

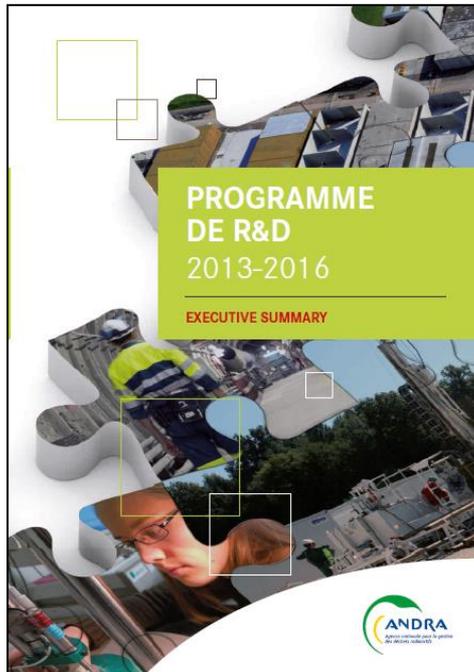


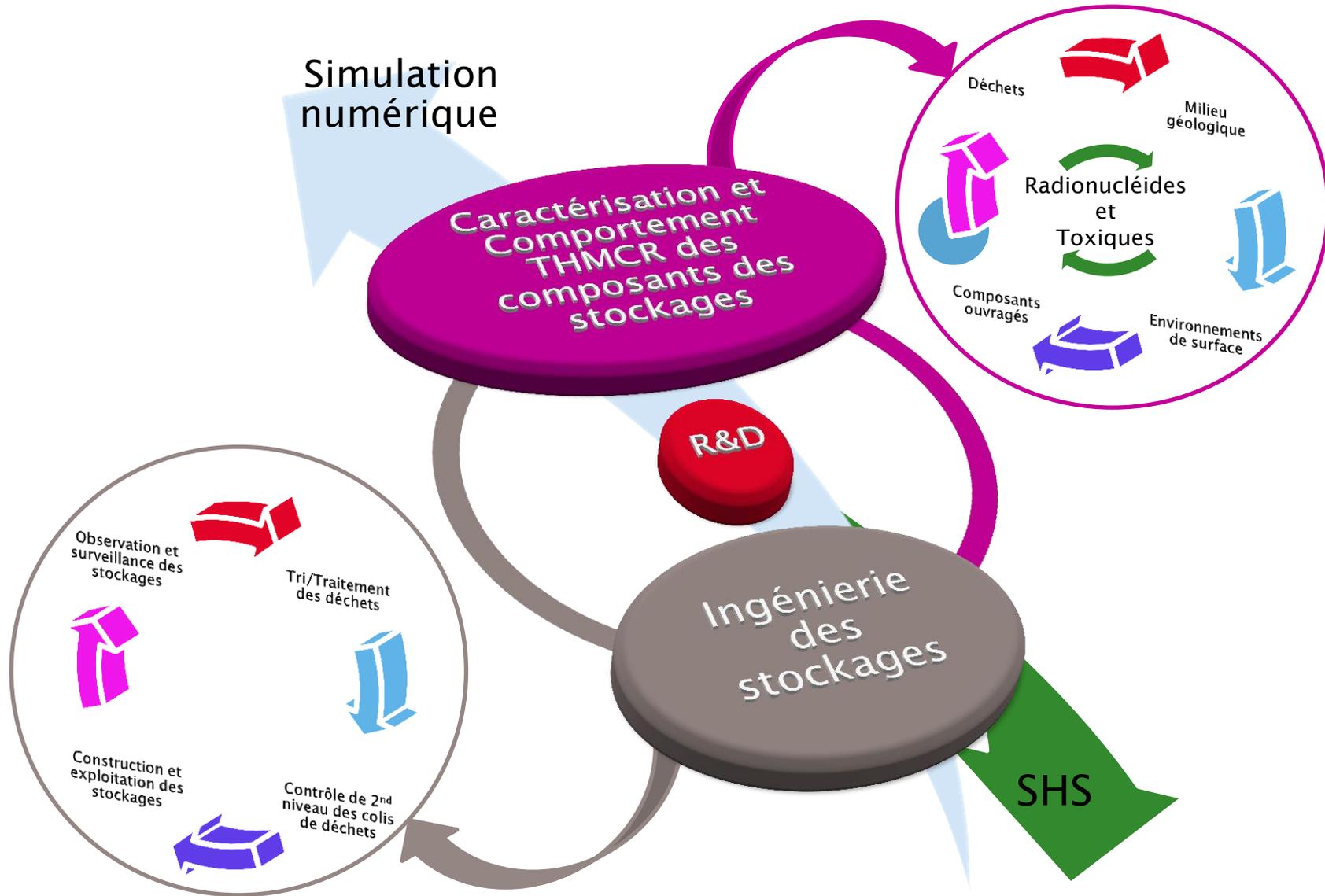
Projet Cigéo

La R&D en support à la conception puis à
l'exploitation de Cigéo
Formation Clis – 08 décembre 2014



Introduction





Dimensionnement/conception

- ◆◆ Optimisation technico- économique
- ◆◆ Définition des spécifications que doivent respecter les composants

Evaluation de sûreté (exploitation et après fermeture)

- ◆◆ Consolidation, quantification de marges, prise en compte des évolutions de conception....

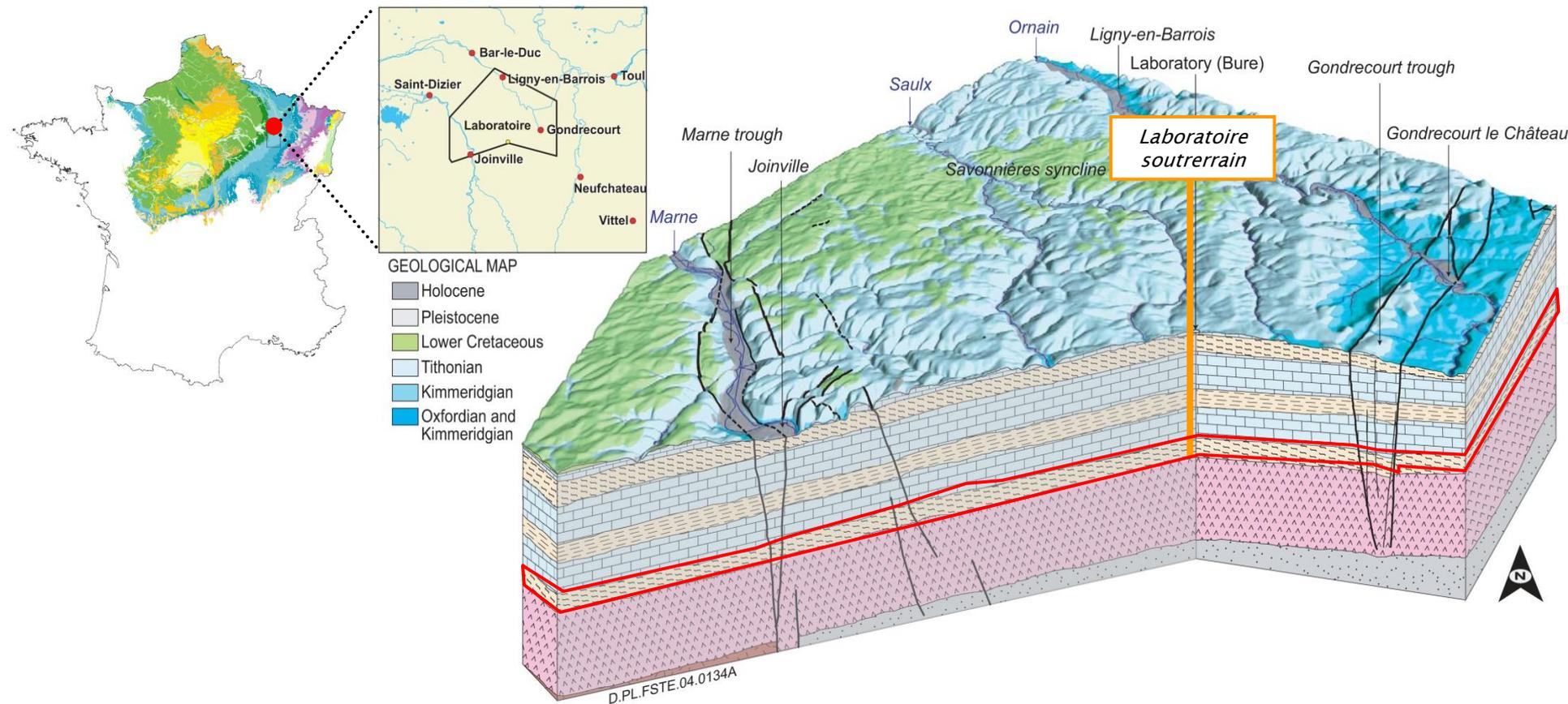
Gestion flexible (et réversible)

Observation et surveillance de Cigéo et de son environnement

- ◆◆ suivi et compréhension des comportements des composants

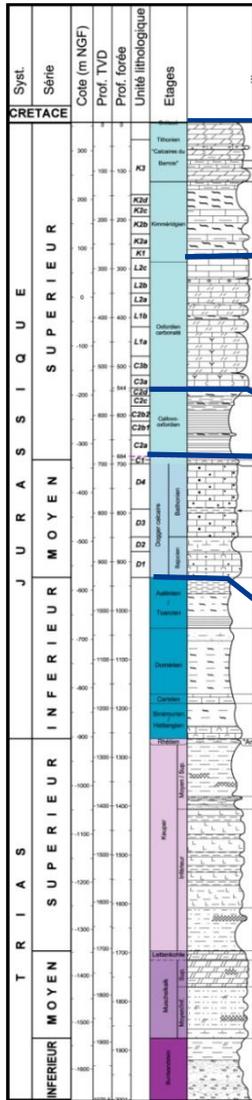


Le milieu géologique d'implantation de Cigéo

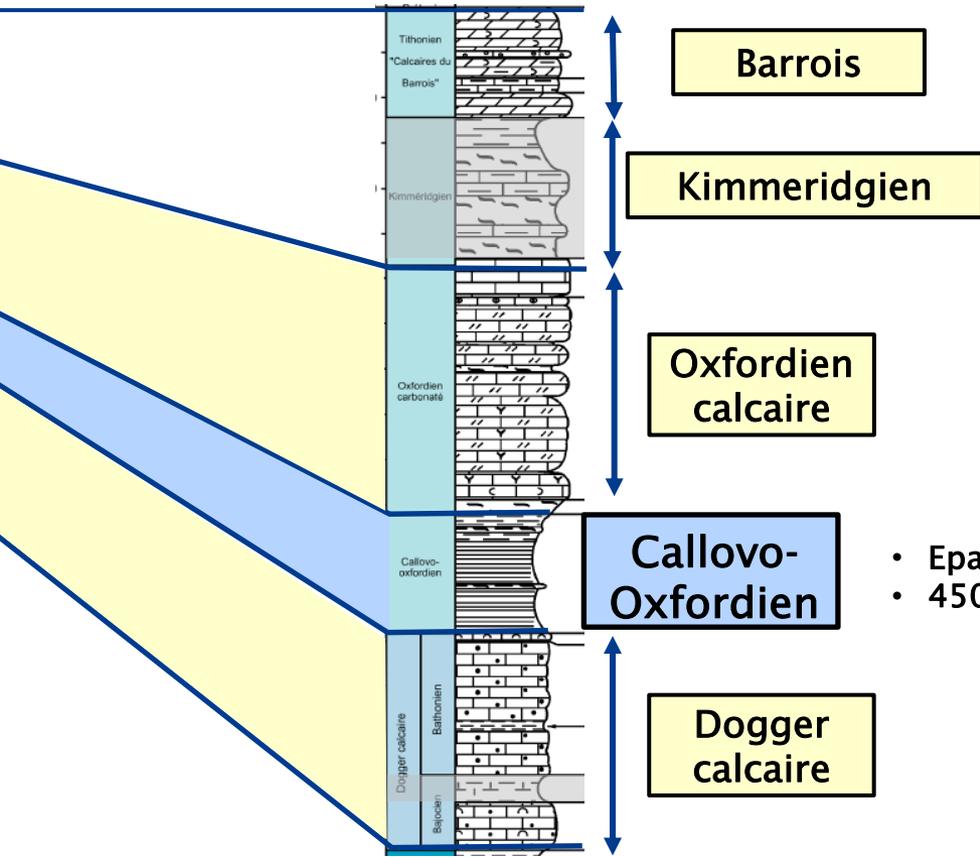


- ❑ **Structure géologique simple** formée depuis des dizaines de millions d'années
 - Pendage régulier et faible 1° à 1,5° NW
 - Failles régionales délimitées (N 40°E, N 140 à 150°E)
- ❑ **Domaine géologique stable** à l'écart des zones sismique actives

environ 2000 m d'épaisseur



Série sédimentaire du Jurassique au Permien



Barrois

Kimmeridgien

Oxfordien calcaire

Callovo-Oxfordien

Dogger calcaire

- Epaisseur de 130 à 160 m
- 450 et 560 m de profondeur

- ◆ Reconstituer l'histoire géologique et les contextes de dépôt des formations
- ◆ Définir le cadre structural (failles) et l'histoire tectonique
- ◆ Identifier la géométrie de la formation argileuse du Callovo-oxfordien et des formations au dessus et en dessous (épaisseur, profondeur, séquences sédimentaires...)
- ◆ Caractériser les propriétés physiques du Callovo-Oxfordien et leur variabilité spatiale (perméabilité, diffusion, rétention...)
- ◆ Caractériser les écoulements dans les formations encaissantes et les échanges avec le Callovo-Oxfordien

