



# La microstructure des roches et sols : un pont entre les processus fondamentaux « petites échelles » et leur comportement multi-échelles

Jean-Charles ROBINET

Andra – Direction R&D

Journée scientifique et technique CFMR et CFMS

25/10/2018

# Les missions de l'Andra

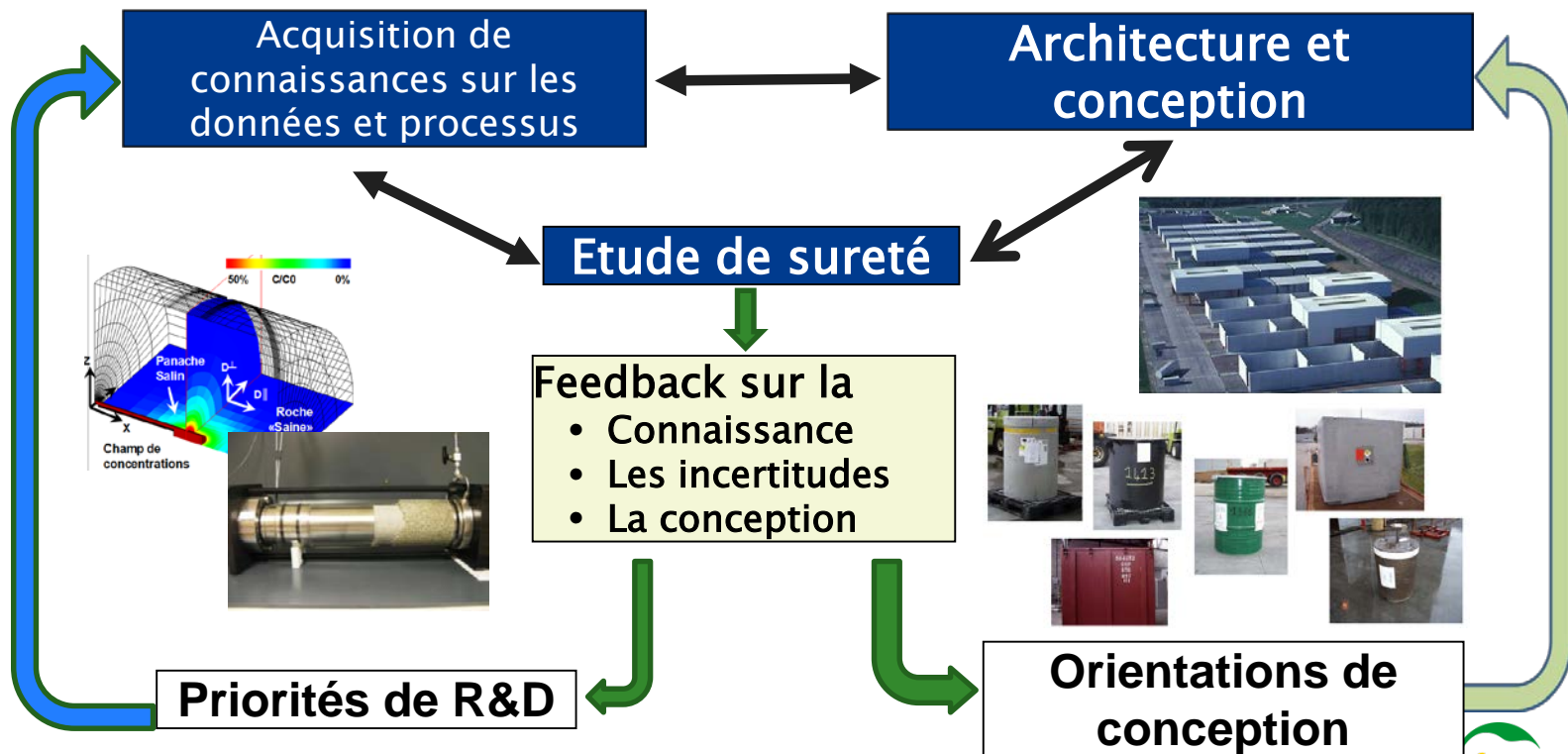
## Mission générale

Trouver, mettre en œuvre et garantir des solutions de gestion sûres pour l'ensemble des déchets radioactifs français afin de protéger les générations présentes et futures du risque que ces déchets peuvent présenter.

## Mission associées

- Conception des stockages
  - Architecture des stockages
  - Sûreté des stockages
    - Démonstration de sûreté (exploitation et post-fermeture) des installations
    - Evaluation des impacts humains et environnementaux
  - Maîtrise des coûts
    - Optimisation technico-économique (en regard des exigences de sûreté)
- Exploitation et surveillance des stockages
  - Exploitation d'Installations Nucléaires de Base (INB)
  - Opération de génie civil en milieu souterrain et en surface
  - Maîtrise des rejets et impacts environnementaux

# Vue générale du processus interactif entre science, conception et sûreté



# Les missions de l'Andra



Centre de stockage  
de la Manche



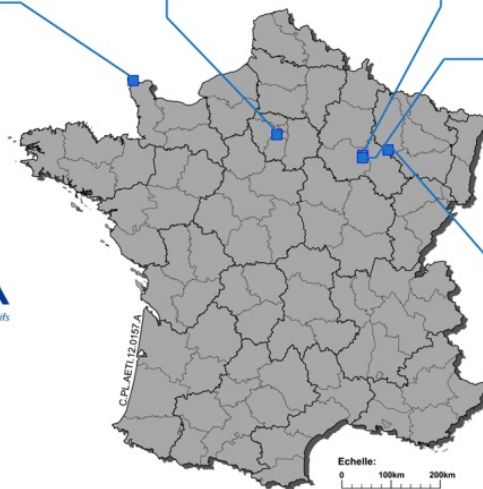
Siège social



Centre de stockage de l'Aube



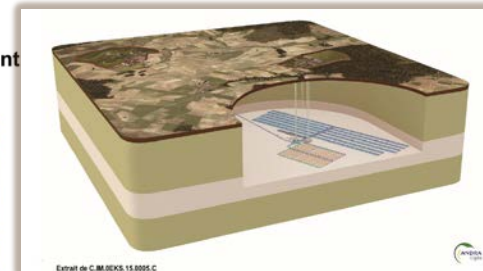
Projet de 3<sup>ème</sup> Centre dans l'Aube



Centre industriel de regroupement  
d'entreposage et de stockage



Centre de  
Meuse / Haute-Marne

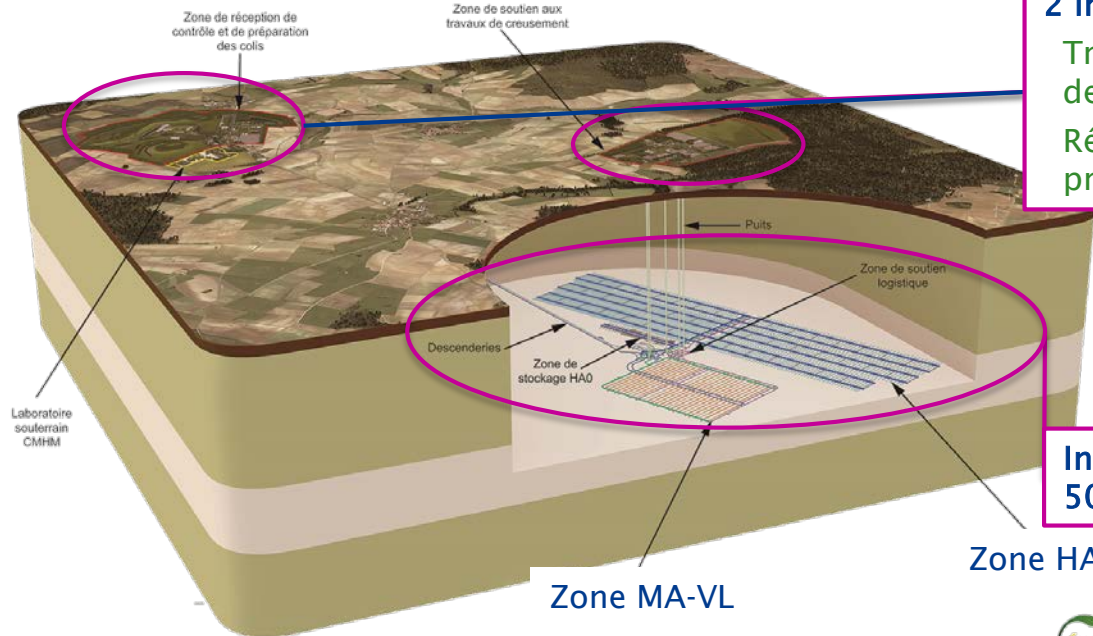
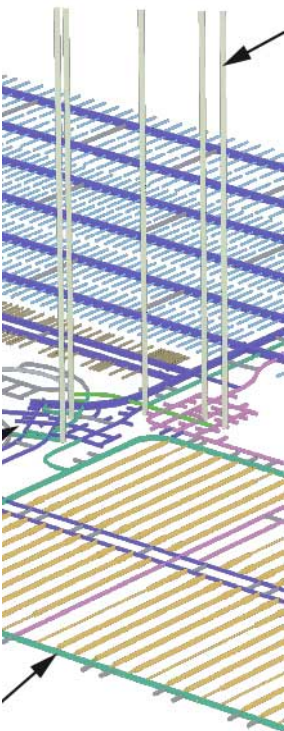


