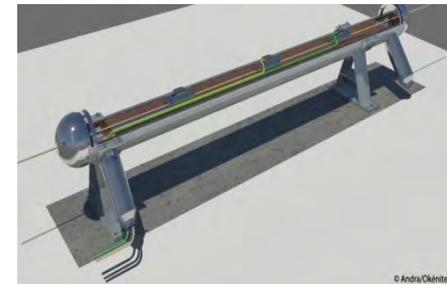
Stockage 3D



Cartographie de saturation en eau des ouvrages à 1000 ans

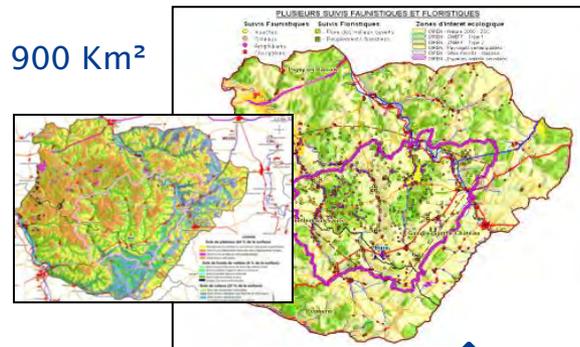
Tough2 //

- ◆ Outils d'auscultation « à demeure » (filaire)
  - ◆ Méthodes mobilisables et distantes (non destructives)
  - ◆ Transmission sans fil
- Les fibres optiques pour les mesures thermiques, mécanique et chimique/gaz
  - Les capteurs TDR pour la teneur en eau des milieux (poreux)

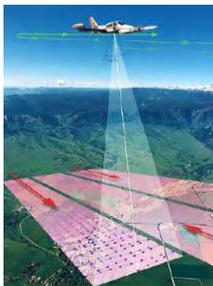


## Mise en place en 2010

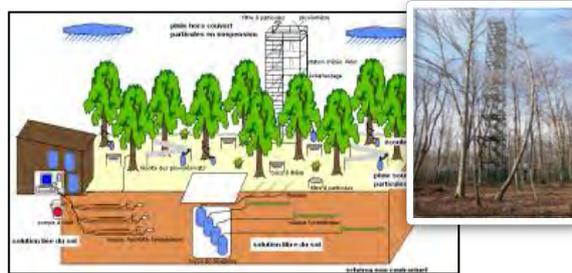
- ◆ Etre capable de suivre l'environnement des Cigéo et d'évaluer les éventuels effets entropiques de Cigéo sur la durée séculaire d'exploitation



Réseaux d'observations et de suivi des milieux et de la biodiversité



Téledétection satellitaire et aéroportée



Site expérimental forestier

Stations de suivi des eaux



Station atmosphérique



Ruches instrumentées

### ◆ Mobilisation de la recherche

- OSU OTELo (UdL), UTT
- 20 laboratoires issus du CNRS, INRA, IRSN, IRSTEA, LNE, MNHN, ONF