Des campagnes de reconnaissances successives depuis 20 ans

◆ Forages (Secteur, ZT, ZIRA), Sismique 2D (200 km), Sismique 3D (4 km², 37 km²)



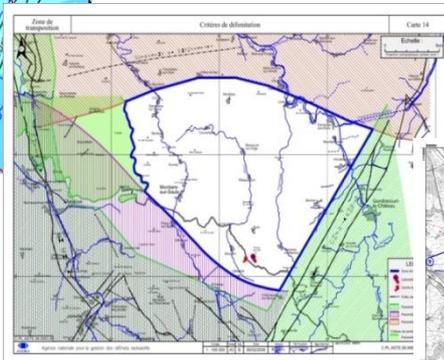
1994

1995 :
15 km de sismique 2D



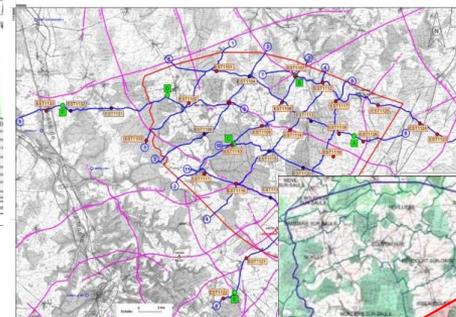
2001-2003 : 2800 km²

2001 :
• 3,5 km de sismique 2D
• 4,4 km² de sismique 3D



2005 : 250 km²

2007 :
150 km de sismique 2D



2009

2010 :
37 km² de sismique 3D



Dossier 2009 : 30 km²

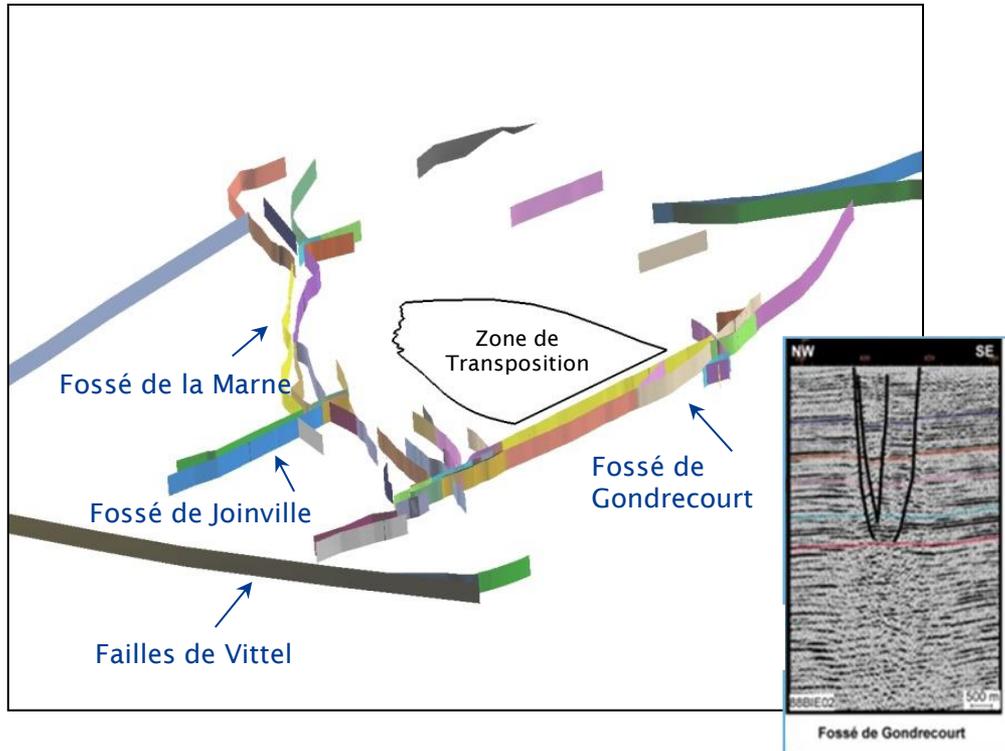
Forages du secteur :

- 96 forages réalisés
- 5417 m carottés dont 2790 m dans le COX

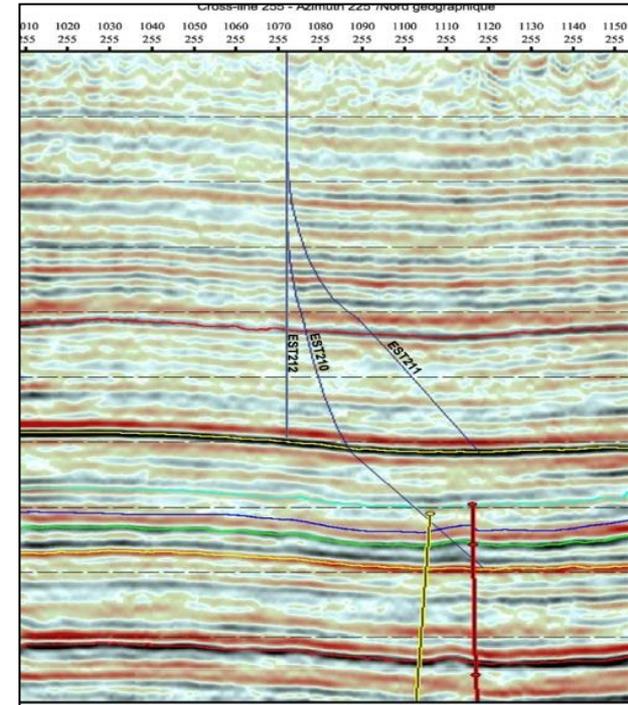
Nombre d'échantillons:

- 46 310 échantillons solides
- 13 167 échantillons fluides

A l'échelle de la zone étudiée

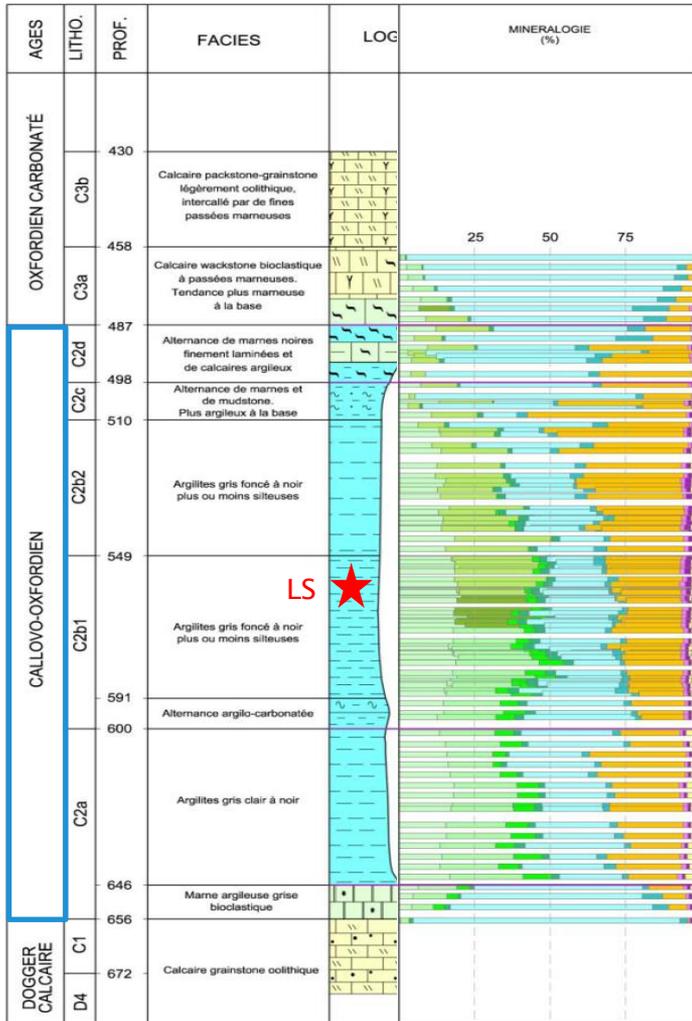


A l'échelle du laboratoire souterrain



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

- ◆ Pas de faille > 2 m détectée par la sismique 3D
- ◆ 4 forages dirigés (1377 m d'échantillons) : aucune variation notable des propriétés hydrauliques



Argilites du Callovo-Oxfordien

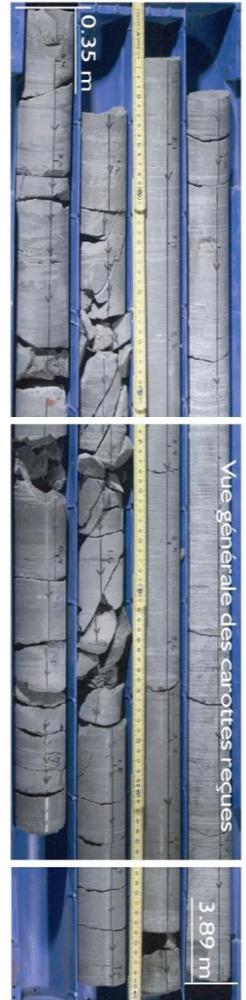


déposées il y a ≈ 160 Ma

Dans un environnement marin ouvert et calme de 100 m de profondeur

Composition minéralogique

Argiles ($\approx 50\%$)
 Carbonates
 Tectosilicates
 Minéraux annexes ($<5\%$)



◆ Très faible perméabilité

- Mesures à différentes échelles (cm à plurimétrique)
- Similarité entre mesures in situ et mesures sur échantillons

◆ Faibles coefficients de diffusion

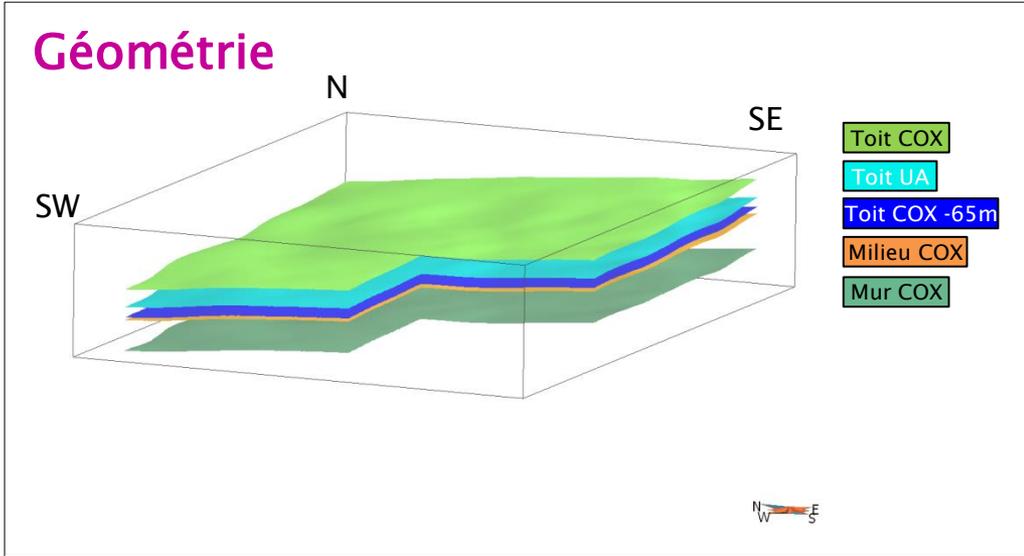
◆ Composition chimique de la roche qui limite la mise en solution de nombreux radionucléides

◆ Faible variation des valeurs des paramètres dans une zone de 250 km²

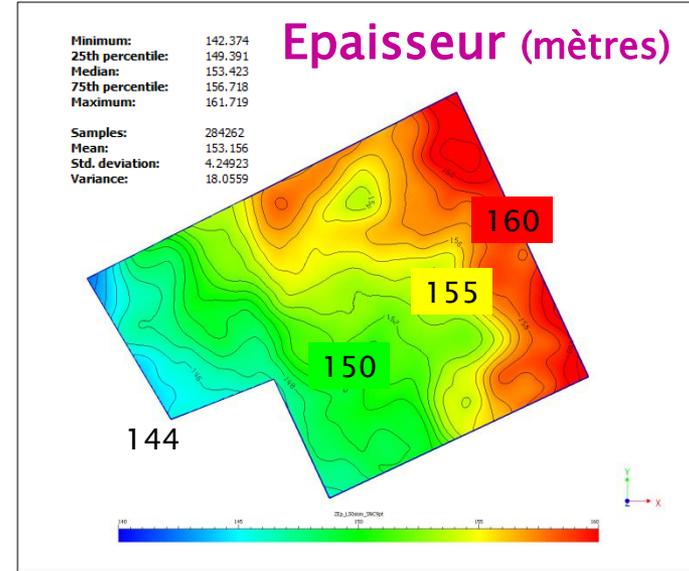
Le milieu géologique d'implantation de Cigéo

La représentation 3D de la couche du Callovo-Oxfordien

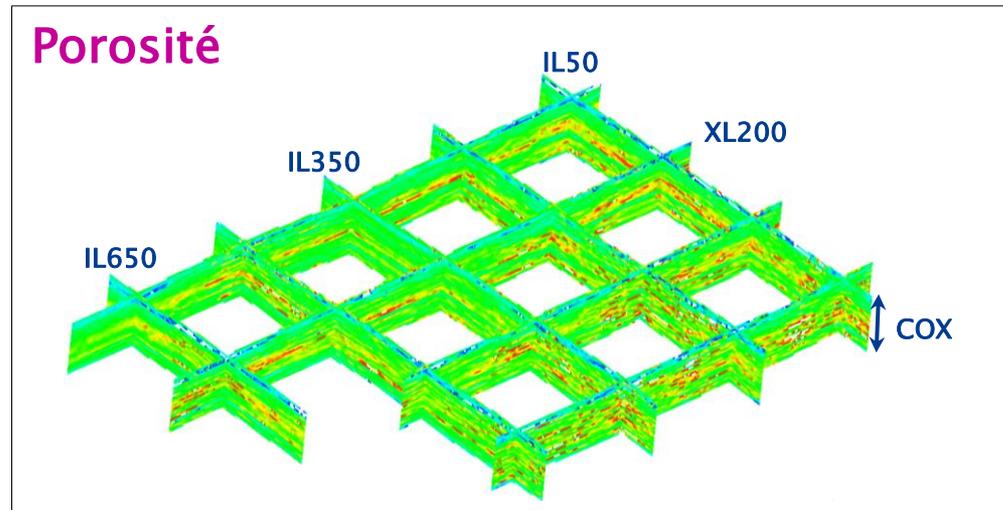
Géométrie



Epaisseur (mètres)