Projet Cigéo



# Le projet Cigéo

## Schéma de principe des futures installations



### 2 installations de surface

Travaux de creusement et de construction

Réception, contrôle et préparation des colis

Installation souterraine à 500 m de profondeur

Zone HA

Zone MA-VL

C.IM.0EKS.15.0005.C

DRD/TR/18-0032

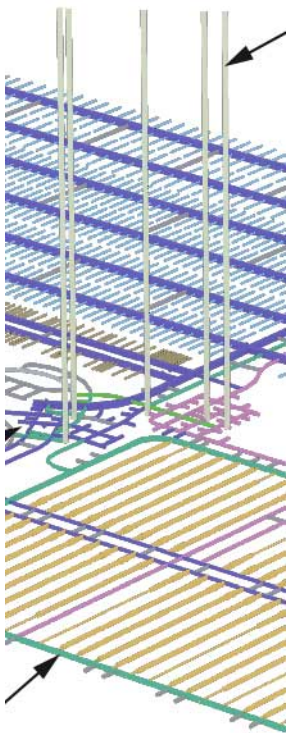
Echelle des ouvrages non respectée.  
Pendage des formations géologiques non représenté.



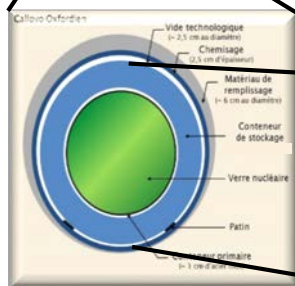
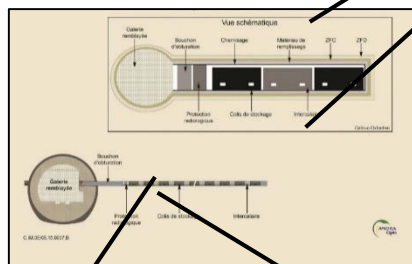
# Le projet Cigéo

## Schéma de principe des futures installations (2/2)

### Architecture fond de Cigéo



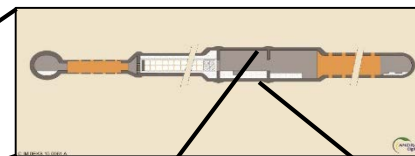
### Alvéole HAVL



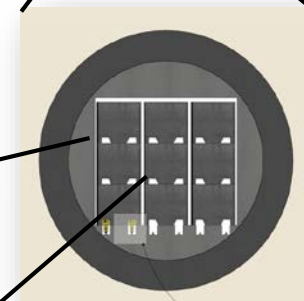
### Colis HAVL



### Alvéole MAVL



### Colis MAVL



# Le projet Cigéo

## Les fonctions de sûreté

### Fonctions de sûreté en exploitation

Confiner les substances radioactives

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

Protéger les personnes contre l'exposition aux rayonnements ionisants

Evacuer la puissance thermique des déchets

Evacuer les gaz formés par radiolyse ou corrosion

### Fonctions de sûreté après-fermeture

1. Isoler

2. Confiner

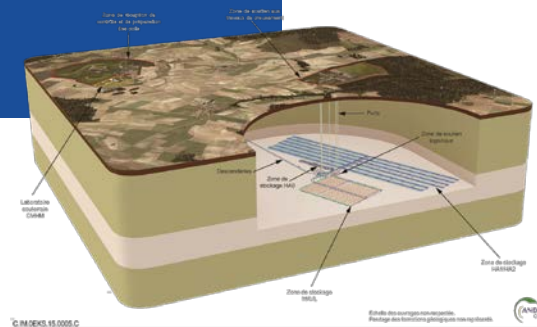
*/e. limiter le transfert par voie aqueuse, jusque dans la biosphère*

S'opposer à la circulation d'eau

Limiter le relâchement des RN et les immobiliser dans le stockage

Retarder et atténuer la migration des RN

# Le comportement multi-processus



## L'évaluation 4D du comportement de Cigéo :

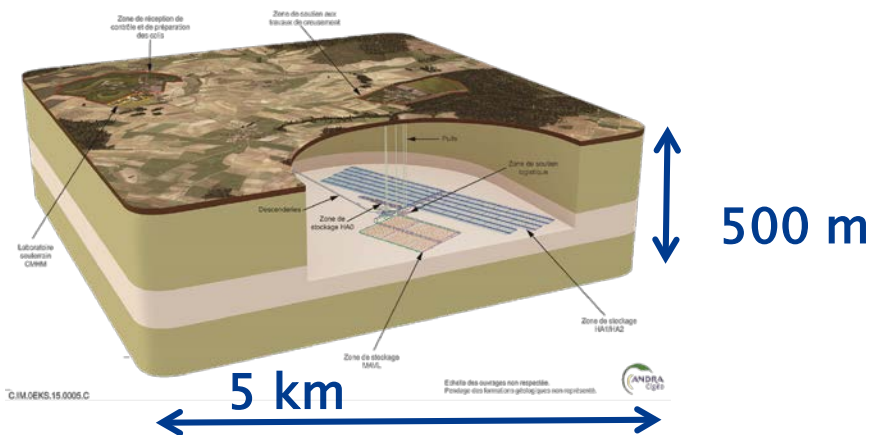
- Migration des radionucléides
- Thermo-Hydro-Mécanique-Chimique

## Nécessaire à la démonstration de sûreté et supporte les optimisations de conception

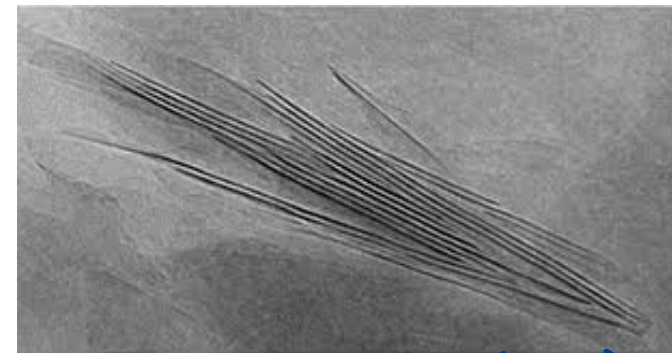
- Justification/robustesse des représentations
- Amélioration des représentations



# Une problématique multi-échelle



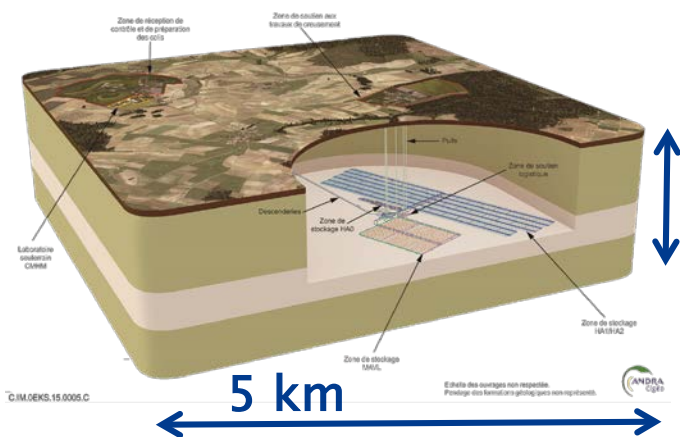
“Echelle de l’ouvrage”