### ◆ Mise à disposition des données à la communauté scientifique

### ◆ Label national SOERE par l'alliance Allenvi

### ◆ Ouverture à la société

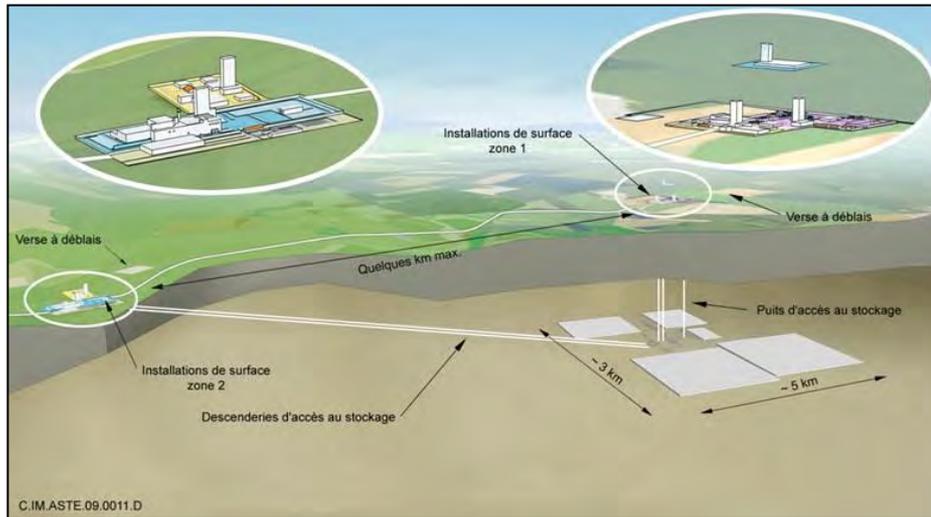
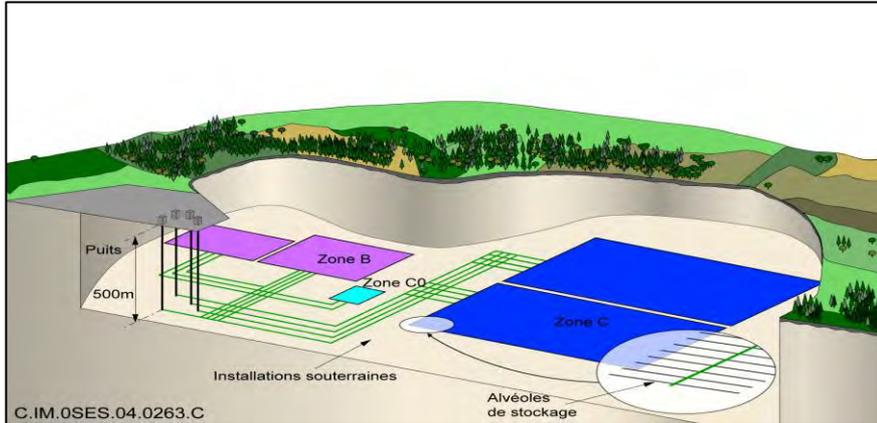