Porosité





L'observation et la surveillance de l'environnement autour de Cigéo

Surveiller l'environnement autour de Cigéo

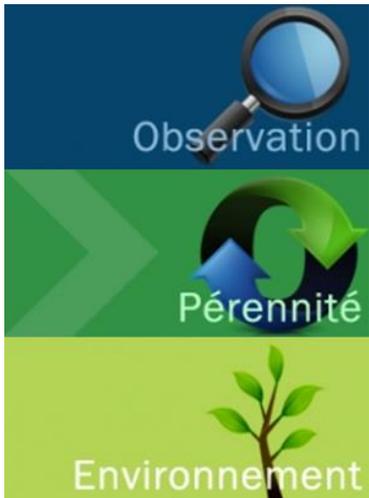
- ◆ Répondre aux exigences réglementaires
- ◆ Protéger les personnes et l'environnement

Mise en place d'un plan de surveillance de l'Environnement

Observer l'environnement autour de Cigéo

- ◆ Comprendre le fonctionnement des écosystèmes
- ◆ Préserver la mémoire de l'environnement
 - Identifier les évolutions
 - Discriminer leurs origines

Création d'un Observatoire Pérenne de l'Environnement en (OPE) en 2010

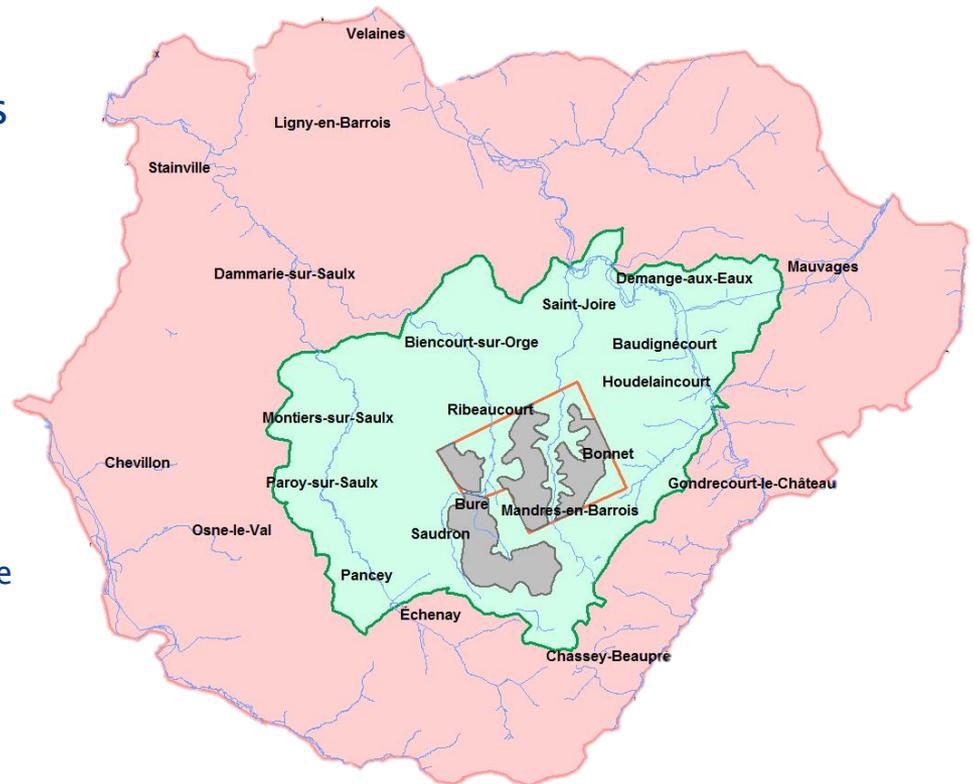


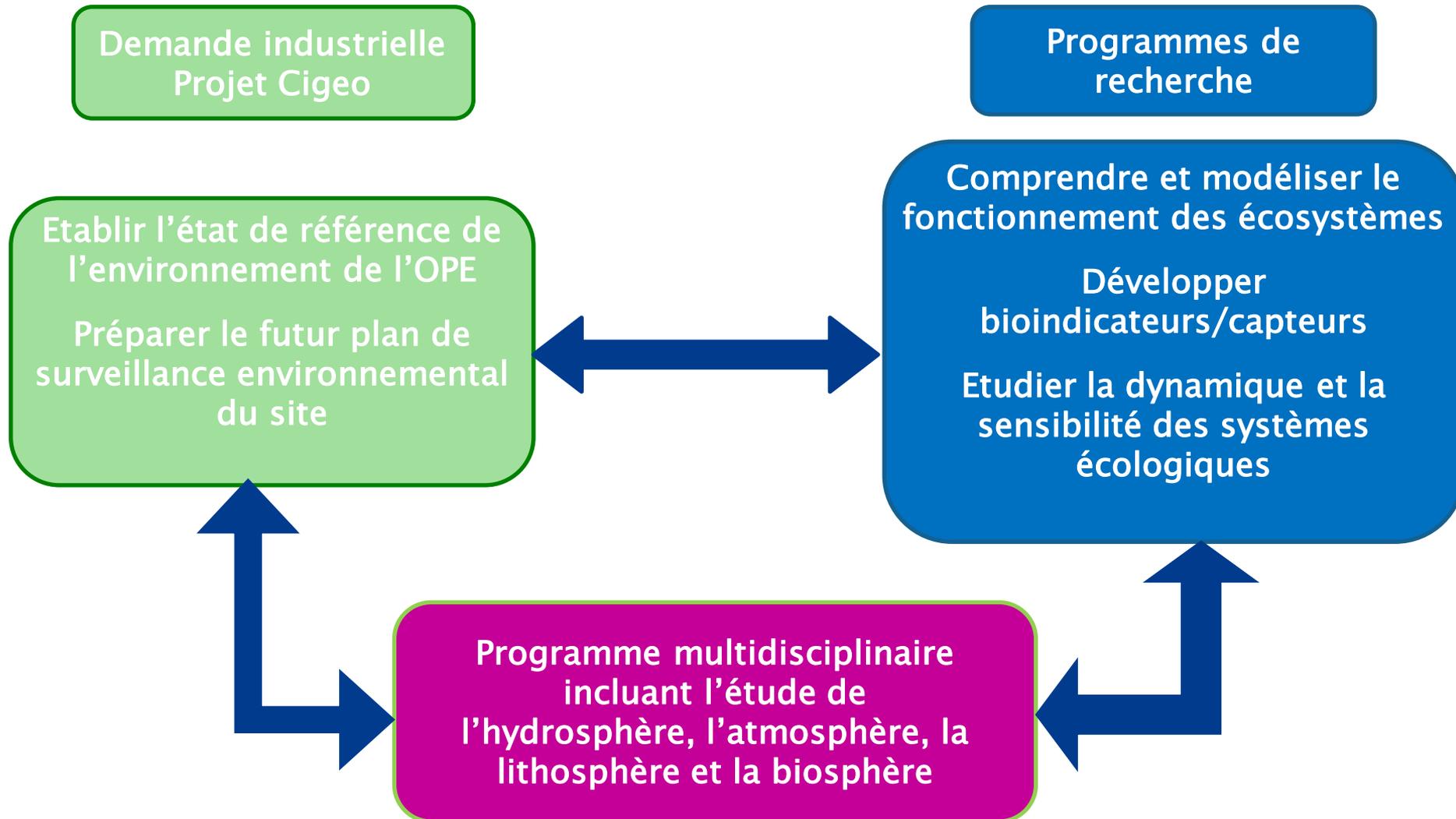
Une surface de 900 km² à la limite de la Meuse et de la Haute-Marne incluant 93 communes

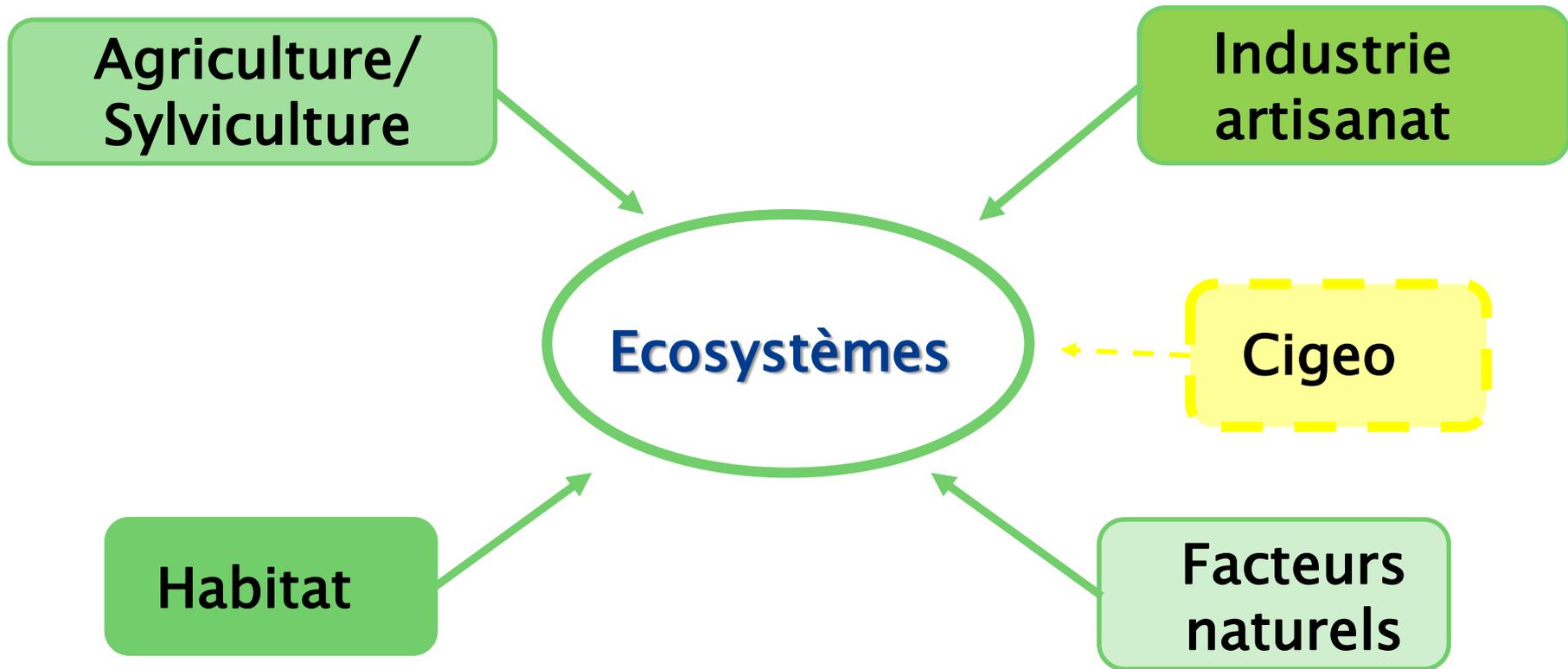
100 ans d'observation si Cigéo est accepté
Avant, pendant et après l'installation de Cigéo