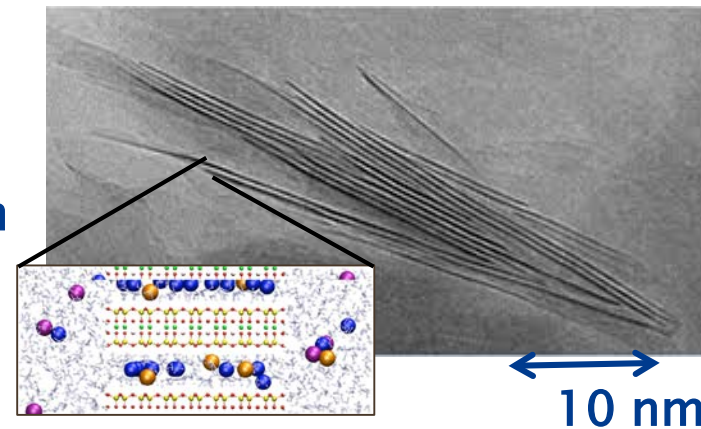
10 nm

“Echelle des processus fondamentaux”

# Une problématique multi-échelle

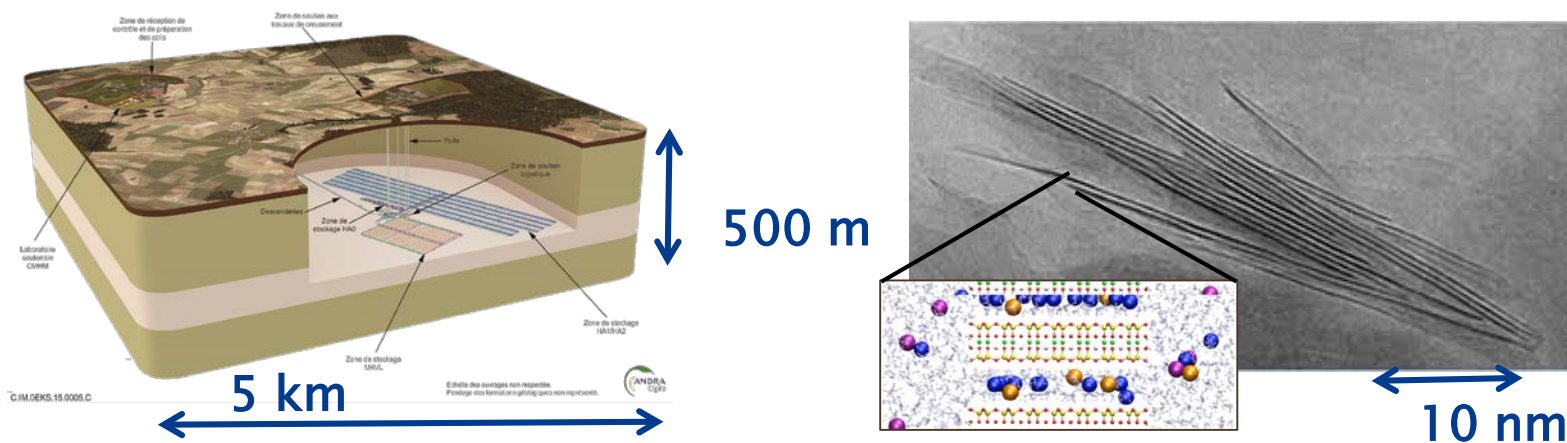


“Echelle de l’ouvrage”



“Echelle des processus fondamentaux”

# Une problématique multi-échelle

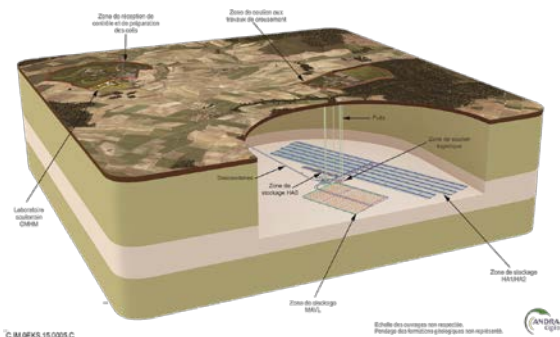


“Echelle de l’ouvrage”

“Echelle des processus fondamentaux”

Facteur d'échelle  $> 10^9$

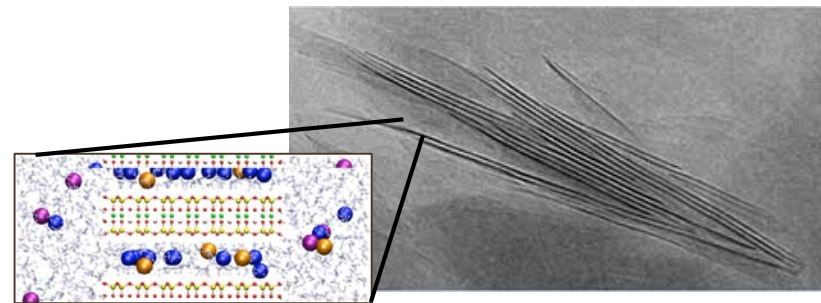
# Une problématique multi-échelle



“Echelle de l’ouvrage”

Carotte d’argilites

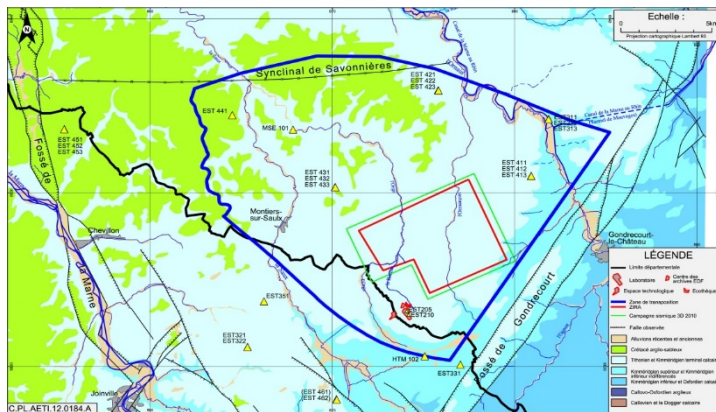
~ 10 cm



“Echelle des processus fondamentaux”

**Echelle macroscopique** : point de départ de nombreuses acquisitions expérimentales (paramètres et comportement THMC)

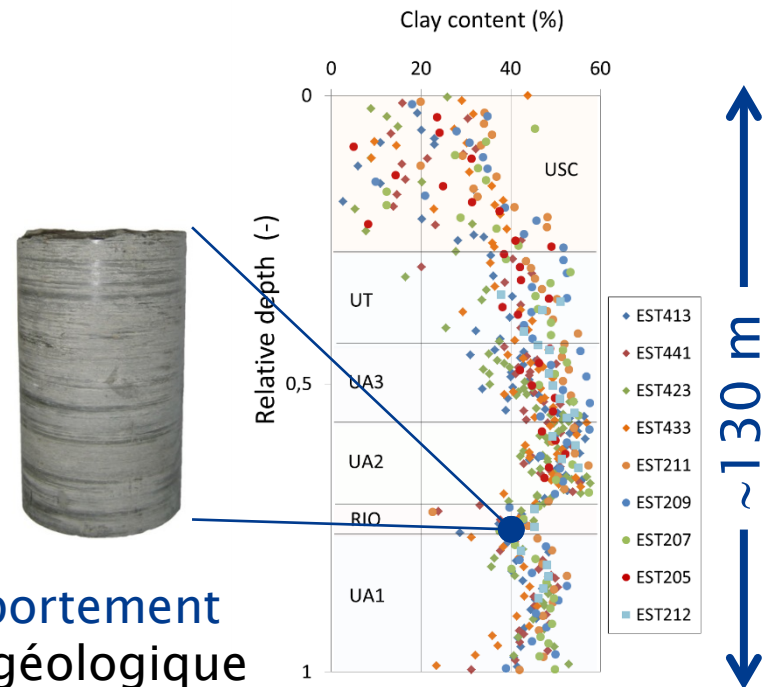
# Intégration de la variabilité naturelle des roches



ZT ~250 km<sup>2</sup>

Zira ~ 50 km<sup>2</sup>

Evolution des paramètres et comportement  
THM en fonction de la variabilité géologique



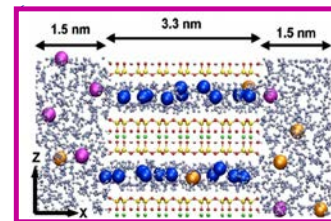
# Intégration multi-échelle des processus