Ecothèque

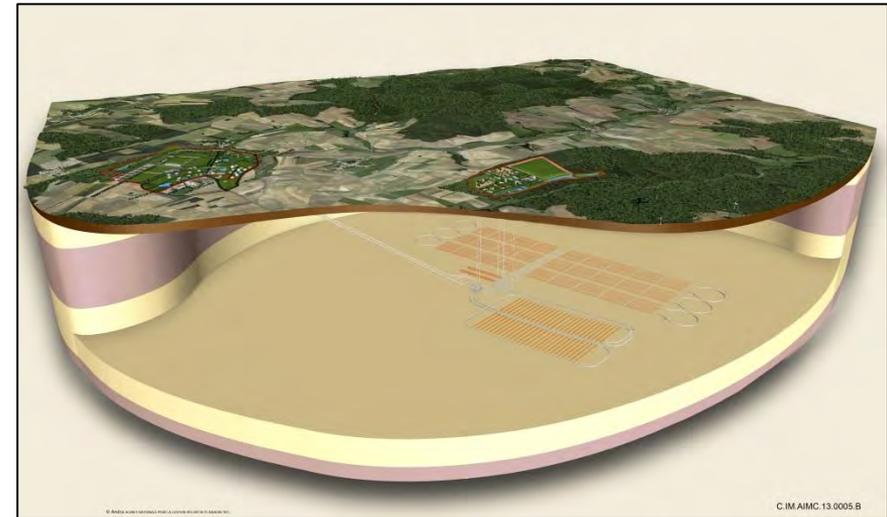


Site expérimental agricole

### Projet de concept du Dossier 2005

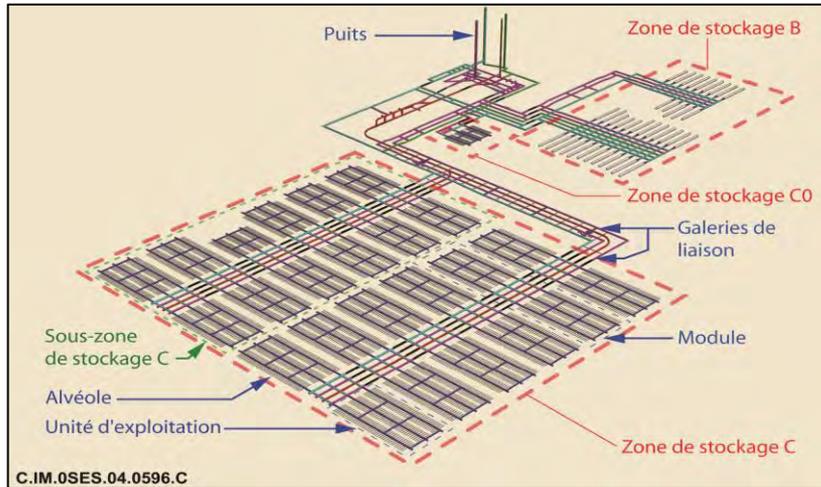


### Projet de concept au Dossier 2009

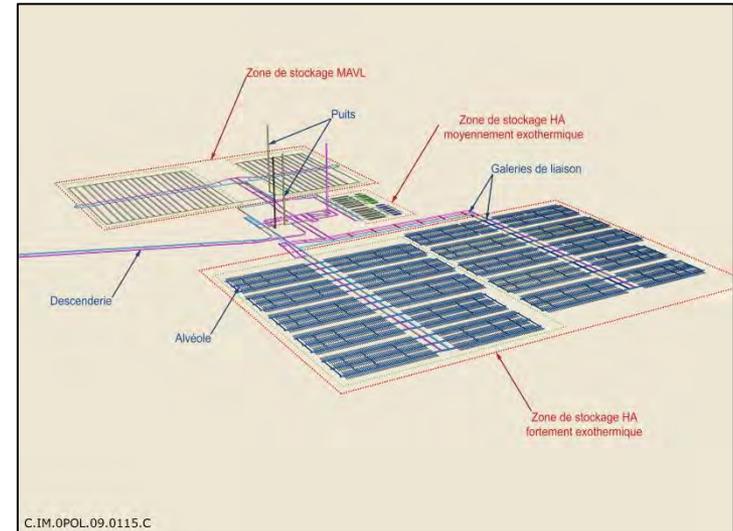


### Projet de concept en fin de la phase d'esquisse (fin 2013)

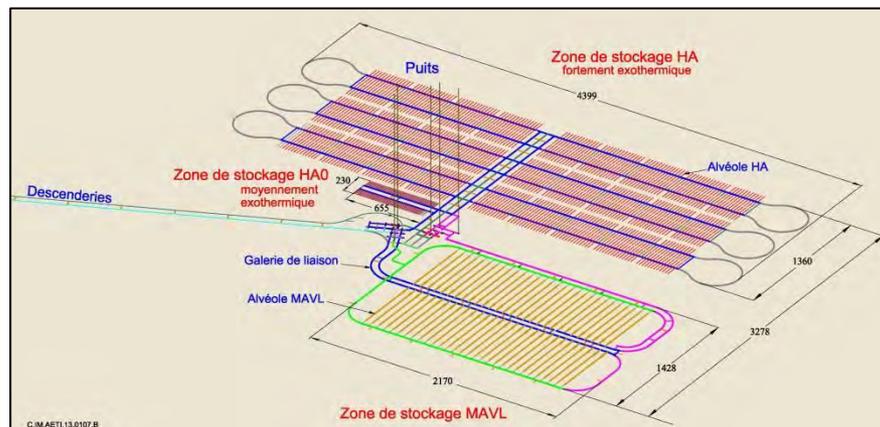
Projet de concept du Dossier 2005



Projet de concept au Dossier 2009



Projet de concept en phase d'esquisse (fin 2013)





Et maintenant quelle suite ?

### Saisie de la CNDP par l'Andra sur « Le projet de création d'un stockage géologique réversible de déchets radioactifs en Meuse/Haute-Marne : le projet Cigéo »

#### ◆ Un débat en 2 phases : 15 mai au 31 juillet 2013 puis 1ere septembre au 15 décembre 2013

- 154 cahiers d'acteurs
- Plus de 1 500 questions
- Plus de 600 avis
- 9 débats contradictoires et l'avis d'un panel de 17 citoyens

