

# **Compte-rendu de la présentation des programmes de recherche de l'ANDRA dans le cadre du projet de stockage faisant appel à la modélisation et la simulation**

## **4 décembre 2012, Chatenay Malabry**

- **Organisation :**

La présentation s'est déroulée sur la journée du 4 décembre 2012 aux locaux de l'ANDRA, à Chatenay Malabry. Une dizaine de membres du CLIS étaient présents.

- **Les thèmes des présentations :**

Les présentations ont porté sur la modélisation et les simulations numériques, leurs domaines d'application, les limites, des cas concrets d'utilisation ... La journée s'est terminée sur un temps de discussion avec les différents intervenants de l'ANDRA présents.

Session introductive : la modélisation est un moyen indispensable à toute recherche actuelle : toute recherche est préparée en amont par la modélisation et la simulation, et en aval, ces dernières structurent et fédèrent l'ensemble des connaissances obtenues par toute recherche. L'ANDRA a réalisé de nombreux partenariats pour la modélisation/simulation, en particulier avec l'INRIA depuis 2010.

- **Modélisation et Activités de Simulation Numérique à l'ANDRA :**

La modélisation est une représentation conceptuelle des processus. La simulation numérique est une expérience virtuelle. Les limites viennent de l'utilisation d'équations physiques ou autres, des moyens informatiques et de l'approche par approximation (discrétisation), ce qui implique d'en faire une utilisation raisonnée.

La simulation numérique est utilisée dans 4 grands domaines d'application : la représentation du fonctionnement du stockage, l'analyse de sûreté, la conception des stockages et l'exploitation des stockages (observation-surveillance, gestion progressive).

En réponse aux membres du CLIS, il est précisé que les simulations dans le cadre du projet de stockage profond vont jusqu'à 1 M d'années. Le budget de fonctionnement pour ce qui concerne les recherches en simulation est d'environ 4 M d'€ par an sur un budget total de 17 M d'€ annuel.

Les activités de modélisation et simulation sont soit sous-traitées, soit menées en propres par l'ANDRA, suivant les thématiques. Ainsi, la sous-traitance représente environ 85 % des travaux de développement numérique d'outils et de représentation de l'évolution phénoménologique du fonctionnement phénoménologique du stockage. Afin de s'entourer des meilleurs compétences, les travaux sous-traités sont réalisées de multiples façons, au travers des partenariats, notamment celui avec l'INRIA par des appels à projets (tous les 3 ans), par des laboratoires universitaires, par des sociétés informatiques..., 1/3 de ces travaux sont ainsi menés par des entités étrangères. Cette multiplicité permet en outre d'avoir des points de vue extérieurs et des inter-comparaisons,

mais posent aussi le souci du renouvellement des équipes tous les 3 ans. L'ANDRA participe aussi à des programmes interdisciplinaires du CNRS, des projets nationaux ou des projets européens.

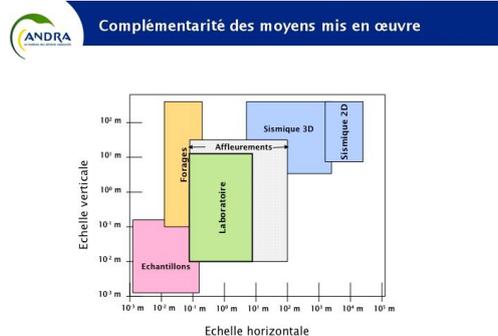
En matière de réalisation en propre, l'ANDRA s'occupe plus particulièrement de l'évaluation de performance et de sûreté, mais aussi du fonctionnement phénoménologique des stockages sur des thématiques particulières qui sont au cœur des évaluations de sûreté (hydraulique, transport de solutés, transport de gaz, transport réactif...). A l'ANDRA, il y a 9 unités de programme de simulation, chacune dédiée à une thématique et 20 ingénieurs y travaillent à plein temps.

Il y a 3 grands axes de recherche : la simulation des processus physiques, les méthodes numériques de résolution, et les méthodes d'analyse.

Les principaux acquis : hydraulique et transport de solutés sur le long terme à l'échelle du stockage, transitoire thermo-hydraulique-gaz sur l'ensemble du stockage, modèle hydrogéologique de l'échelle du Bassin parisien à l'échelle locale, comportement thermo-hydro-mécanique avec la charge thermique du stockage, évolution chimique des ouvrages de stockage ...

- **La Modélisation Géologique :**

Un modèle géologique est une représentation 3D cohérente de la géométrie et des propriétés du sous-sol. Il intègre les données issues des connaissances antérieures sur le contexte géologique du Bassin Parisien, celles acquises par les forages (échantillons pour des données à échelle micrométrique par exemple, diagraphies, tests hydrogéologiques ...), les données venant de la sismique réflexion 2D et 3D (géométrie des couches, failles, propriétés physiques des couches ...), des données de la cartographie structurale en surface, et enfin des données provenant des recherches dans le laboratoire souterrain (analyse à l'échelle décimétrique, endommagement, confinement, ingénierie ...).