Un suivi complet de tous les écosystèmes et de toutes les espèces

-  Zone OPE
-  Secteur de référence
-  ZIRA
-  ZIIS

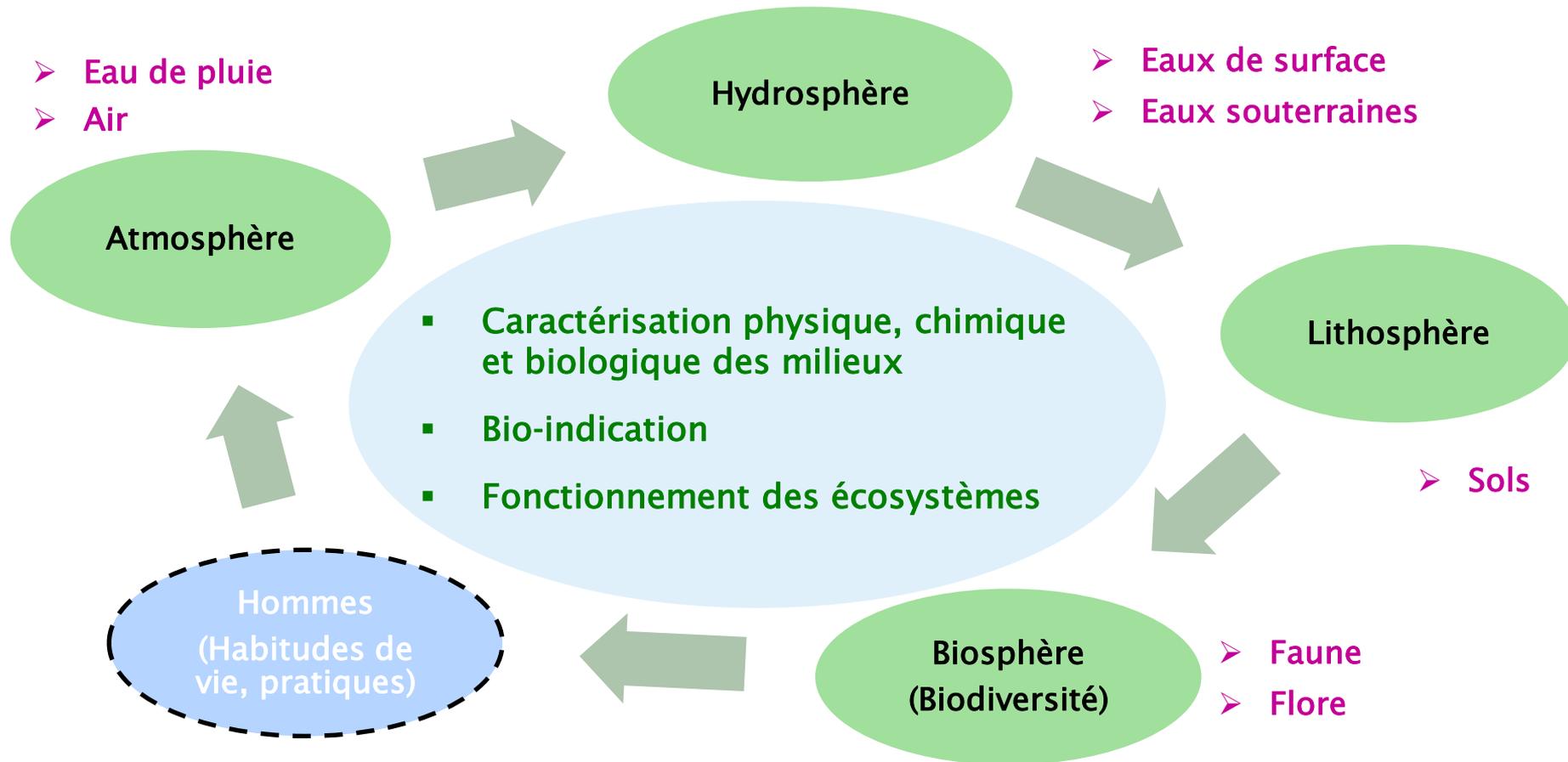






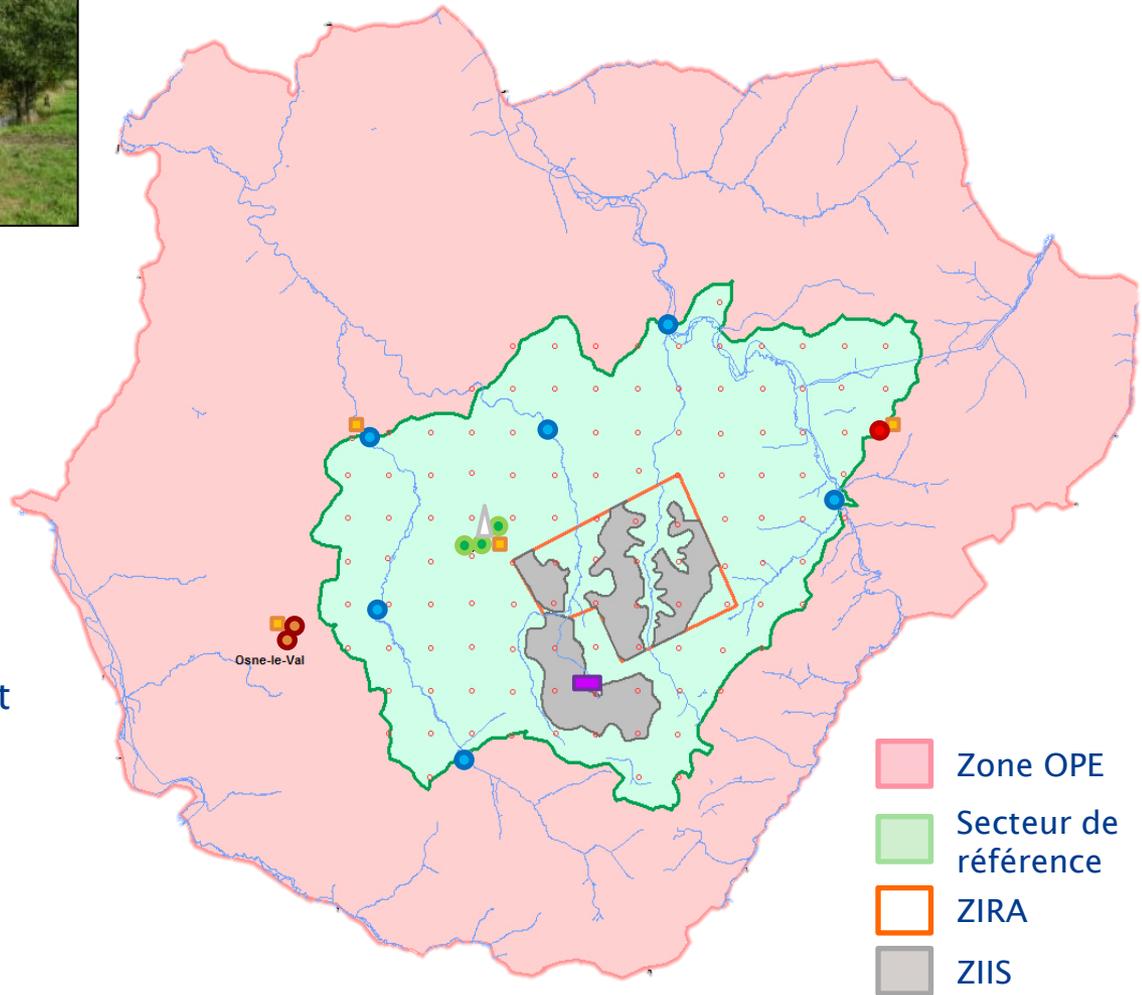
Discriminer et hiérarchiser l'importance des facteurs

- 1) **Globaux vs. locaux**
- 2) **Locaux entre eux**



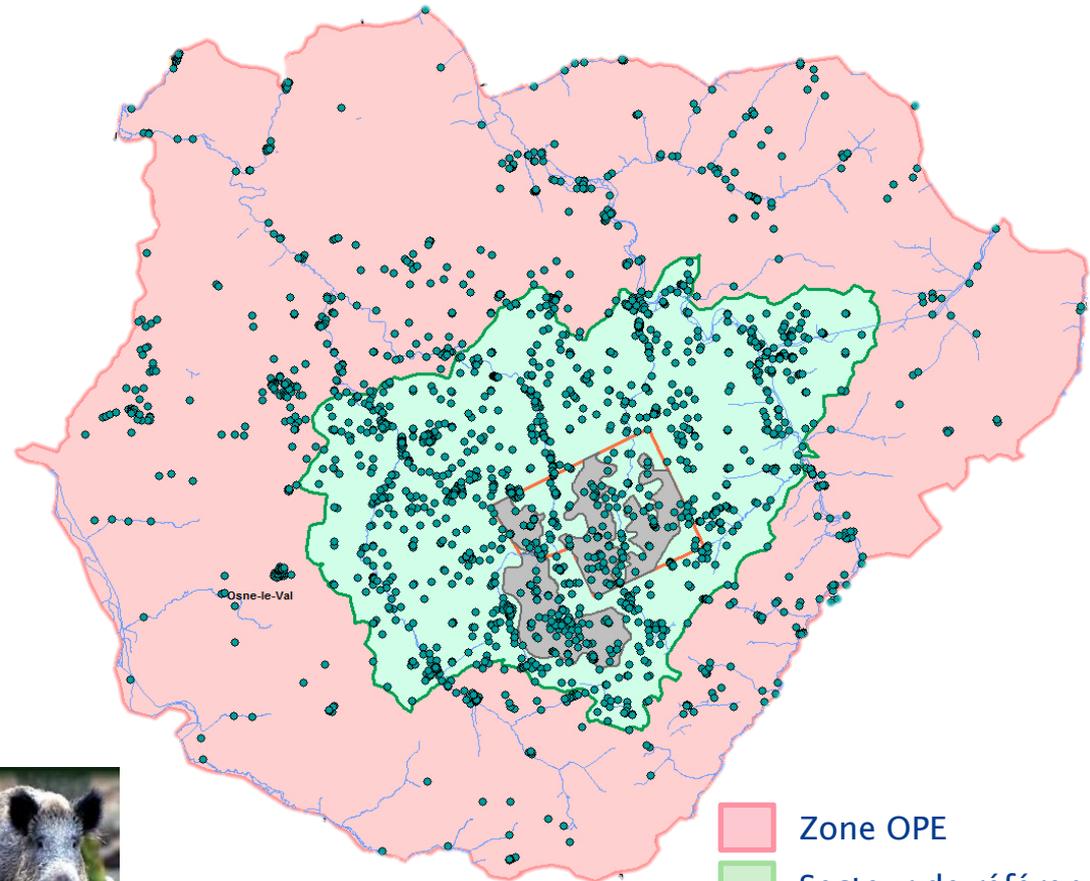


- 5 stations continue de la qualité des eaux
- ▲ 1 tour à flux
- 3 stations biogéochimiques forêt
- 2 stations biogéochimiques culture / lysimètre
- Point d'observation systématique
- Ruches instrumentées
- 1 station atmosphérique



- Zone OPE
- Secteur de référence
- ZIRA
- ZIIS

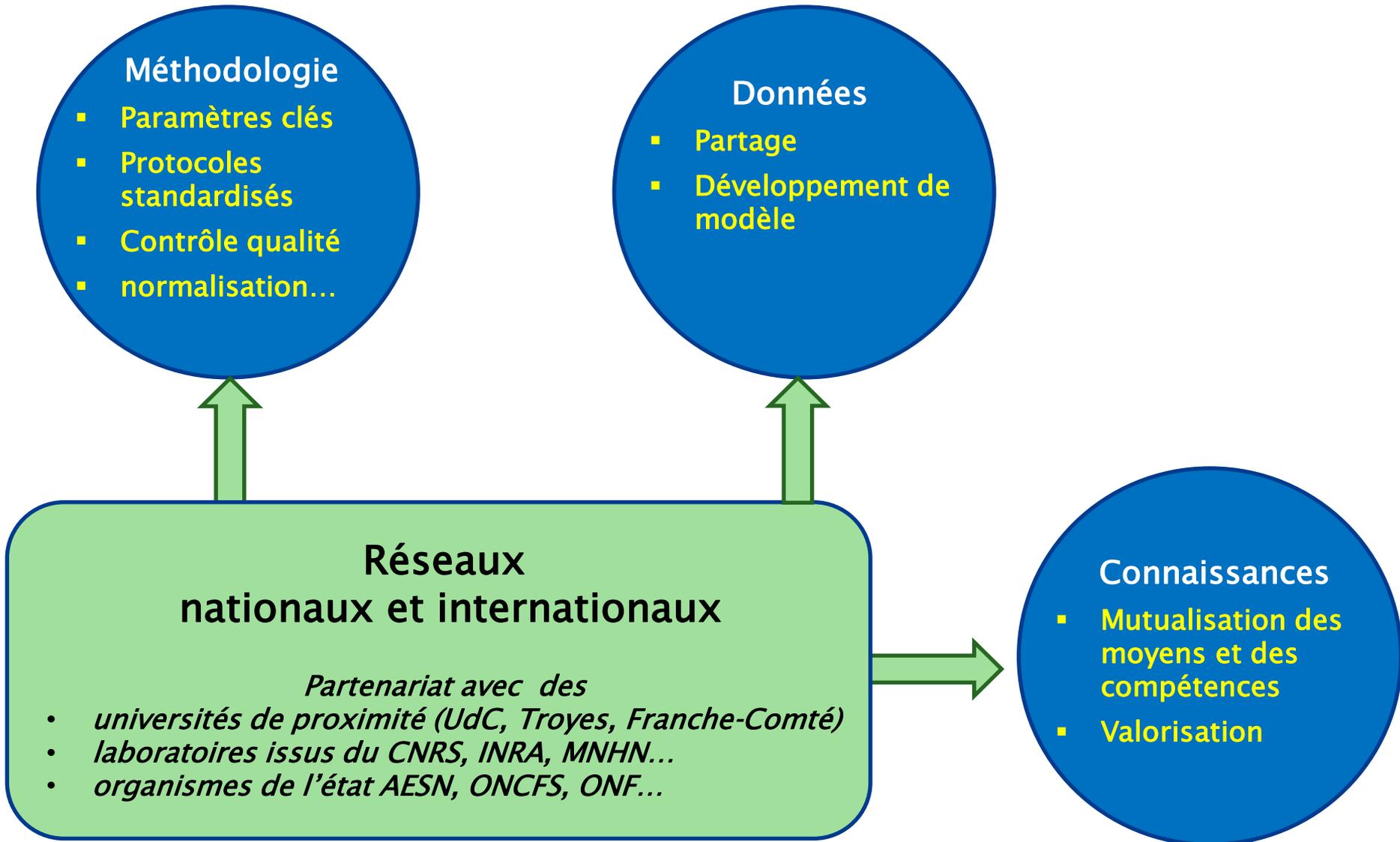
● Point d'observation/mesure ponctuelle



- Zone OPE
- Secteur de référence
- ZIRA
- ZIIS

- ✓ Stations de mesure en continue
- ✓ Réseaux de mesures systématiques
- ✓ Observations aérienne et satellitaire
- ✓ Bases de données géo-localisées
- ✓ Intégration dans des réseaux nationaux et internationaux





Une banque de données environnementales complète (eau, sol, matrice biologique,...)