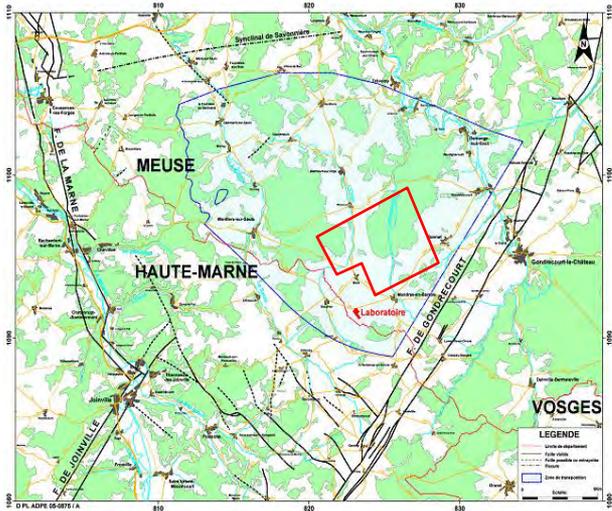
### Délibération du Conseil d'Administration du 5 mai a été inscrite au Journal Officiel (JORF n°0108 du 10 mai 2014)

#### ◆ 4 propositions

- L'Intégration d'une phase industrielle pilote au démarrage de l'installation
- La mise en place d'un plan directeur pour l'exploitation du stockage régulièrement révisé
- Un aménagement du calendrier
  - 2015 : une proposition de plan directeur et un Dossier d'Option de sûreté et un dossier d'options techniques de récupérabilité
  - Fin 2017 : demande d'autorisation de création
    - » Horizon 2020 : décret de création
    - » 2025 : démarrage de l'installation par la phase industrielle pilote
- L'implication de la société civile dans le projet

#### ◆ 3 engagements

- Garantir la sûreté avant tout
- Préserver et développer le territoire d'accueil
- Maitriser les coûts



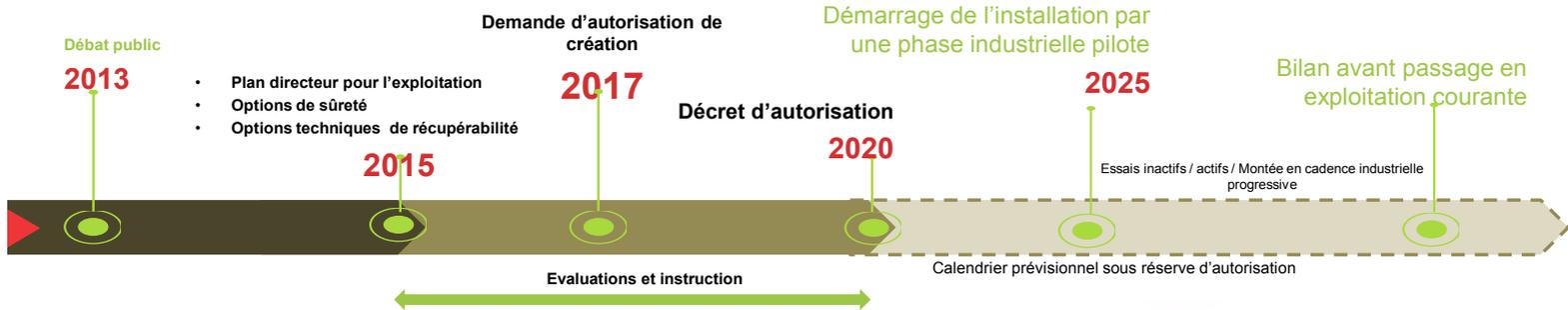
- Zone de transposition (Dossier 2005)
- Zone d'implantation des installations fond

### 2 installations de surface :

- Réception, contrôle et préparation des colis
- Taux de creusement et de construction



Installation souterraine à 500 m de profondeur



### Préserver la ressource rare du stockage

- ◆ Caractérisation de l'inventaire radiologique, méthodes de traitement et de conditionnement
- ◆ Concevoir un stockage plus compact

### Définir les exigences et les STB en lien avec les progrès des connaissances

- ◆ Acquérir les données intrinsèques aux matériaux et milieux naturels
- ◆ Caractériser, modéliser les mécanismes d'interaction et simuler le fonctionnement phénoménologique du stockage