~10 cm

Comportement  
macroscopique

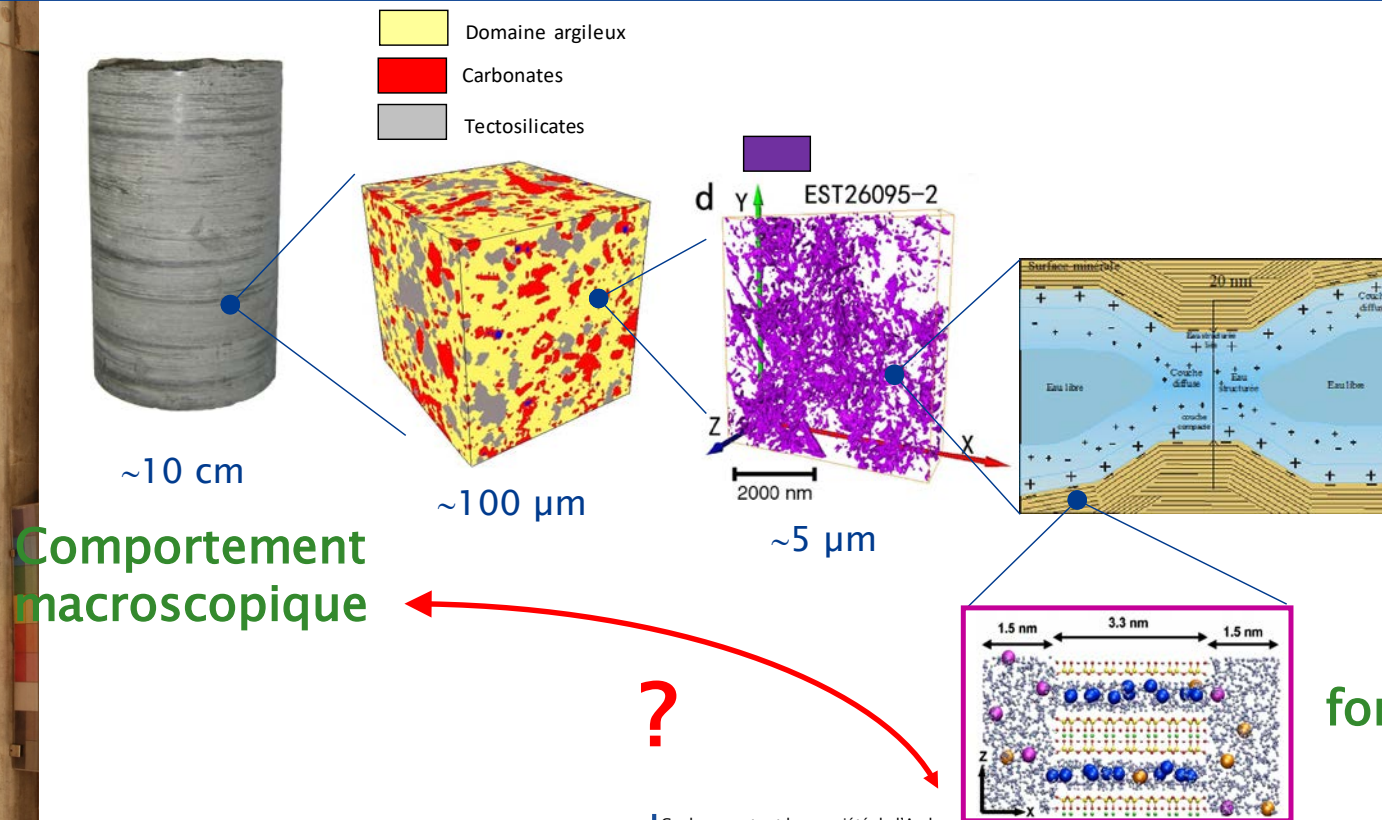
?