- ◆ Comparer le futur avec l'état actuel
- ◆ procéder à des analyses rétrospectives de l'environnement

2 processus de conservation

Voie sèche (18°C)

Cryogénie (– 196°C)



Une structure unique en France

- ◆ Les mémoires des enveloppes superficielles de la Terre et des milieux de vie des sociétés réunies dans un seul lieu
- ◆ Une intégration dans le réseau international des écothèques (Environmental Specimen Bank : www.inter-esb.org)
- ◆ Une intégration dans SOMET (Structure pour l'Observation de et la Mémoire de l'Environnement et de la Terre)
- ◆ Le respect des normes HQE, conception avec les exigences des meilleures réalisations similaires à l'international



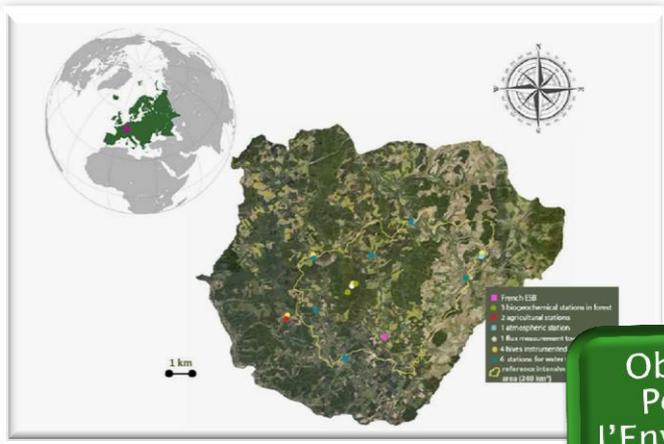
Laboratoire
Souterrain
(LS)



Ecothèque

Observatoire
Pérenne de
l'Environnement
(OPE)

SOMET

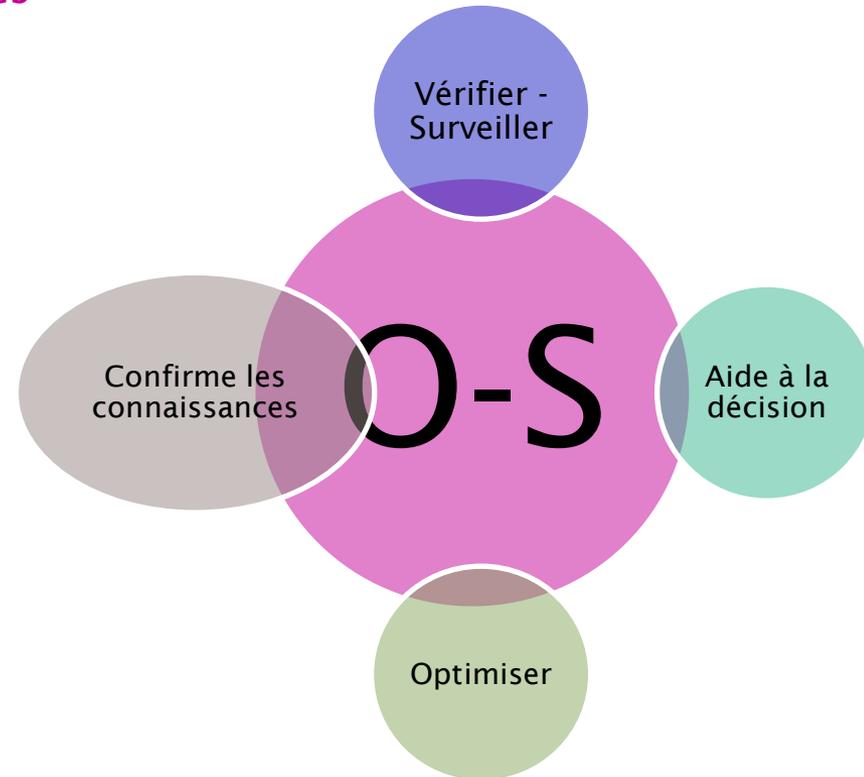


- ◆ Dénommée “SOMET” « Structure pour l’Observation et la Mémoire de l’Environnement et de la Terre »
- ◆ Labellisée Infrastructure de Recherche par le Ministère de l’Enseignement Supérieur et de la Recherche en novembre 2012



L'observation et la surveillance de Cigéo

- ◆ Une approche d'observation complémentaire aux dispositions habituelles de surveillance de la sûreté en exploitation
- ◆ L'accent est placé sur la vérification de ce qui se passe en support à :
 - la confirmation et la consolidation des connaissances intervenant dans l'évaluation de sûreté à long terme.
 - la réévaluation périodique de la sûreté du Centre en exploitation et des conditions de réversibilité.
- ◆ Contribution *in fine* à
 - l'aide à la décision
 - l'optimisation de la conception future de nouvelles tranches

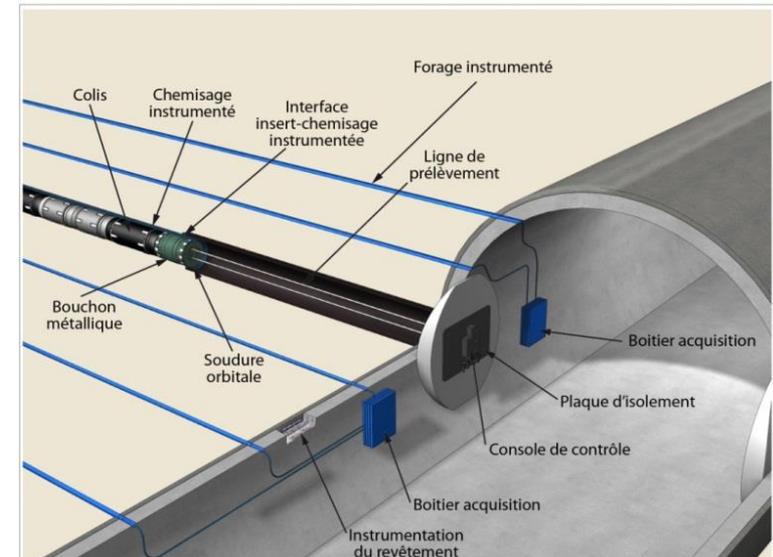
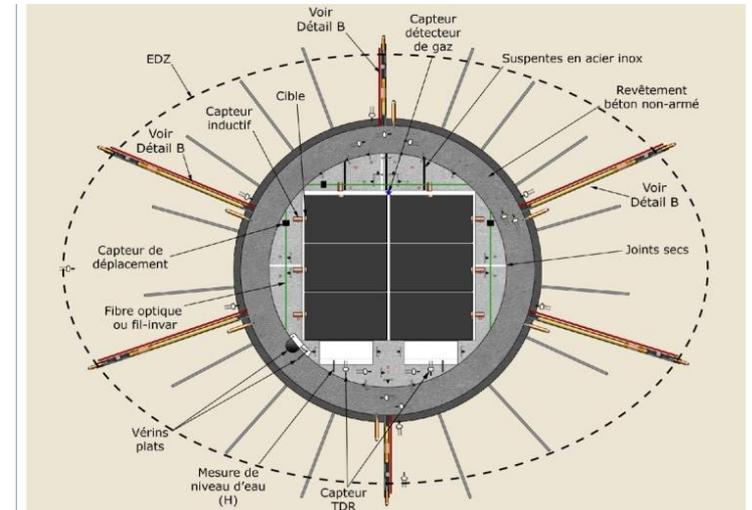


◆ Un déploiement réfléchi des éléments auscultés dans le stockage

- Au plus près des déchets et de l'ouvrage,
- Jusqu'à une vision d'ensemble du stockage

◆ Une estimation actuelle de 30 000 capteurs mis en place à terme

- mise en service progressive avec les ouvrages creusés
- de l'ordre de la dizaine de milliers de mesures par an au début
- vers plusieurs millions par an à terme



Des ouvrages instrumentés à l'échelle pluri-décennale

Tunnel de Chamoise



Tunnel sous la Manche



Métro de Lille



Barrage de Bromme 1930/32
et Marèges 1935



Bâtiment Réacteur



Viaduc de Millau

◆ Typologie des moyens et instruments disponibles

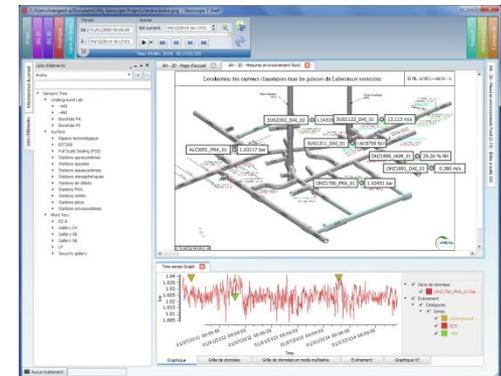
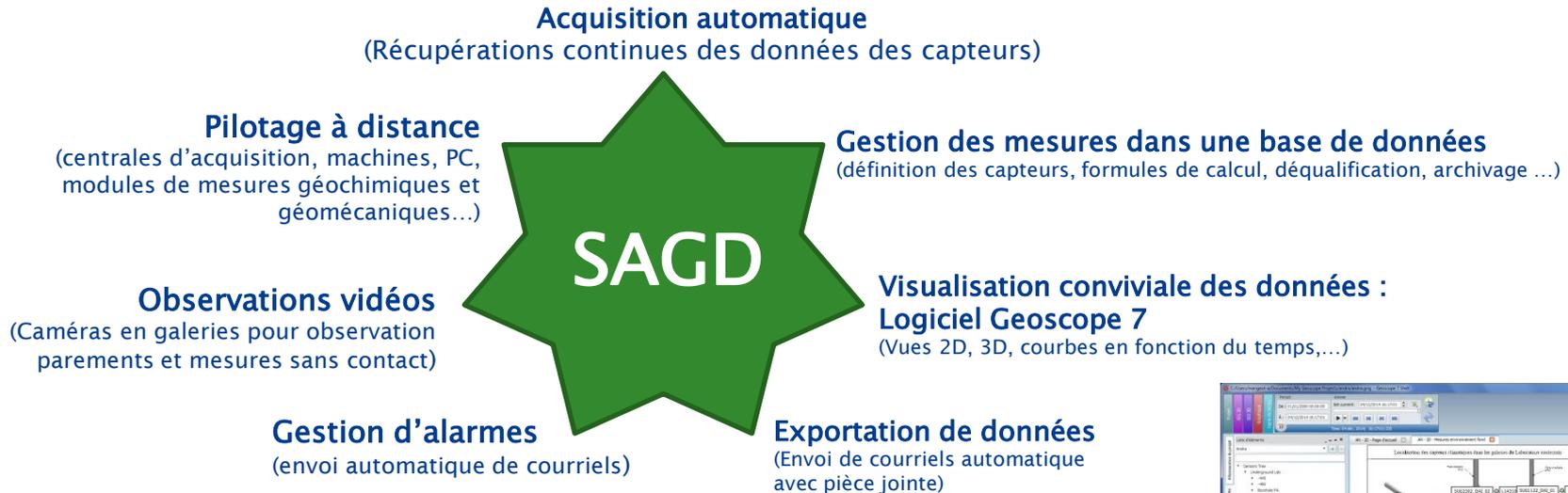
- Le visuel
- Les MENDS (robotisées)
- Prélèvements d'échantillons
- Instrumentation in situ



◆ Robustesse et longévité du système global d'auscultation principalement assurées par des redondances et des complémentarités entre :

- de l'instrumentation in situ
- des moyens mobilisables, tant que les ouvrages sont accessibles

◆ SAGD : le Système d'Acquisition et de Gestion des Données mis en place dès 2002



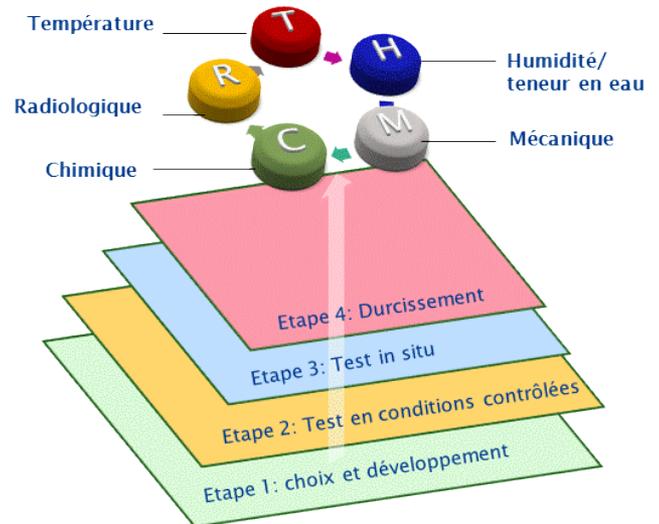
Quelques chiffres

- 77 centrales d'acquisition
- 14 000 Points de mesures (capteurs de pression, déformation, déplacement, convergence..)
- 1.3 millions de valeurs/jour enregistrées dans la base SAGD
- 1.8 milliards de valeurs enregistrées dans la base SAGD
- 3345 logbooks (évènements associés aux données)

- ◆ Une échelle de temps pluri-décennale à séculaire de fonctionnement
- ◆ Recherche d'une grande durabilité et robustesse face
 - à l'inaccessibilité aux dispositifs d'auscultation
- ◆ Maîtriser la dérive des capteurs sur une échelle pluri-décennale
- ◆ Conditions d'environnement imposées par le stockage
 - température, rayonnements...
- ◆ Une « discrétion » recherchée
 - ne pas dégrader les conditions favorables à la sûreté à long terme

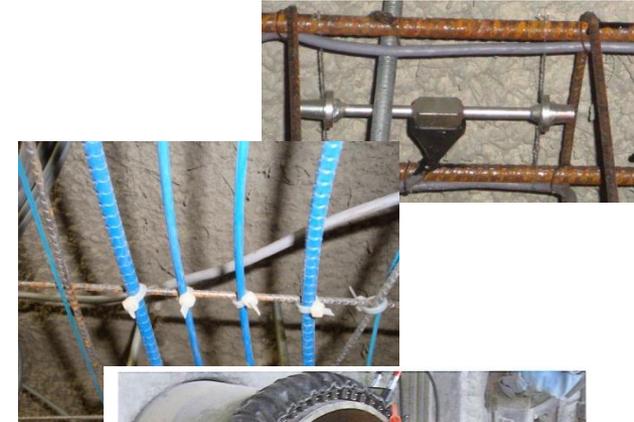


Nécessité d'une R&D et d'un processus graduel de qualification



◆◆ moyens de mesures à demeure (capteurs)

