

> Jeudi 4 avril

14 h 30 - 15 h 45 Salle Manadiers

SESSION PARALLÈLE

> FONCTIONNEMENT DES INSTALLATIONS - Perméabilité des ouvrages

Président: Mejdî NEJÎ

Docteur en physico-chimie des matériaux

Omar NAJJAR - Modélisation multi-échelle de la fissuration d'un élément en béton armé pour l'évaluation des débits de fuite en situation d'accident grave.

Kayani GANESHALINGAM - Modélisation SPH des expériences de migration dilatante de gaz dans les argilites.

Maiwenn HUMBEZI DESFEUX - Contribution de la thermodiffusion au transfert des radionucléides et des gaz lors du transitoire thermique d'un stockage géologique en contexte argileux.

Mohamed Haythem BAHLOULI - Coupled Modeling of Water-Gas Flow and Hydro-Mechanics in a Deep Geological Repository for Radioactive Waste.

SUJET DE LA THÈSE

Modélisation multi-échelle de la fissuration d'un élément en béton armé pour l'évaluation des débits de fuite en situation d'accident grave

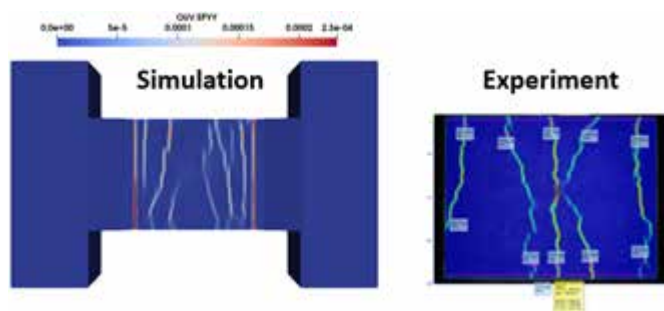
Doctorant :	Omar NAJJAR
Date du début de la thèse :	07/02/2022
Laboratoire IRSN :	PSN-EXP/SES/LMAPS
Réfèrent IRSN de la thèse :	Thomas HEITZ
Direction de la thèse :	Frédéric RAGUENEAU/ENS Cachan & Benjamin RICHARD/IRSN
École doctorale :	Université Paris Saclay - Sciences mécaniques et énergétiques, Matériaux et Géosciences - ED 579
Financement de la thèse :	IRSN

In response to the IRSN's aim to enhance understanding and modeling of containment degradation, particularly for the second and third barriers during severe accidents, this thesis investigates concrete cracks in French 1300 MWe reactor buildings using a novel simulation method. It aims to create a realistic three-dimensional cracking pattern through a two-step simulation approach, significantly improving leakage containment robustness. These results are leveraged in fluid mechanics simulations to assess leakage rates under severe accident conditions. The model is calibrated with experimental data from the COBRA program at the MACUMBA facility operated by IRSN. This involves testing cracking in two mock-ups under thermo-hygro-mechanical conditions indicative of severe accidents, focusing on evaluating leakage and aerosol retention.

The simulation steps are (1) computation of a continuous damage field with the finite element method (FEM); (2) re-analysis of the highly damaged area with a discrete element method (DEM) to compute physical crack features (Oliver-Leblond *et al.*, 2013); and (3) simulation of the leakage flow rate through the previously computed cracks by a CFD software.

(Matallah *et al.*, 2010) estimated the average crack opening per element via a post-processing based on fracture energy regularization. However, this method does not describe the crack geometry path and roughness. On the other hand, the discrete element method has shown its ability to represent concrete cracking characteristics explicitly (Oliver-Leblond, 2019) and will be used in this thesis.

A MATLAB post-processing tool has been successfully developed to obtain complex 3D cracking patterns within a concrete specimen, specifically a Brazilian splitting test specimen (Najjar *et al.*, 2023). These patterns geometries, derived from discrete element calculations, will be used as mesh for fluid mechanics dry air flow calculations and compared with existing experimental data. In our ongoing research, this approach will then be applied to a mock-up, COBRA, designed as a Representative Structural Volume (RSV) of the containment wall. In parallel, the first experimental mechanical results from the COBRA project are compared with the FEM simulations (see Figure). The results show a reasonably good agreement between the two regarding the crack opening field, considering the random variability of the concrete material.



Mots clés : damage, cracking, discrete element method, flow leakage measurement.