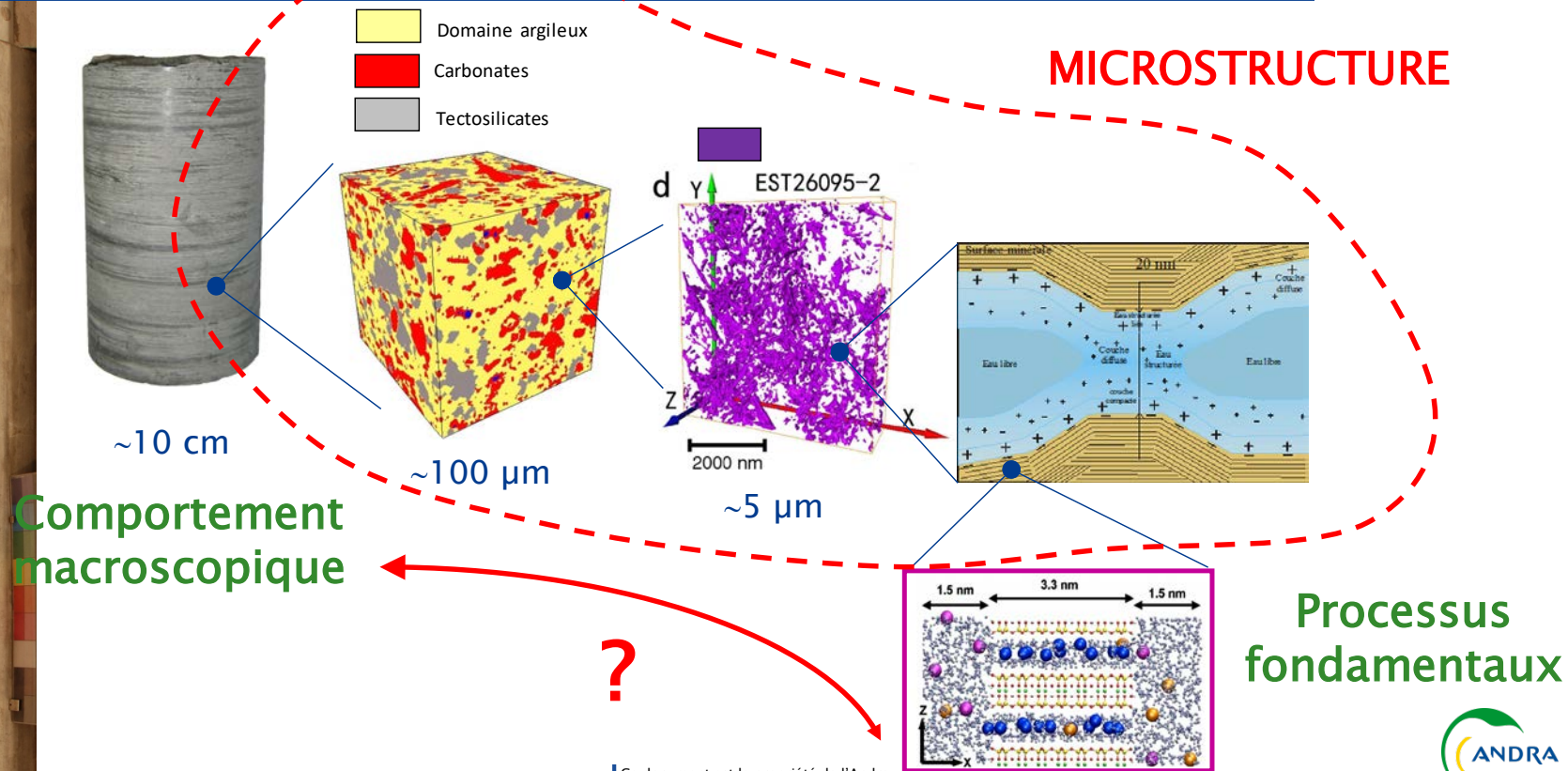
Processus  
fondamentaux



# Intégration multi-échelle des processus

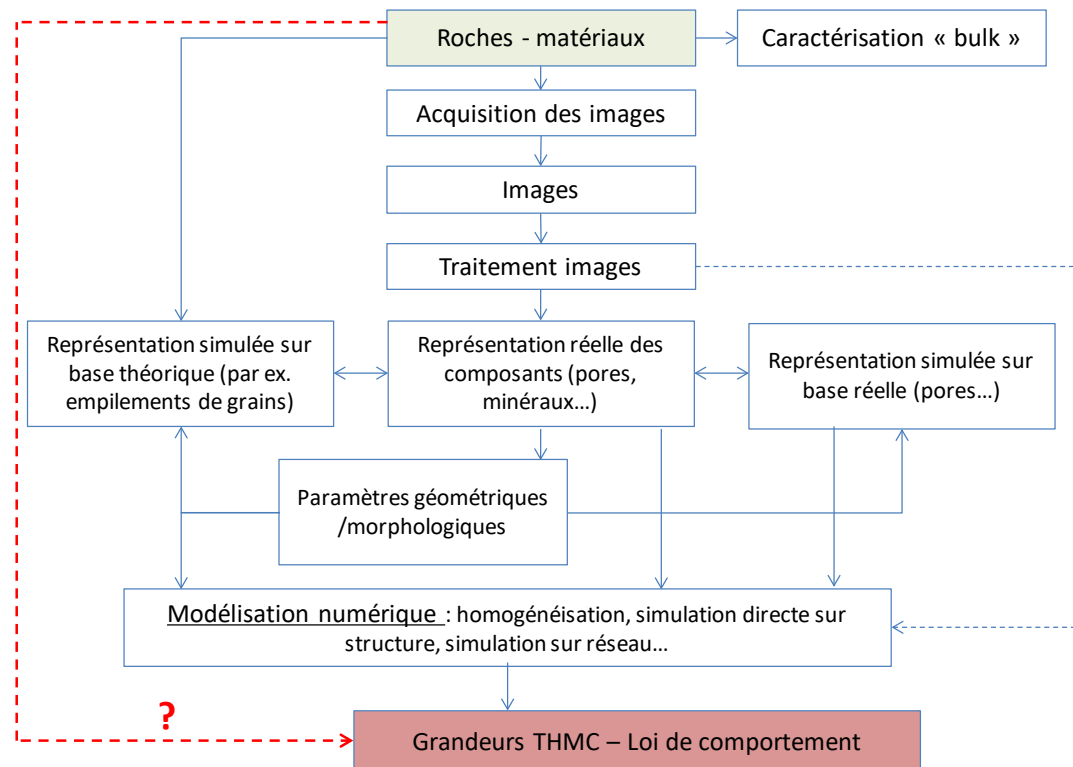


# La microstructure : le pont nano ↔ macro

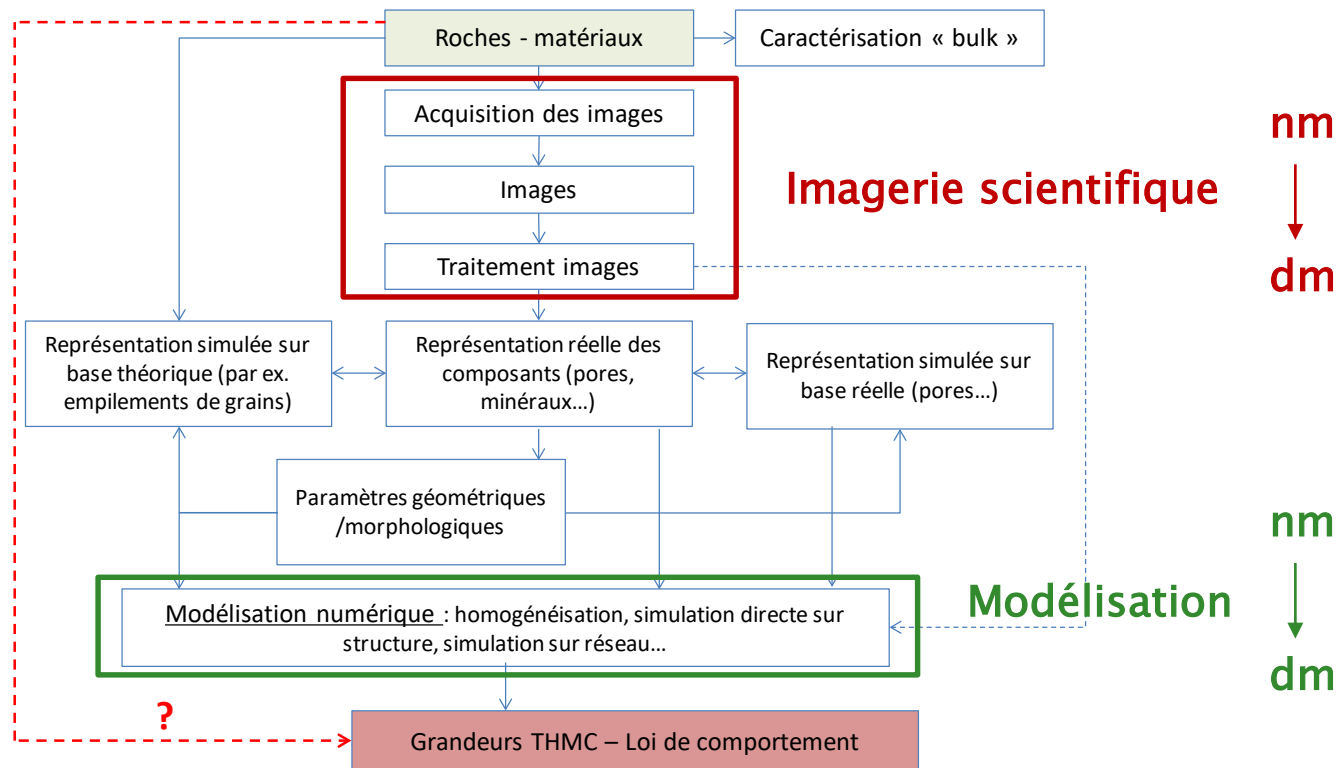




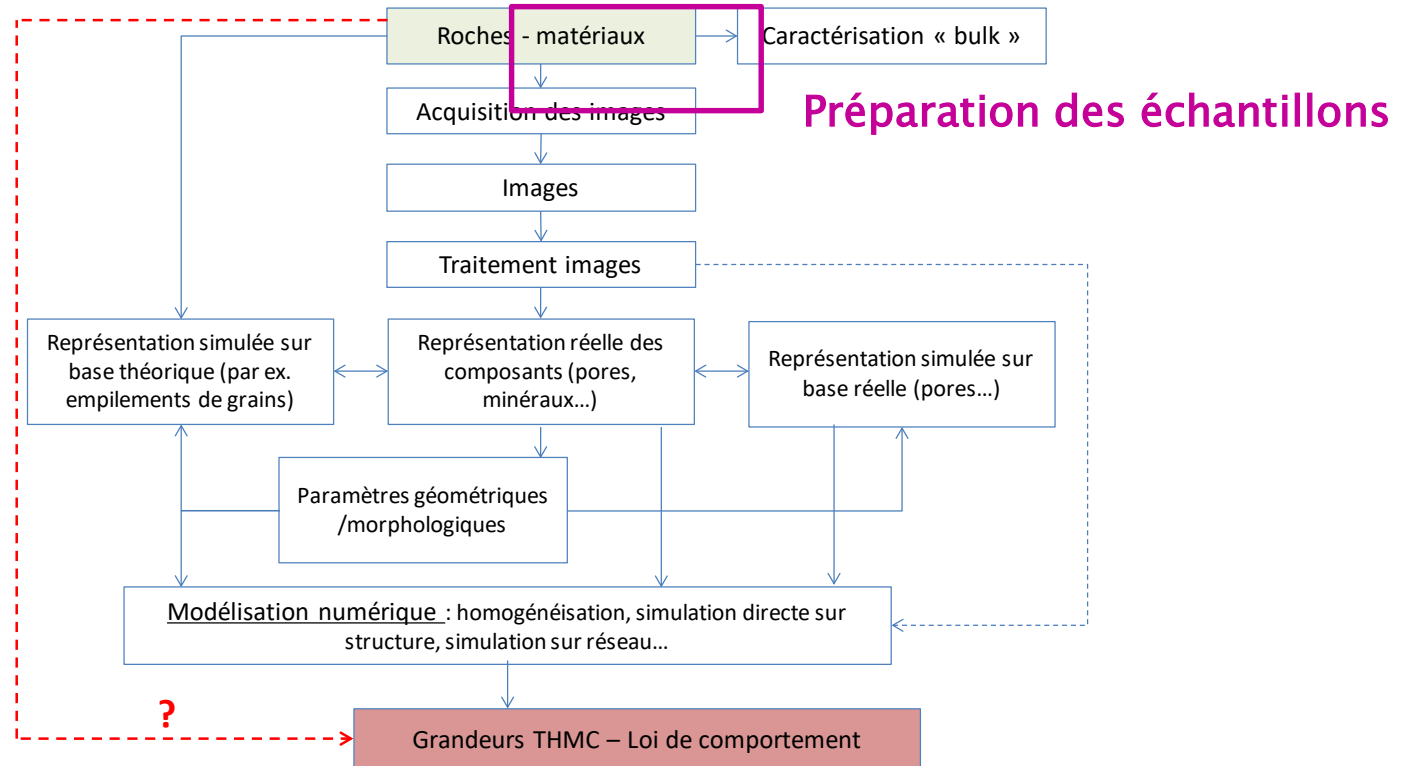
# Workflow du passage nano ↔ macro



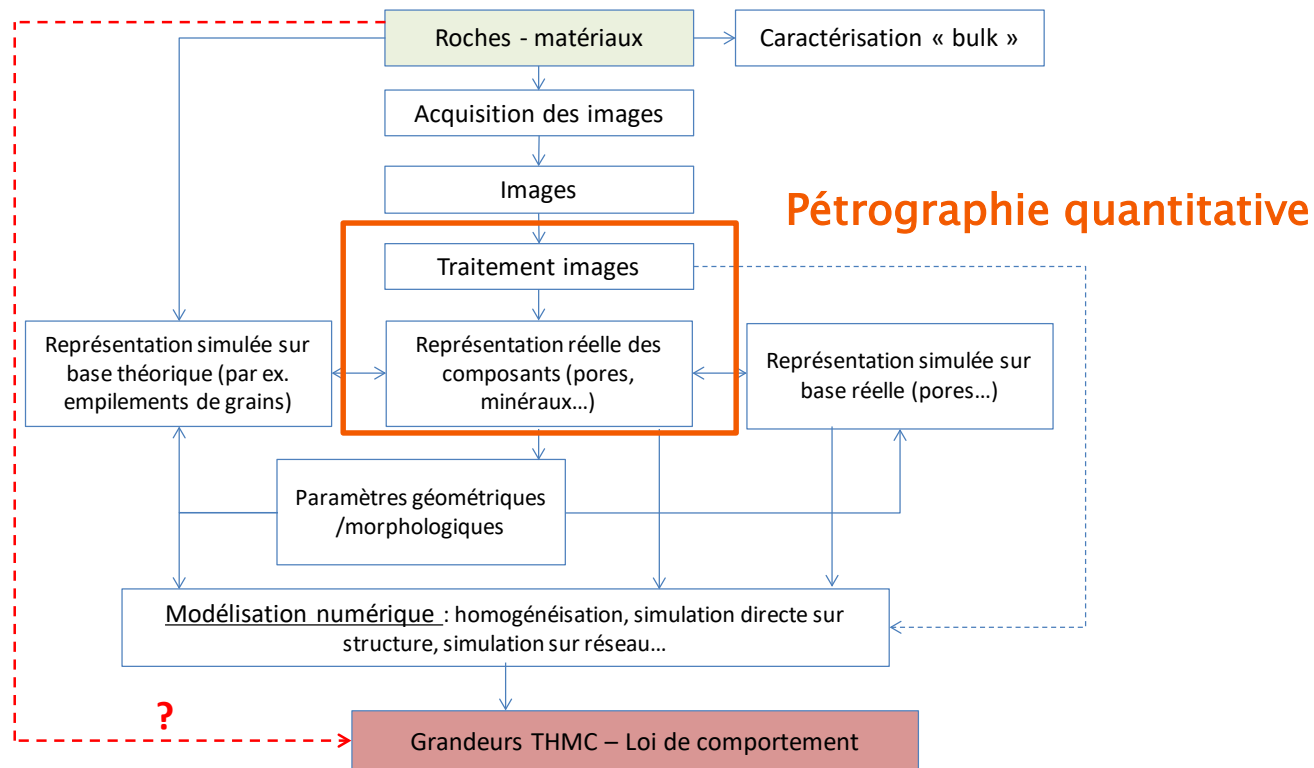
# Workflow du passage nano ↔ macro



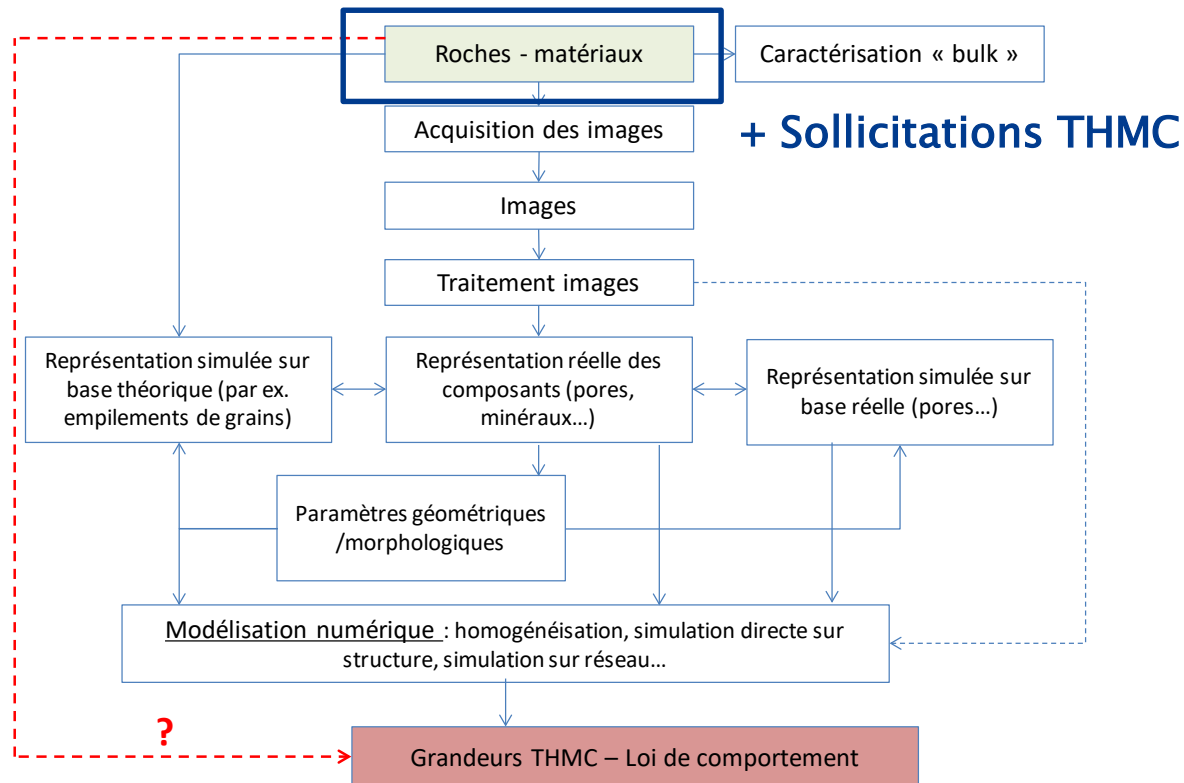
# Workflow du passage nano ↔ macro



# Workflow du passage nano ↔ macro



# Workflow du passage nano ↔ macro



# Contexte de mise en œuvre

Un large ensemble de connaissances a été acquis par l'Andra afin de caractériser la microstructure multi-échelle des argilites du Callovo-Oxfordien et la relier aux propriétés THMC

- Programme R&D Andra (GL, thèses...)
- Groupement de Recherche Forpro,
- Groupes internationaux : NEA/OCDE Clay-Club
- Projet Fédérateur NEEDS MIPOR

# NEEDS MIPOR

## Le Projet Fédérateur **NEEDS MIPOR** (Milieux POREux)

- 6 partenaires : CNRS, Andra, CEA, IRSN, EDF et BRGM
- Conseil Scientifique constitué d'experts parmi les partenaires
- Finance des projets émergents/structurants de 1 à 3 ans sélectionnés par Appels à Projets (ciblés ou non)
- 42 projets depuis 2013



# NEEDS MIPOR – Les axes scientifiques

- La caractérisation **multi-échelle** et **continue** en échelles de la structure interne des matériaux argileux et cimentaires
- La caractérisation expérimentale **multi-échelle** du comportement **THMC** (imagerie sous sollicitations, expérimentations)
- La représentation numérique **multi-échelles** et **multi-processus THMC**