- Pour couvrir tous les besoins de mesure
 - Température
 - Teneur en eau des matériaux
 - Déformation et désordres
 - Gaz, évolution des matériaux
- Disposer d'une « redondance » de technologies et principes de mesures
 - 2 principes différents par besoin de mesure

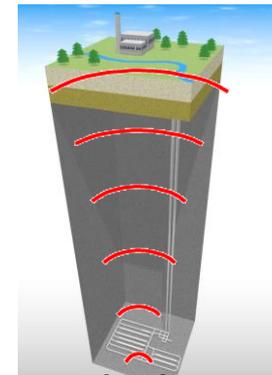


◆◆ moyens mobilisables

- Techniques non destructives

◆◆ traitement futur des données

- Analyses et corrélation entre ouvrages
- Comparaison aux simulations



Transmission sans-fil

Extensomètre monotige - multipoints inductif



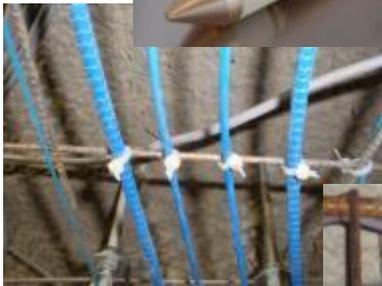
Pression totale



Cellule de pression interstitielle à corde vibrante



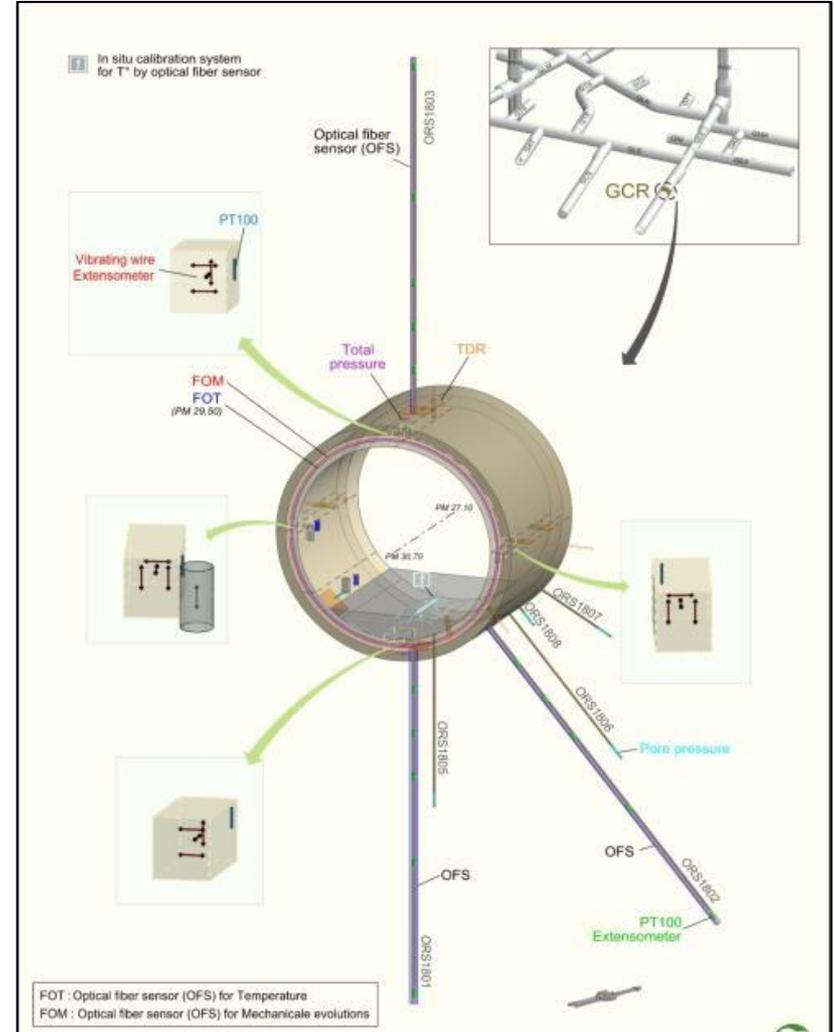
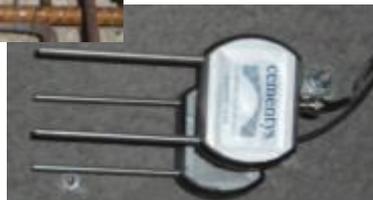
Fibres optiques



Extensomètre à corde vibrante



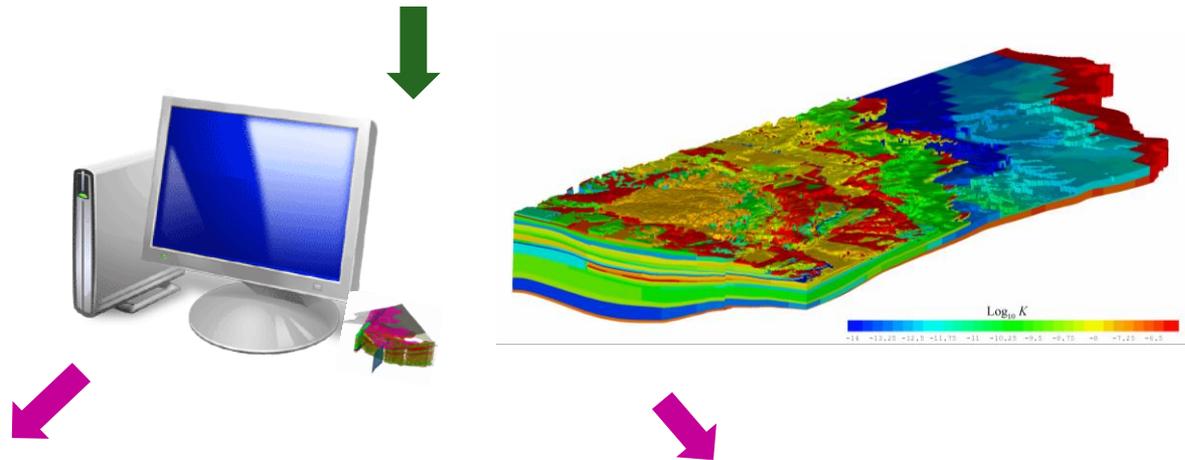
TDR





La simulation numérique pour Cigéo

- ◆ Un moyen privilégié pour accéder aux échelles de temps et d'espace des stockages,
 - Un lien très étroit avec l'acquisition des connaissances (expérimentations, ...)
- ◆ Un outil d'intégration des connaissances élémentaires (multi-échelles, multi-composants, multi-matériaux, multiprocessus)



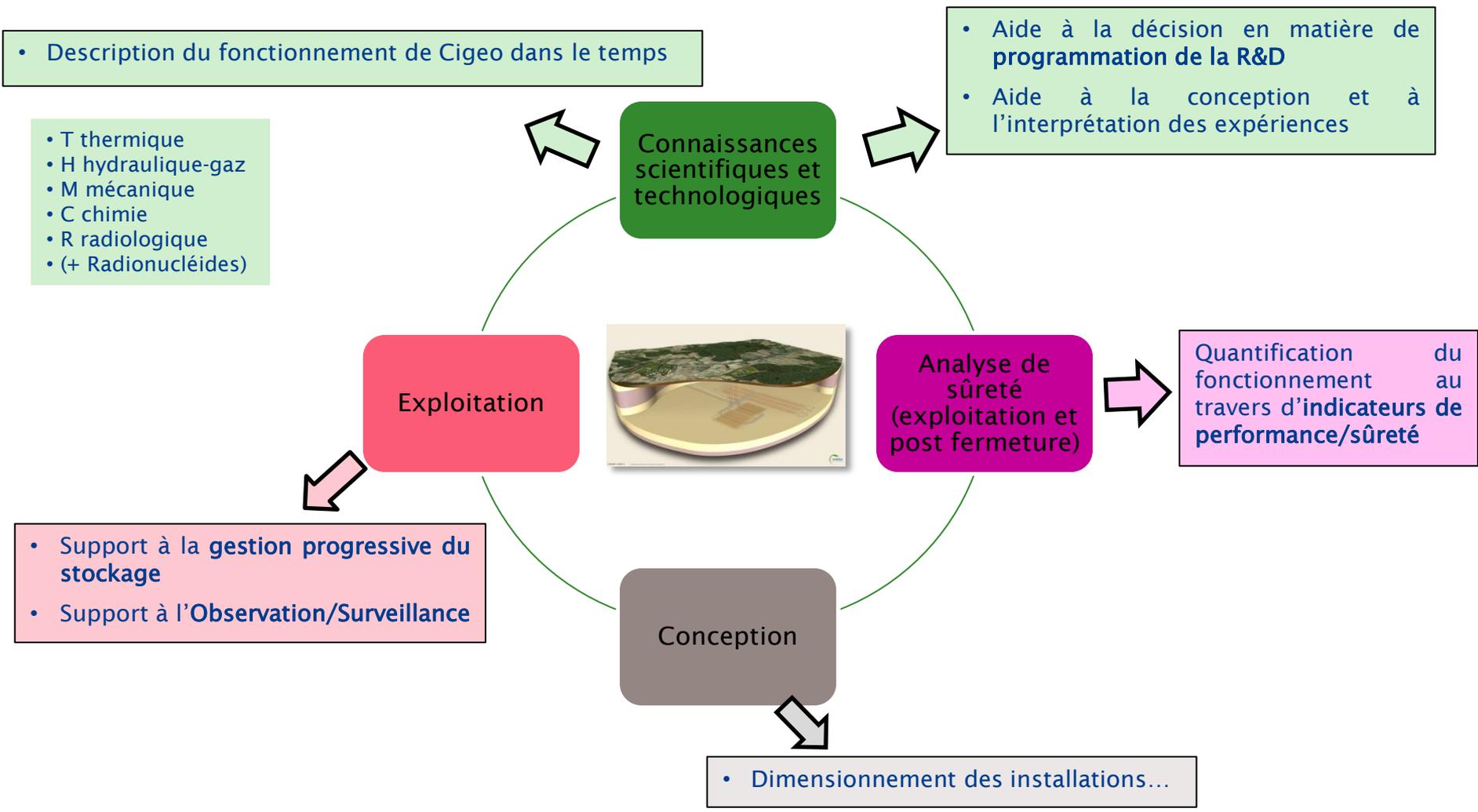
Réalisation « en propre »
des simulations

R&D en simulation/calcul scientifique
(méthodes et outils)



La simulation numérique pour Cigéo

4 grands domaines d'application



La simulation numérique pour Cigéo

Une synergie de compétences

- *Connaissances*
 - ☐ *Processus/mécanismes*
 - ☐ *Incertitudes*

Physiciens



- *Equations mathématiques*

Mathématiciens



Informaticiens

- *Logiciel*
- *Matériel*



Numériciens

- *Résolution numérique des équations mathématiques*



*Modèles et données de base
(déchets, matériaux, site):
laboratoire jour et in situ,
démonstrateurs, analogues...*

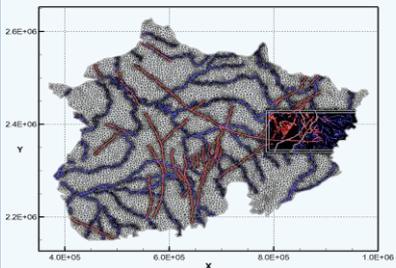
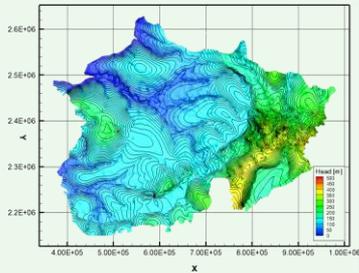
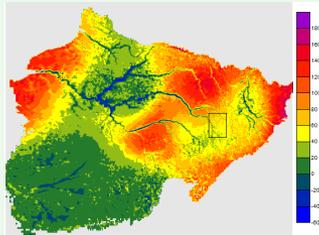
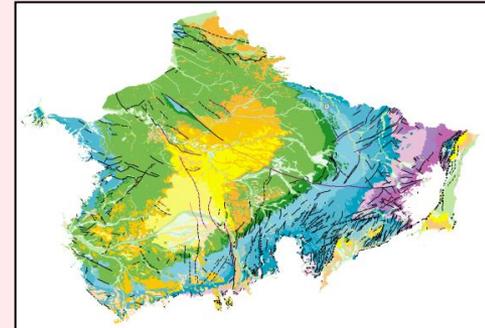
- *Intégration, structuration*
- *Analyse, tri, hiérarchie*
- *Incertitudes de toutes natures*

Analyse des résultats
(applications)

Conceptualisation du comportement
(modèles, composants, données)

Conceptualisation numérique

- *Outils de simulation*
- *Méthodes numériques*
- *Mise en œuvre numérique*



Pour répondre aux différents objectifs/enjeux de simulation numérique

- ◆ L'Andra doit disposer d'outils de simulation et de méthodes numériques couvrant au mieux les besoins de finesse, complétude et précision des représentations des processus et des composants

- ◆ 3 grands axes de R&D
 - La simulation des processus physiques
 - Implémentations des couplages multi-physiques

 - Les méthodes numériques de résolution
 - capacités de calculs « haute performance »
 - » *Parallélisme et calcul intensif*
 - » *Méthodes de décomposition de domaine espace/temps*
 - méthodes numériques robustes
 - algorithmes de maillage performants

 - Les méthodes d'analyse
 - analyse d'incertitudes et de sensibilité
 - identification de paramètres par analyse inverse

Des thématiques au cœur du métier de l'Andra :

- ◆ Hydraulique et transport de soluté en milieu poreux saturé ou non saturé d'eau
- ◆ Transfert diphasique eau-multi-composant gaz
- ◆ Transport réactif en milieu poreux
- ◆ (Thermique, THM)

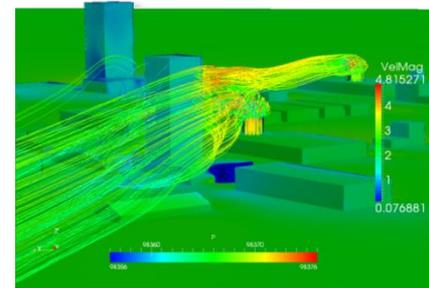
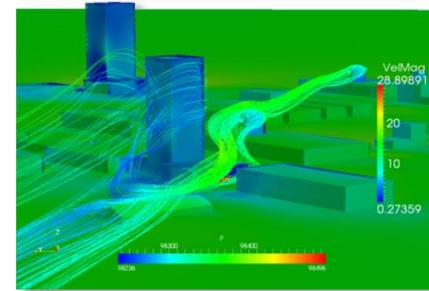
↪ Thématiques sous-traitées : Hydrogéologie, Aéraulique, Mécanique, développement

Simulations de sûreté :

- ◆ *Phase préparatoire* : conceptualisation des scénarios de sûreté réalisée en interne Andra
- ◆ *Phase opérationnelle* : réalisation en propre + sous-traitance des calculs (70 % du volume)

Appropriation par l'Andra de tout ou partie des simulations numériques phénoménologiques sous-traitées

- ◆ Vérification des travaux menés en externe,
- ◆ Acquisition d'une maîtrise intime de l'ensemble (conceptualisation, modélisation, simulation, mise en œuvre de l'outil),
- ◆ Souplesse face à des demandes (de plus en plus) urgentes ...