SUJET DE LA THÈSE

Modélisation SPH des expériences de migration dilatante de gaz
dans les argilites

Doctorante :	Kayani GANESHALINGAM
Date du début de la thèse :	21/11/2022
Laboratoire IRSN :	PSE-ENV/SPDR/LETIS
Référent IRSN de la thèse :	Magdalena DYMITROWSKA
Direction de la thèse :	Djimédo KONDO/Sorbonne Université
École doctorale :	Sorbonne Université - Sciences mécanique, acoustique, électronique et robotique de Paris (SMAER) - ED 391
Financement de la thèse :	IRSN

En France, la loi de 2006 relative à la gestion des déchets radioactifs a confirmé l'option d'un stockage géologique profond dans une couche d'argilites du Callovo-Oxfordien. À la suite de la fermeture du stockage, une importante production d'hydrogène est attendue, pouvant ainsi altérer les propriétés de matériaux des barrières et donc impacter le transport des radionucléides. Au sein du SPDR, plusieurs projets expérimentaux et numériques ont été entrepris sur la migration de gaz dans le stockage, notamment dans le cadre du projet européen EURAD. Des études expérimentales montrent l'existence d'un couplage hydromécanique entre les écoulements eau-gaz dans les pores et la déformation du squelette solide des matériaux argileux. Cependant, en raison de l'impossibilité de valider les modèles à des échelles représentatives d'un stockage, les approches numériques multi-échelles sont devenues indispensables pour justifier ces modèles.

Ainsi, l'IRSN a développé une approche basée sur la méthode SPH (*Smoothed Particles Hydrodynamics*) pour mieux comprendre les mécanismes de transfert de gaz à l'échelle des pores et évaluer la pertinence de lois de comportement homogénéisées utilisées dans des simulations numériques macroscopiques. L'objectif de cette thèse est d'exploiter des maquettes numériques à partir des données d'imagerie 3D de diverses argilites pour effectuer des simulations de migration de gaz (drainage) dans une gamme des contraintes et de pressions la plus représentative possible pour les conditions expérimentales. Guidé par les comportements effectifs, un modèle hydromécanique continu sera élaboré pour décrire la migration de gaz à des échelles supérieures.

A partir des travaux de thèse déjà réalisés avec le code SPH (R. Chaves Deptulski), l'implémentation de l'interaction entre la phase solide et liquide (fracturation hydraulique) nécessite une validation. Pour cela, on étudie une fissure pressurisée dans un milieu élastique. Nous allons présenter l'analyse des sauts de déplacements et champs de contrainte au niveau de la fissure afin de les comparer aux résultats analytiques de la mécanique de rupture pour un cas de chargement en traction (chargement sur les bords de la plaque).

Mots clés : changement d'échelle, écoulements dilatants, smoothed particles hydrodynamics.

SUJET DE LA THÈSE

Contribution de la thermodiffusion au transfert des radionucléides et des gaz lors du transitoire thermique d'un stockage géologique en contexte argileux

Doctorante :	Maiwenn HUMBEZI DESFEUX
Date du début de la thèse :	17/10/2022
Laboratoire IRSN :	PSE-ENV/SPDR/LETIS
Référent IRSN de la thèse :	Jean-Michel MATRAY
Direction de la thèse :	Manuel MARCOUX/Université Paul Sabatier - Toulouse
École doctorale :	Université Toulouse 3 - Mécanique Énergétique Génie civil Procédés (MEGEP) - ED 468
Financement de la thèse :	IRSN & FANC

La thèse s'inscrit dans le cadre des recherches de l'IRSN sur le stockage géologique des déchets radioactifs HA-MAVL, plus particulièrement sur les interactions entre les colis de stockage et la barrière géologique. L'étude vise à évaluer les processus générant le transfert des radionucléides en cas de fuite prématurée due à la corrosion des colis, lors du transitoire thermique lié à la présence de colis exothermiques de haute activité (HA).

Un essai *in situ* DIGIT (Diffusion sous Gradient Thermique - fig1) est mené au Laboratoire de Recherche Souterrain de Tournemire (LRST), pour mieux évaluer l'impact de la température sur le transport de l'eau et des solutés. Cette expérience consiste en un échange sous gradient de température entre l'eau porale et une solution enrichie en traceurs ^2H , Cl^- , I^- et Br^- , mimant la libération des radionucléides les plus mobiles (^3H , ^{36}Cl , ^{129}I et ^{79}Se) issus de colis HA. Elle vise à qualifier l'importance relative des processus de transport mis en jeu notamment ceux entre les flux diffusifs sous gradient de concentration (2nde loi de Fick) et de température (Effet Soret) mais aussi vis-à-vis de la convection. En parallèle, l'expérience doit permettre de définir précisément la distribution de la chaleur autour de la zone de test.