## Sollicitations

Thermique

Hydraulique

Mécanique

Chimie

Gaz

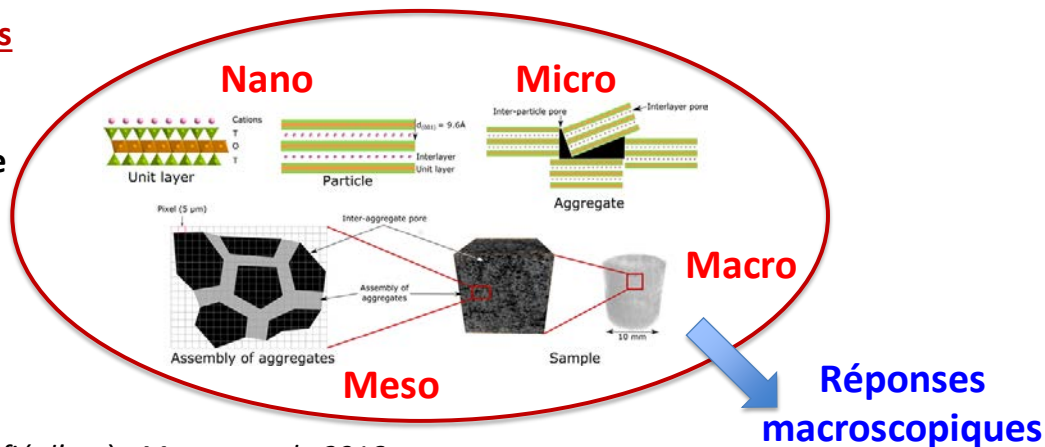


Schéma modifié d'après Massat et al., 2016



# NEEDS MIPOR – La stratégie scientifique

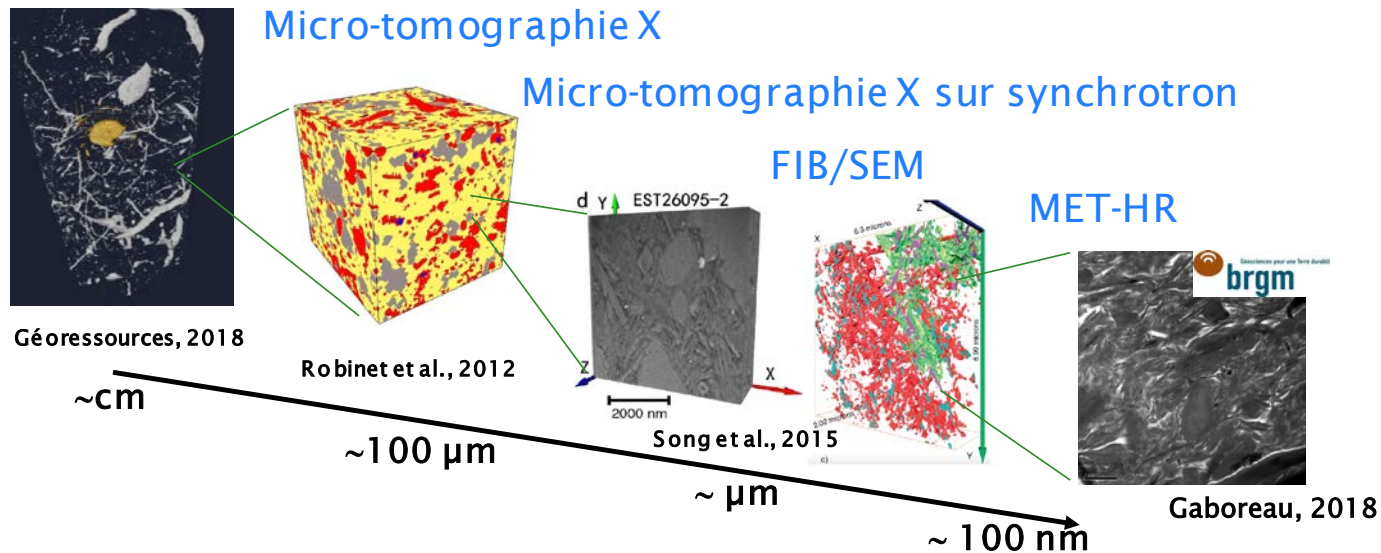
- Des approches **innovantes** et en **rupture scientifique**
- Une démarche **commune** pour les matériaux cimentaires et argileux (intégration de matériaux cimentaires en 2015)
- Une **synergie** importante entre les 3 thématiques scientifiques (modélisations/expériences) et les processus THMC



**Nécessite une communauté scientifique multi-disciplinaire  
et une structuration des échanges  
pour amener des collaborations entre communautés**

# De la structure multi-échelle des argilites...

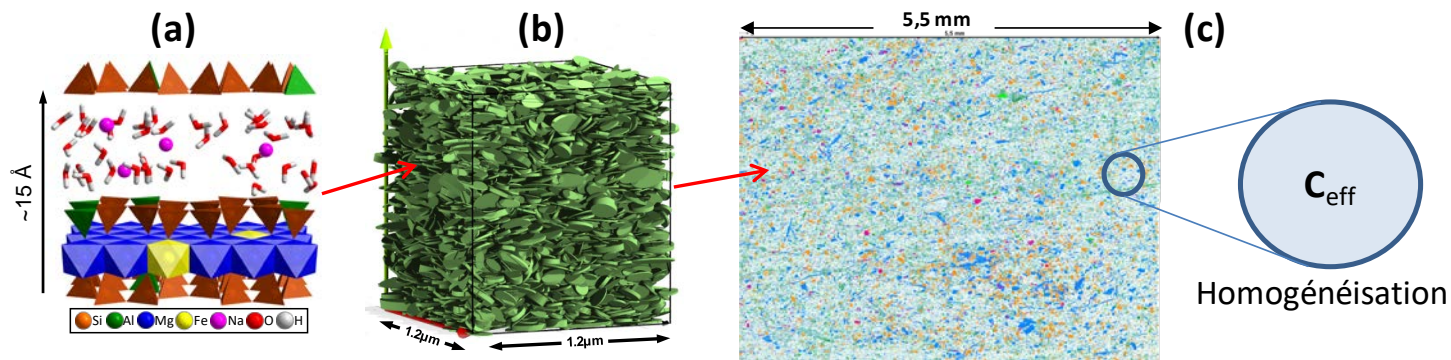
## D'une acquisition 3D en continue...



**L'innovation** en imagerie scientifique est l'un des moteurs clés des avancées réalisées

# ... vers la modélisation THMC

... à la construction d'une représentation 3D en continu support à la modélisation numérique



Projet TRANSREACT :

- Imagerie
- Génération de milieux poreux
- Schéma d'homogénéisation
- Modélisation



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



# ... vers la modélisation THMC

## Les grands résultats

- **Le rôle de la « mesostructure » sur les propriétés macroscopiques**
  - Propriétés diffusives
  - Propriétés élastiques
  - Propriétés thermiques
- **Le rôle de la géométrie du réseau de pore sur les propriétés macroscopiques**
  - Conductivité hydraulique
  - Transfert de gaz (percolation au gaz, pression d'entrée...)
  - Propriétés de rétention d'eau
- **Le passage de l'échelle macro à l'échelle de la formation**
  - Relation porosité/minéralogie
  - Histoire diagénétique (chimique vs. Physique) → structuration porale
  - Relation paramètres élastiques et minéralogie (+ porosité)

# ... vers la modélisation THMC

## Les grands résultats

- **Le rôle de la « mesostructure » sur les propriétés macroscopiques**
  - Propriétés diffusives
  - Propriétés élastiques
  - Propriétés thermiques
- **Le rôle de la géométrie du réseau de pore sur les propriétés macroscopiques**
  - Conductivité hydraulique
  - Transfert de gaz (percolation au gaz, pression d'entrée...)
  - Propriétés de rétention d'eau
- **Le passage de l'échelle macro à l'échelle de la formation**
  - Relation porosité/minéralogie
  - Histoire diagénétique (chimique vs. Physique) → structuration porale
  - Relation paramètres élastiques et minéralogie (+ porosité)



# De la microstructure vers la modélisation THMC

## Les enjeux scientifiques

- **La représentation aux « petites échelles »**
  - Echelle des interfaces pores/solides
  - Interface pores interfoliaire vs. Pores interparticulaire
- **La simulation aux (très) petites échelles (nm -  $\mu\text{m}$ )**
  - Mécanique et hydraulique (état insaturé) aux échelles moléculaires
  - Interface interfoliaire/inter-particulaire et pores/solides → Evolution long terme
  - Réponse de structures « réelles » à des champs contraintes
- **Couplage chimie-mécanique en milieux nano-confinés et chargés**
  - Interactions entre particules argileuses (pression de disjonction)
  - Prise en compte des interactions électrostatiques (ion et eau)
- **La présentation numérique en continue nm – macro**
  - Microstructures réelles → modèles stochastiques