- ◆ Prestations par des entreprises privées reconnues dans le domaine des études
 - Société d'ingénierie, et sociétés de service type SSII ;
 - Plusieurs prestataires en parallèle, pour les calculs de sûreté
- ◆ Participation à des projets nationaux de l'ANR (Agence Nationale de la Recherche);
- ◆ Accès à des centres de calcul intensif GENCI (CINES, CCRT)
- ◆ Participation à des projets européens (PAMINA, MICADO, FORGE, DOPAS, ...)
- ◆ Participation à des Groupements Nationaux de Recherche du CNRS (Momas...)
- ◆ Thèses/post-docs sur le développement de méthodes numériques : 7 / 1 depuis 2006
- ◆ Partenariats
 - Inria... :



Inria
INVENTEURS DU MONDE NUMÉRIQUE

15 actions de R&D depuis 2010 :

- méthodes de résolution (calcul //, solveurs)
- méthodes d'analyse (sensibilité, data mining)
- simulation des processus physiques

◆ Des moyens matériels adaptés :

- taille des simulations (plusieurs millions d'éléments)
- physique traitée (fortes non-linéarités)
- mise en oeuvre du parallélisme et du Calculs Haute Performance (nœuds/processeurs/cœurs)
- réalisation d'études de sensibilité multiparamétriques

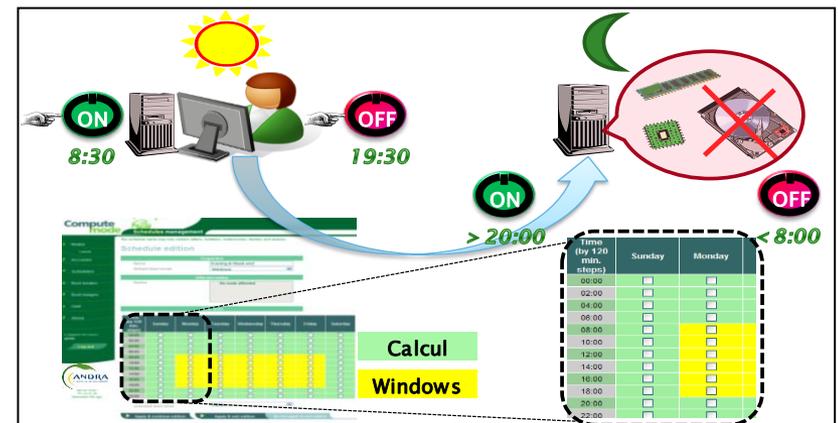
◆ Un moyen de référence : clusters de calcul Linux

- Renouvellement du cluster tous les 4 ans
- Puissance disponible en 2014 : possibilité de mener 650 calculs en simultané



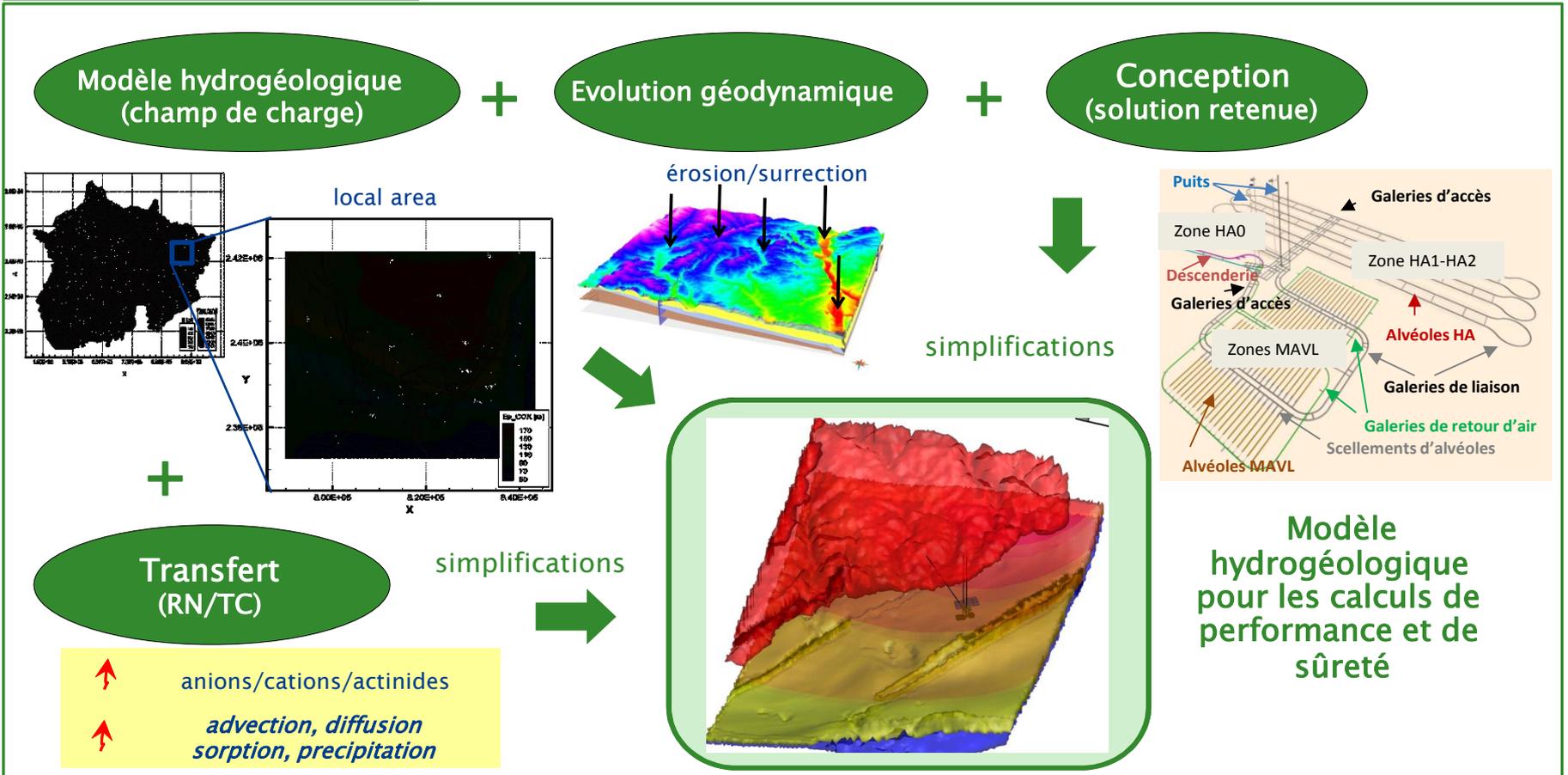
◆ Des moyens supplémentaires :

- Grille de calcul, basée sur la ressource bureautique de l'Agence
 - Augmentation de la puissance de calcul
 - Gestion des pics d'activité
 - Redondance avec le cluster
- PC performants
- Accès aux centres de calcul intensifs nationaux (GENCI)



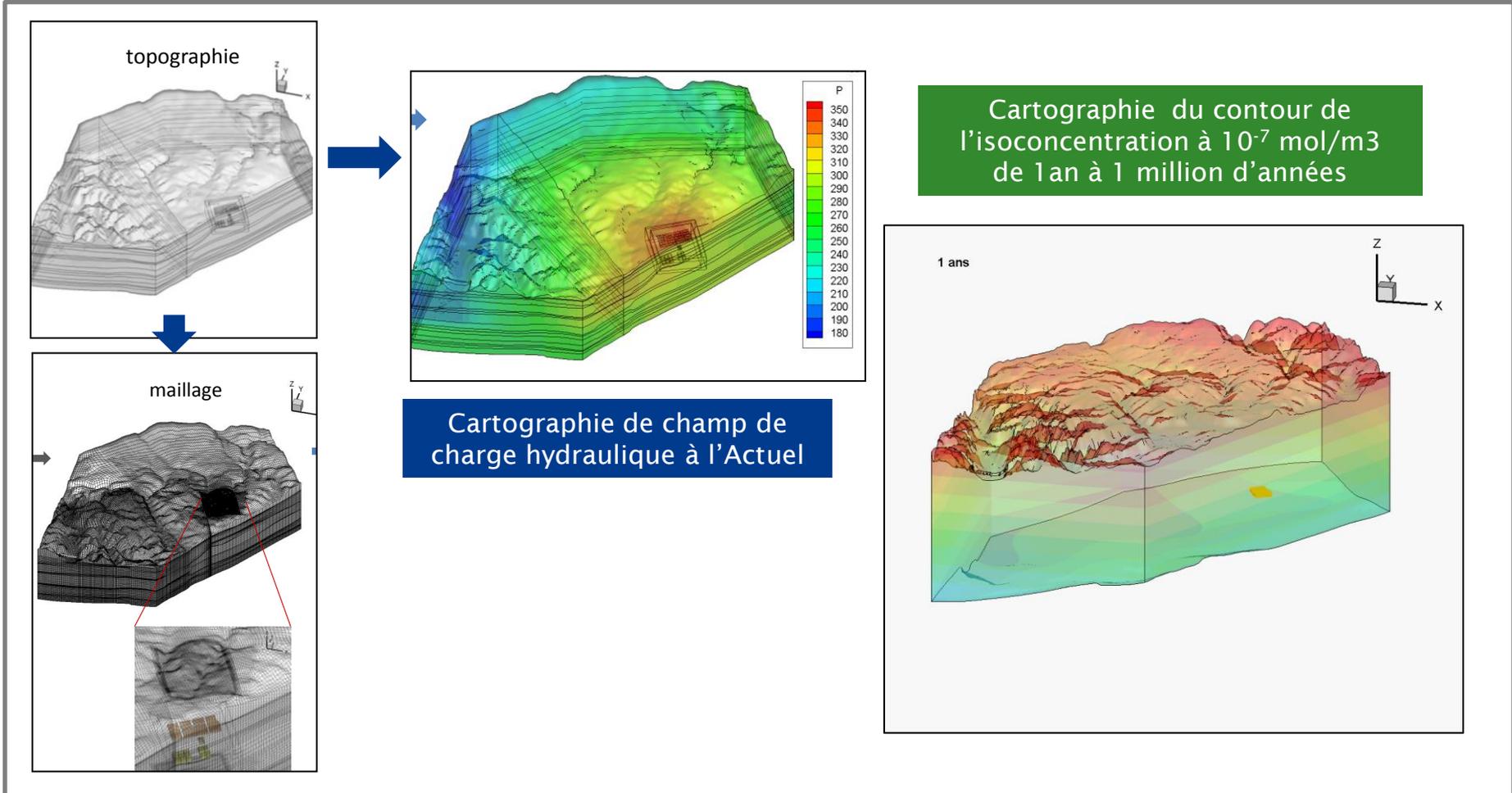
Modèle hydrogéologique et transfert des solutés pour les calculs de sûreté Cigéo (1/2)