Ainsi, trois phases expérimentales de prélèvements et de mesures ont été mises en place. Une première phase de caractérisation initiale, menée dans le puits DIGIT et ses forages périphériques. Cette phase a permis d'obtenir lors de la première année de thèse les paramètres nécessaires aux calculs prédictifs, menés avec le logiciel Comsol notamment les coefficients de diffusifs effectifs (D_e) et concentrations naturelles en traceurs dans l'eau porale. Une seconde phase au début de la deuxième année de thèse, après trois mois de mise en eau du puits sans température a permis d'obtenir un état initial en condition *in situ*. Les premiers résultats acquis sur cellules d'échange diffusif montrent une pénétration des traceurs plus importante que prévue, de quelques cm, par rapport aux résultats des calculs prédictifs. Ce résultat s'explique par des valeurs plus élevées attribuées aux effets d'échelle et à l'endommagement de la roche lors du creusement. Enfin, la troisième phase d'échantillonnage a eu lieu après cinq mois d'échange sous température, les résultats et les modélisations seront obtenus au cours de cette année.

Ces résultats permettront de préciser la contribution des différents processus de transport des traceurs analogues de radionucléides en cas de transfert thermique.

Mots clés : transfert thermique, thermodiffusion, diffusion, radionucléides, gaz, stockage géologique.

SUJET DE LA THÈSE

Coupled Modeling of Water-Gas Flow and Hydro-Mechanics in a Deep Geological Repository for Radioactive Waste

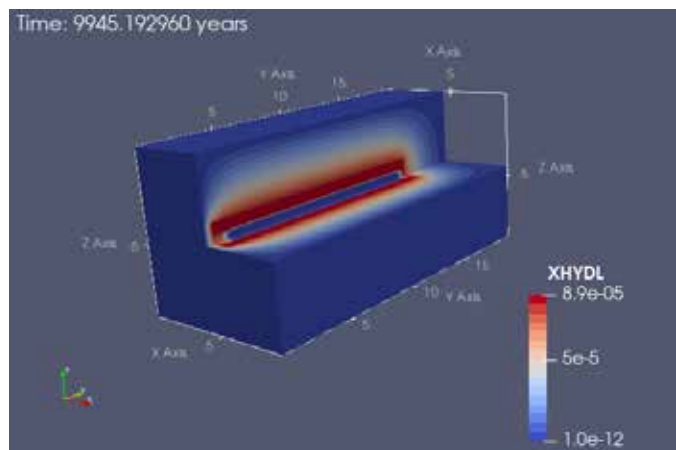
Doctorant :	Mohamed Haythem BAHLOULI
Date du début de la thèse :	01 / 10 / 2021
Laboratoire IRSN :	PSE-ENV / SPDR / UEMIS
Référent IRSN de la thèse :	Zakari SAADI
Direction de la thèse :	Rachid ABABOU / INP Toulouse
École doctorale :	Université Toulouse 3 - Sciences de l'univers, de l'environnement et de l'espace - ED 173
Financement de la thèse :	IRSN

This thesis focuses on the safety of a deep geological disposal facility for high-level (HL) and long-live intermediate-level (LL) radioactive waste. In host rocks such as Callovo-Oxfordian clay (COx, a candidate host rock for CIGEO disposal), as well as in engineered barriers (bentonite, concrete, etc.), gas transport phenomena (mainly hydrogen generated in the HLW cell, Figure below) occur in partially saturated porous media, leading to changes in the solid matrix (i.e., mechanical damage). The failure of current calculation codes to take account of facility-scale gas transport modelling, combining the effects of non-zero gas inlet pressure, hysteresis (Amri, 2021) and geomechanical deformation, has raised a number of questions about the reliability of facility safety calculations.

The aim of this thesis is to assess the uncertainties in gas migration models within the facility during its post-closure phase over periods of hundreds of thousands of years, by introducing the three aforementioned phenomena simultaneously. The methodology developed during this thesis work aims to introduce hydromechanical (HM) deformations into the modelling of interfaces between seals (engineered barriers) and host rock in a two-phase water-gas porous medium, in order to assess their influence on gas pressure and its impact on water flow.

During this thesis, a hydromechanical deformation model based on a linear elastic law was implemented in COMSOL Multiphysics (COMSOL, 2024) using the coefficient form PDE solver. In parallel, a 3D wastecell model has been developed and implemented in the iTOUGH2/EOS7R code (Finsterle, 2016) to assess the simultaneous impact of capillary gas entry pressure and the initial presence of air on hydrogen pressures and fluxes within the cell over a few thousand years. In addition, gas permeability models in two-phase water-gas and single-phase gas, with hydromechanics taken into account, are tested and validated on COMSOL, with the aim of developing a 3D hydromechanical model of the HLW cell.

Mots clés : water, gas flow, hydro, mechanics, deep geological repository, radioactive waste.



Références :

- Amri A. (2021) : Réévaluation du modèle physique de transfert de l'hydrogène pour l'étude du transitoire hydraulique-gaz dans un stockage profond de déchets radioactifs. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse), 213p.
- Finsterle S. (2016) iTOUGH2 User's Guide. LBNL-40040, Earth Sciences Division, LBNL, University of California, Berkeley, CA 94720.