# La caractérisation des phénomènes THMC à toutes les échelles

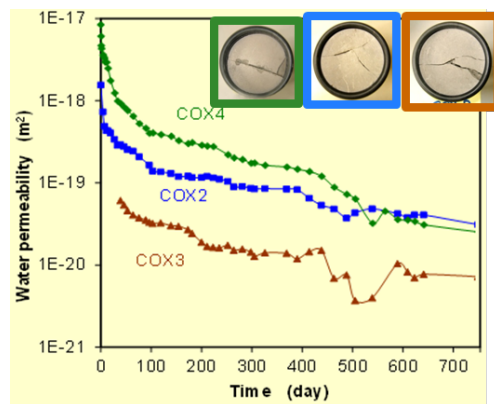
## Imagerie scientifique sous sollicitations THMC

- Particulièrement adaptée aux problématiques HM
  - Evolution de la microstructure 3D sous différentes sollicitations macroscopiques
    - Calculs de champs de déformations
    - Information 4D
  - Confrontation directe modèles et données à toutes les échelles
- D'importantes avancées ont été réalisées ces 10-15 dernières années
  - En tomographie laboratoire et synchrotron
  - En MEB environnementaux
  - Préservation des microstructures d'échantillons sollicités (post-mortem)
- Des enjeux pour les années à venir sur les très petites échelles ( $> \mu\text{m}$ )

# La caractérisation des phénomènes THMC à toutes les échelles - Illustrations

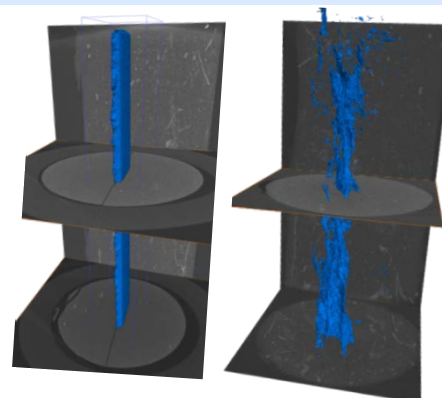
## Compréhension et représentation du phénomène d'auto-colmatage

### Diminution de la perméabilité sous hydratation



*Permeability tests - GRS*

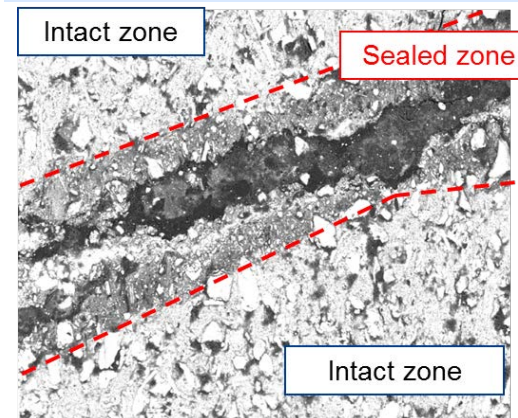
### Fermeture de fracture soumis à hydratation



Etat initial    Etat final - 72h

*X-ray tomography - Géoressources*

### Analyse du colmatage dans la micro-structure



*SEM - LML*



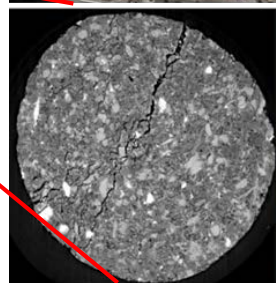
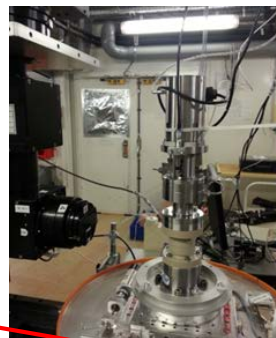


# La caractérisation des phénomènes THMC à toutes les échelles - Illustrations

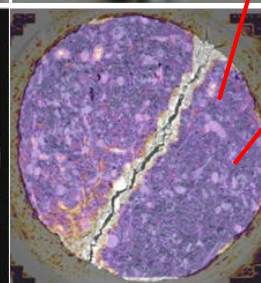
## Compréhension et représentation de mécanismes de déformation et endommagement



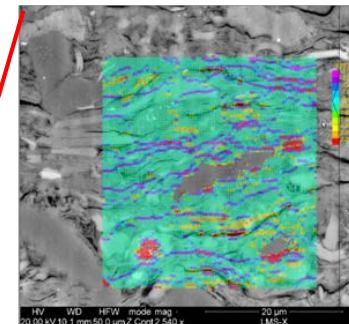
*Tomographie -  
Géoressources*



100µm



*MEB environnemental (Wang  
et al., 2014)*

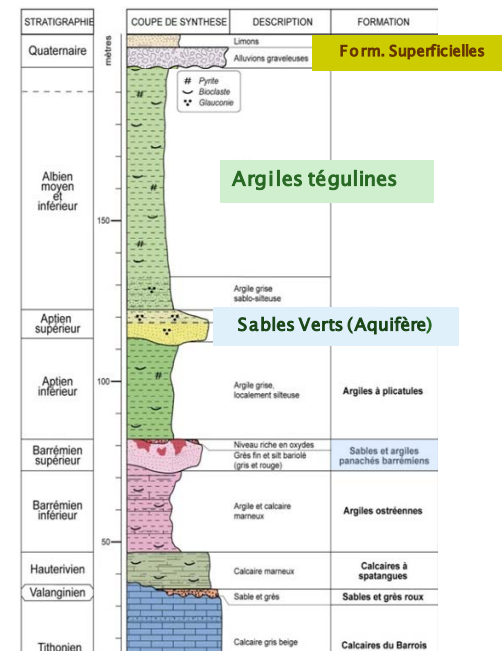


*Tomographie  
synchrotron - 3SR*

# Projet de 3<sup>ème</sup> Centre dans l'Aube

## Stockage en subsurface

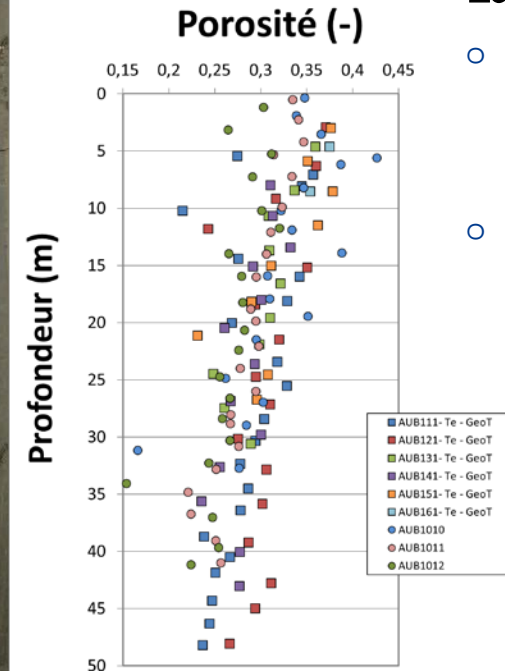
- Déchets FAVL et TFA aux comportements radiologiques et chimiques contrastés
- Plusieurs concepts de stockage entre 15 et 40 m de prof. à l'étude
  - Ciel ouvert /argiles remaniées
  - Galeries
- Site de l'Aube
  - Formation cible : **argiles téglines de l'Albien**
  - Campagne de caractérisation et reconnaissance depuis 2013.



# Projet de 3<sup>ème</sup> Centre dans l'Aube

## La représentation de la transition surface – profond

- Un continuum entre le sol et la roche saine
  - Effets des phénomènes de surface (physique et chimique)
  - Effet du « déconfinement » mécanique
- Evolution long terme du milieu géologique et du stockage
  - Géodynamique externe (érosion, géomorphologie, climat...)
  - Evolutions des propriétés THMC



### How Deep Is Soil?

Daniel D. Richter; Daniel Markewitz

*BioScience*, Vol. 45, No. 9. (Oct., 1995), pp. 600-609.

# Conclusions

## L'étude de la microstructure des roches/sols pour la problématique des stockages de déchets radioactifs

- Compréhension des paramètres THM et des domaines de fonctionnement (incertitudes, évolution espace - temps)
- Compréhension et représentation des phénomènes THM (ex. autocolmatage, hydratation...).
- Ponts entre modèles mathématiques/numériques et le milieu réel (sols ou roche)
  - Améliore la robustesse des lois de comportement (justification des hypothèses)
  - Identification des domaines de fonctionnement des modèles et de la transposabilité pour différents contextes de sollicitations
  - Amélioration des modèles /réduction des marges

**Partie intégrante du processus interactif entre science, conception et sûreté**