### Accompagner les opérations de construction et d'exploitation des stockages

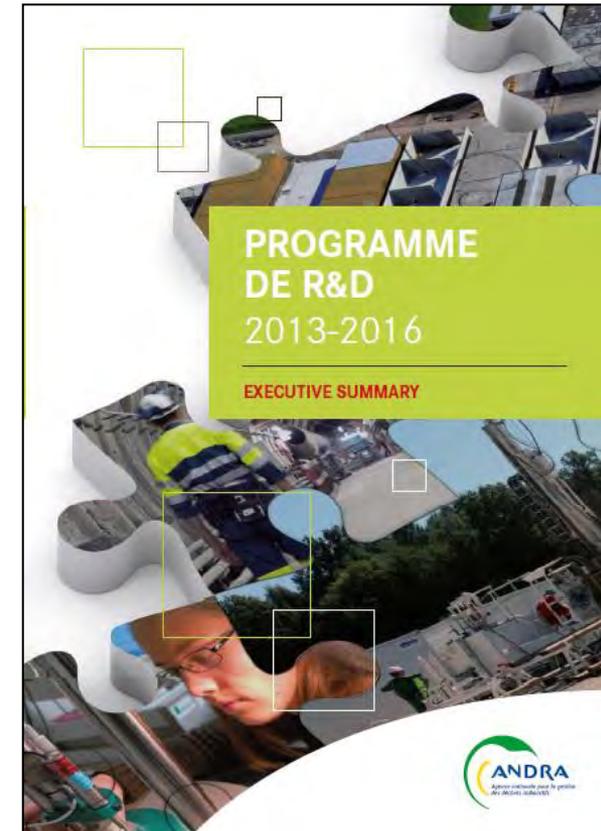
- ◆ Optimiser la conception/construction du stockage
- ◆ Accroître la prédictibilité du fonctionnement du stockage, préparer le plan de surveillance et évaluer la flexibilité du stockage

### Définir et exploiter les techniques et réseaux d'auscultation et d'information

- ◆ Développer les moyens de mesure et de traitement

### Optimiser les matériaux du stockage

- ◆ Veille et innovation



Un effort de recherche et des acquis très importants depuis 20 ans

La mise en œuvre industrielle de Cigéo n'est pas une fin, mais une continuité / un début pour la Recherche

- ◆ Cigéo, une installation unique, notamment par sa durée et les exigences de maîtrise de son fonctionnement
  - Environ 100 ans d'exploitation (> 2100)
  - Prise en charge progressive des déchets : verres HA1/2 vers 2075...
  
- ◆ Un accompagnement par la recherche au fur et à mesure du développement de Cigéo
  - Accroître la maîtrise du fonctionnement et consolider cette maîtrise par la comparaison prédiction/observation
  - Préparer puis mettre en œuvre les optimisations/progrès de demain
  - Assurer la transmission du savoir scientifique et technologique
  - Contribuer au dialogue sociétal
    - Maintenir la communauté scientifique « mobilisée »

## Caractérisation et compréhension des mécanismes aux petites échelles et les changements d'échelles

- ◆ transverses à tous milieux : matériaux, milieux géologique...
- ◆ Transverses à tous processus THMC
  - Assoir la capacité prédictive sur le long terme
    - Maîtrise accrue du vieillissement des installations (réversibilité) – observation/surveillance
    - Consolidation accrue de la Sûreté long terme

## Modélisation et simulation numérique multi-couplage et multi échelle d'espace et de temps

## Développement de matériaux innovants

- ◆ Matériaux « inertes » (ex. céramiques)
  - Limiter les interactions chimiques au sein du stockage et avec le milieu géologique
    - Accroître la robustesse du stockage

## Développement de capteurs et de méthodes de caractérisation des objets in situ et du traitement de l'information

- ◆ Capteurs chimiques
- ◆ Méthodes de caractérisation non intrusive
  - Ouvrir la spectre de moyens d'observation et de surveillance du stockage
    - Accroître la maîtrise du fonctionnement de l'installation en exploitation

## Caractérisation des environnements de surface autour de Cigéo et intégration de leur évolution sur une longue période (exploitation de Cigéo)

- Accroître la maîtrise de l'évolution et être capable de différencier les effets anthropiques éventuels de Cigéo

## Accompagnement sociétal de Cigéo au fur et à mesure de son développement

- Contribuer/participer au dialogue avec les parties prenantes (en particulier locales)