*Chaque méthode utilisée donne des réponses à des échelles différentes et complémentaires*

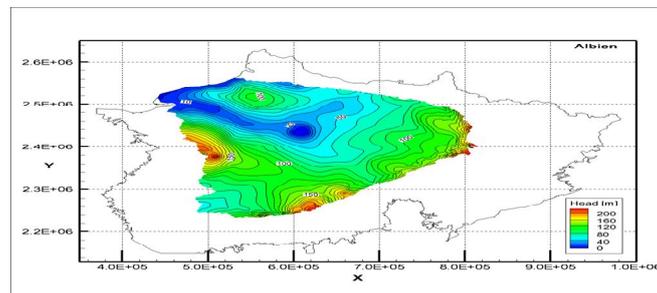
Les résultats donnent une couche globalement homogène mais avec une légère variabilité verticale.

Le modèle final reprend toutes les caractéristiques et a contribué en fonction de critères spécifiques, à définir l'emplacement de la ZIRA au sein de la Zone de Transposition. Mais il sert aussi pour la conception du stockage, les simulations hydrogéologiques en champ proche, les calculs de sûreté et pour l'information pour le débat public.

Sur la ZIRA, seules des méthodes non destructives (sismiques 2D et 3D) ont été utilisées tout en permettant l'acquisition de données tous les 10 m.

- **Objectifs et Enjeux du Modèle Hydrogéologique :**

Le but est de développer des concepts hydrogéologiques basés sur la compréhension des comportements des écoulements à plusieurs échelles espace/temps. Mais c'est aussi de développer des modèles numériques en support aux calculs et à l'analyse de sûreté et aux évaluations quantitatives des impacts. Le point de départ était la modélisation géologique du couvert sédimentaire à l'échelle du Bassin Parisien auquel ont été rajoutées les données de forages, sismiques 2/3D, des modélisations hydrogéologiques précédentes, des tests hydrauliques...

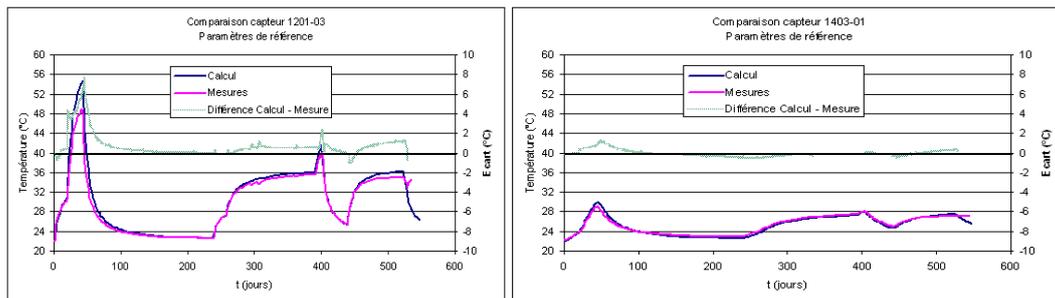


*Piézométrie simulée de la nappe de l'Albien*

Les couches importantes ici étaient le COx et ses encaissants dont les écoulements pourraient influencer le stockage CIGEO. Mais le défi était aussi de tenir compte du fait que la ZDT est partie intégrante du Bassin Parisien pour bien en comprendre le fonctionnement. Le modèle est testé sur le secteur avec ou sans la présence des failles, ce qui permet de voir que les failles n'impactent pas les directions des écoulements par exemple. Il est aussi testé l'évolution des écoulements à 1 M d'années avec l'impact des modifications de la géomorphologie et du climat. L'érosion n'impacte pas le temps de transfert convectif de particules depuis la ZIRA, les directions d'écoulement ne sont pas significativement modifiées mais les glaciations, entre autres, en gelant le sol réduisent les vitesses d'écoulement dans l'aquifère oxfordien et les voies de transferts depuis la ZIRA sont déviées vers l'Ouest dans l'Oxfordien.

- **La Simulation Thermique d'un stockage en formation géologique profonde :**

Le but est de décrire l'évolution de la température et des flux de chaleur au sein du stockage et dans le milieu géologique environnant du fait du dégagement de chaleur de certains déchets, avec pour objectif, de comprendre au mieux, la phénoménologie du stockage et de son environnement, la conception/réversibilité, la sûreté en exploitation et post fermeture. Les expériences TER et TED ont permis de vérifier le mode de transfert de la chaleur par conduction dans le Callovo-Oxfordien, et d'en caler les paramètres thermiques au niveau du laboratoire souterrain, tout en tenant compte que dans la ZDT, il y a une augmentation de la conductivité thermique du SO vers le NE, lié à l'enrichissement en carbonates et localement en quartz. La modélisation est suivie de simulations numériques qui sont comparées aux mesures expérimentales pour valider la conceptualisation des phénomènes.