Principe de construction

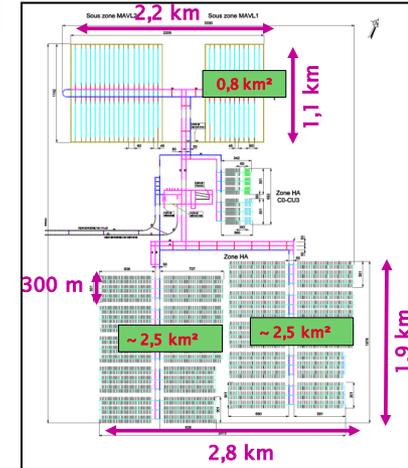
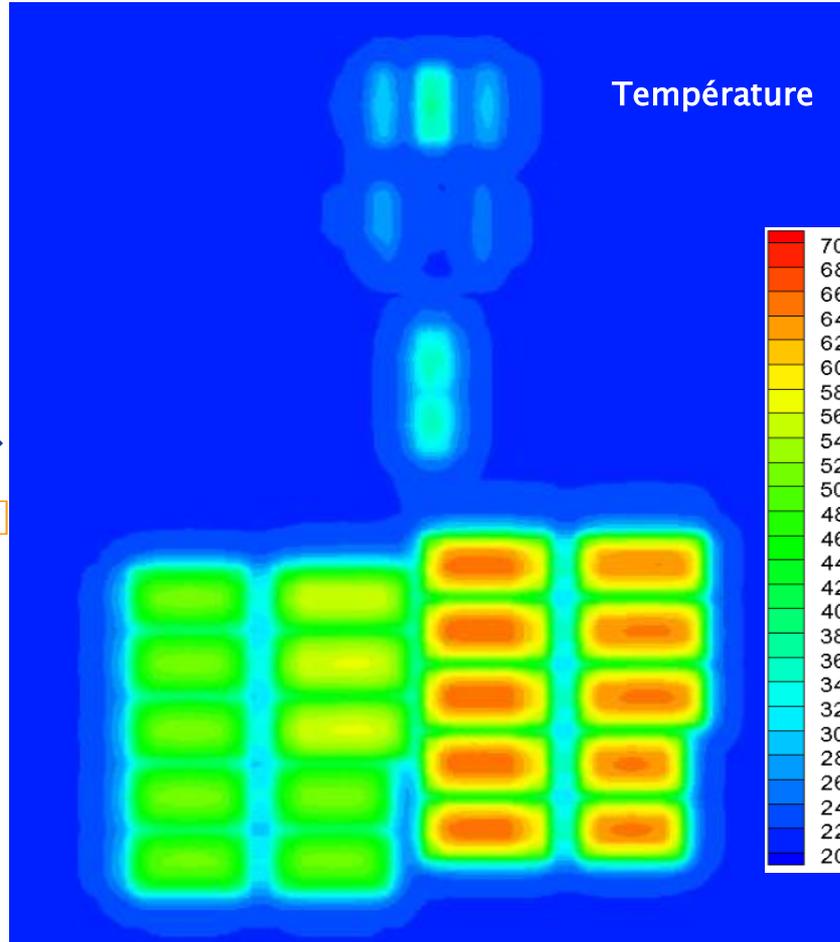
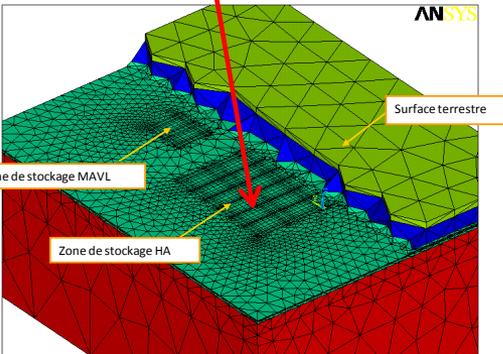
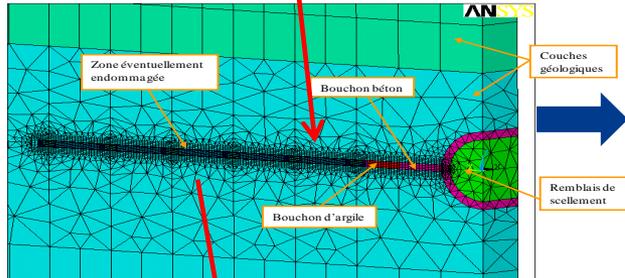
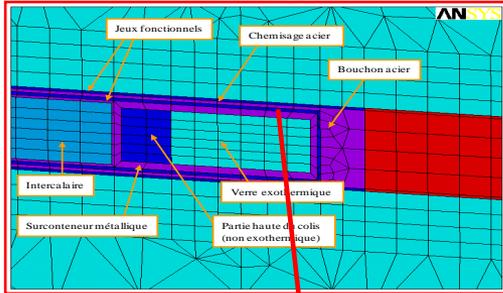


Modèle hydrogéologique et transfert des solutés pour les calculs de sûreté Cigéo '2/2)

Résultats



Evaluation de la charge thermique du stockage Cigéo (cas Dossier 2005T)



Evaluation du transitoire thermo-hydraulique gaz dans le stockage Cigéo

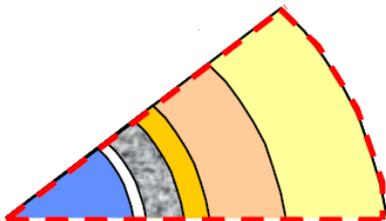
2005
(dossier 2005)

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



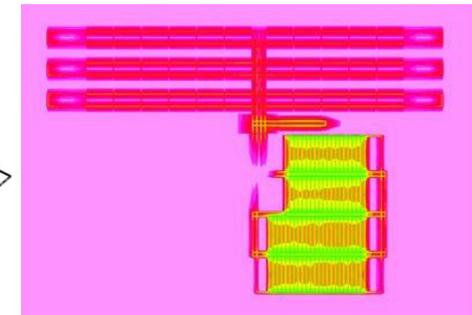
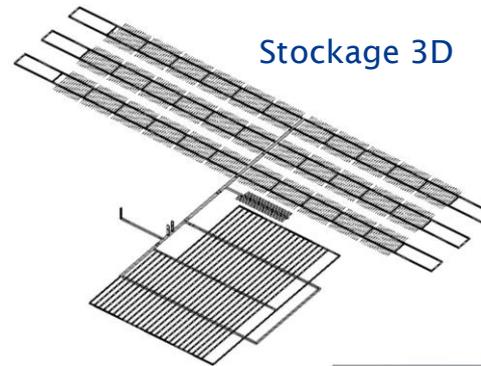
Tough2

Réalisation
AF-Consult
/Andra

2014
(évaluation esquisses)

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

Maillage 3D de 300.000 éléments
Temps CPU = 15 jours



SL: 0 0.2 0.4 0.6 0.8 0.9 0.95 0.96 0.97 0.98 0.99 0.995 0.999 1

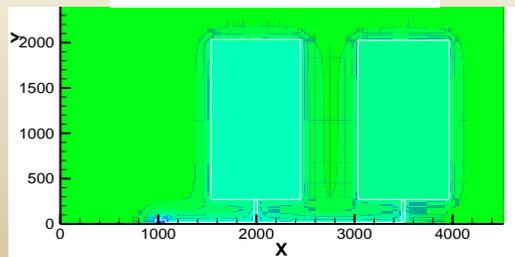
Tough2 //

Cartographie de saturation en eau des ouvrages à 1000 ans

Evaluation du transfert de solutés dans le stockage Cigéo

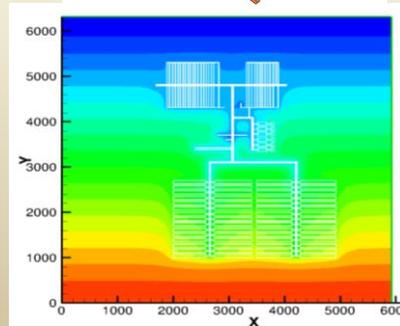
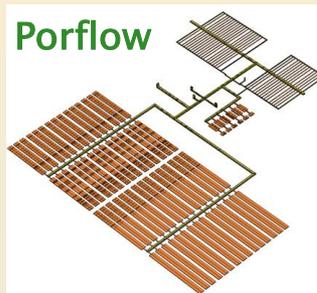
2005
(dossier 2005)

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



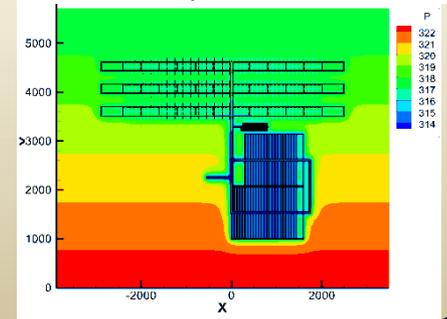
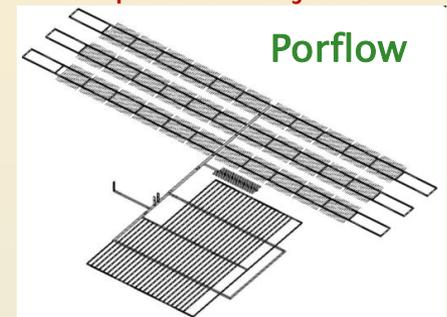
2009
(choix ZIRA)

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



2012
(comparaison esquisses)

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





La R&D de demain pour Cigéo

Un accompagnement de l'évolution du projet Cigéo par la R&D depuis plus de 20 ans

- ◆ Apporter des réponses aux grandes étapes
- ◆ Fonder les décisions sur des bases scientifiques et technologiques solides

Une politique et une démarche de R&D basées sur la rigueur, l'excellence et la transparence

- ◆ Exigences vis-à-vis des acteurs internes et externes à l'Andra
 - Instances d'évaluation, monde scientifique, public...

Un large spectre de domaines scientifiques et technologiques couverts

- Sciences de la terre, Sciences des matériaux, Sciences de l'environnement, Génie civil, Mathématiques, Métrologie, Numérique, Informatique...

Le développement d'outils en propre exceptionnels

- ◆ La laboratoire souterrain et l'OPE avec l'écothèque,

Si Cigéo est accepté, sa mise en œuvre industrielle n'est pas une fin, mais une continuité pour la R&D

- ◆ Une installation unique, notamment par sa durée et l'exigence d'une compréhension de son fonctionnement
 - Environ 100 ans d'exploitation (> 2100)
 - Développement progressif dans le temps : verres HA1/2 vers 2075...

- ◆ Un accompagnement par la recherche au fur et à mesure du développement de Cigéo
 - Maintenir les connaissances au meilleur de l'état de l'art
 - 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 à l'information et au dialogue avec toutes les parties prenantes

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

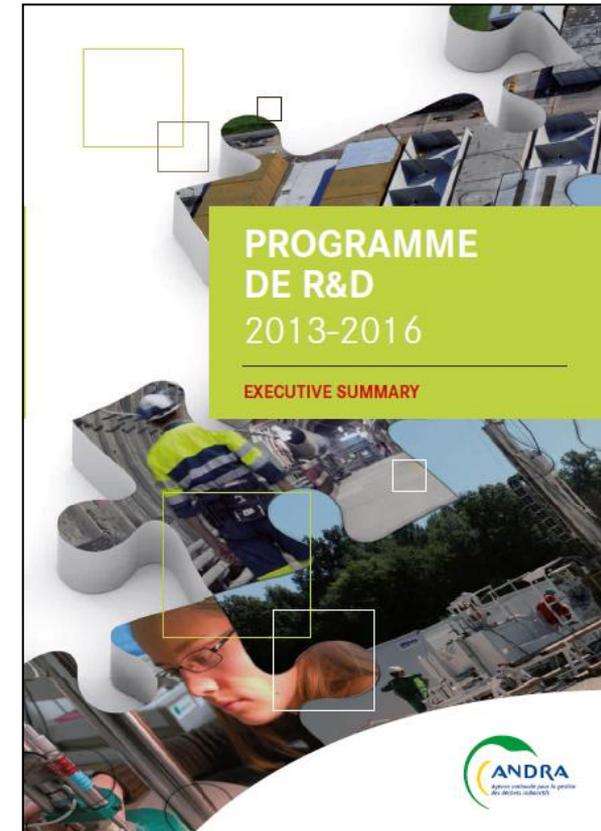
- ◆ Optimiser la conception/construction du stockage
- ◆ Accroître la prédictibilité du fonctionnement du stockage, préparer le plan de surveillance et évaluer la flexibilité du stockage

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

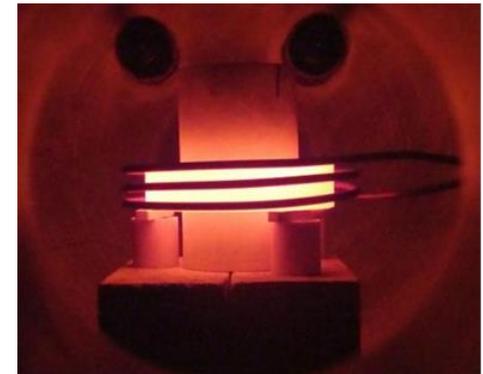
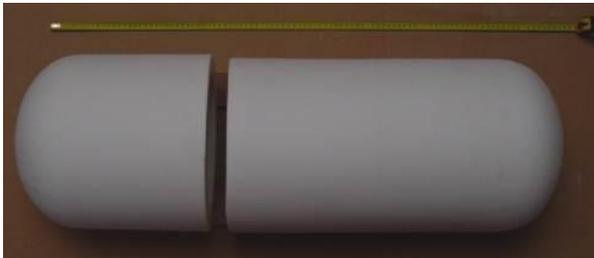


Contexte

- ◆ Remplacement des sur-conteneurs de déchets vitrifiés en acier bas carbone
 - Ne plus avoir de production d'hydrogène par corrosion anoxique de l'acier
 - Simplification de la démonstration de sûreté

Las activités de R&D passées : étude de préfaçabilité

- ◆ Mise au point d'un procédé de fabrication de pièces céramiques épaisses (40 mm)
 - Choix d'une céramique alumino-silicatée
- ◆ Fabrication d'un sur-conteneur échelle ½
- ◆ Essais de scellement par chauffage induction (1100°C)



Les axes de R&D futurs

- ◆ Collage/soudure à basse température (600-700°C)
 - Technologie micro-ondes + verres
- ◆ Résistances chimique et mécanique des zones de scellements
- ◆ Pré-développement de procédés de fabrication de sur-conteneurs échelle 1

Une politique d'excellence fondée sur

- ◆ des partenariats avec les grands organismes de recherche français
- ◆ des coopérations internationales,
 - notamment avec des agences et instituts européens



...

- ◆ la participation aux Programmes de Recherche et Développement de l'Union Européenne
- ◆ la participations aux activités des organismes internationaux (AEN, AIEA)
- ◆ les publications de rang A, les thèses de doctorat, et la participation aux colloques scientifiques