*Comparaison simulations / mesures in situ pour l'expérience TER*

Comme pour les autres thématiques étudiées, les modélisations portent sur chaque unité différenciable la plus simple possible, puis elles sont agrégées pour faire un modèle intégré du fonctionnement global du stockage et des couches autour.

L'impact thermique est majoritairement vertical, il y a très peu d'effet latéralement (quelques dizaines de m), du fait de la forme allongée du stockage.

La détermination de la charge thermique dans la roche, permet de vérifier le respect des critères de température retenus pour la conception : le but est de ne pas dépasser 100°C dans l'argilite pour conserver ses propriétés, soit 90° en pratique en prenant de la marge. C'est un critère dimensionnant qui influence directement l'architecture et la gestion du stockage. Il est même prévu de ne pas dépasser 70°C au delà de 1000 ans, bien que les simulations prévoient que les colis les plus exothermiques n'entraînent pas une température supérieure à 70° à plus de 600 ans.

Un autre critère est de préserver les propriétés du béton, donc de rester en dessous de 80°C. Là aussi, une marge est appliquée, le dimensionnement prévoit de rester en dessous de 65°.

De la même façon, pour préserver les propriétés de confinement de la matrice de verre, il est prévu de rester en dessous de 450°C à cœur du colis, soit 100°C en-dessous de la température vitreuse. Ce critère est de toute façon très largement couvert par les 90°C maximum dans l'argilite.

Pour conserver les propriétés du bitume, le seuil est fixé à 30°C. Ce critère implique d'éloigner les alvéoles de boues bitumées, des alvéoles à déchets fortement exothermiques.

Tous ces critères ajoutés permettent de définir l'architecture du stockage.

Les simulations projettent l'évolution des températures dans le stockage et dans les différentes couches autour, et ce sur plusieurs milliers d'années. Par exemple, l'élévation de température maximum dans les encaissements, au droit de la zone MAVL, devrait être de 5°C au toit du COx (vers l'Oxfordien) et seulement de 1° à l'interface Oxfordien/Kimméridgien. Dans le cas des déchets HA, l'impact thermique devient peu visible après 2000 ans. Globalement, en 10 000 ans, on observe un retour à la normale de la température initiale de la roche.

Au niveau industriel, ces critères thermiques sont transformés en puissance thermique des déchets au moment de leur mise en stockage : pour avoir 90°C maximum, cela correspond environ à 500 W de puissance thermique des colis HAVL.

Incertitudes variabilités et marges : des incertitudes sont liées, entre autres, aux modèles (environ 2°C), des variabilités sont liées par exemple à la variation de conductivité thermique du CO<sub>x</sub> (3°C) ... Ceci est pris en compte dans les modèles et simulations avec des valeurs pénalisantes, des hypothèses pessimistes et des marges.

La progression des connaissances sur la thermique a permis de faire évoluer les concepts et la gestion du stockage : la partie utile des alvéoles a pu passer de 30 m à 80 m. L'entreposage des colis HA pourrait être prolongé : il passerait de 60-70 ans à 85 ans.

Un membre du CLIS demande si la radioactivité des colis modifie les propriétés thermiques de la roche : les sur-conteneurs permettent de réduire les rayonnements sur l'argilite. Lors de la mise en route du stockage, il y aura des alvéoles test permettant de vérifier les prédictions des modèles.

Une autre question porte sur l'effet chimique des colis : ceci est pris en compte avec l'étude des différents radioéléments.

- **Le transfert des solutés pour l'évaluation de sûreté à long terme :**

L'objectif de cette thématique de recherche est de décrire l'évolution du relâchement et du transfert de solutés au sein du stockage et dans le milieu géologique environnant sur de très longues échelles de temps. Ceci dans 2 optiques : la compréhension phénoménologique d'une part, et la conception et la sûreté après fermeture d'autre part (en particulier la quantification des impacts radiologiques et toxiques à l'homme). Les solutés étudiés sont les radioéléments ou les toxiques chimiques dissous.

Toujours le même processus, on modélise d'abord des éléments uniques séparés puis on intègre les différents éléments dans un modèle global. Voici quelques exemples de paramètres intégrés dans le modèle final : convection, diffusion, dispersion, sorption, précipitation, porosité, propriétés des radionucléides, galerie, scellement, argilite, perturbations mécaniques, thermiques, gaz, désaturation, resaturation, présence de matière organiques, hydrogéologie, géodynamique ... Les résultats de simulation sont validés par des mesures in situ.

D'après les résultats de ces simulations, les propriétés de la roche permettent un bon confinement des radionucléides. Au final, sur 143 radionucléides de l'inventaire, seuls 3 solutés, l'iode 129, le chlore 36 et le Sélénium 79, atteignent les limites du CO<sub>x</sub> et seront pris en compte pour l'impact radiologique.

Crédit illustrations ANDRA