

INSERTION DE L'INCERTITUDE pour l'analyse des risques du stockage de CO₂

TRANSLATION

Le stockage du CO₂, après sa capture sur les sites industriels émetteurs, est une des voies étudiées pour limiter les émissions anthropiques de CO₂ conduisant au réchauffement climatique: il s'agit de la filière CSC (captage et stockage de CO₂). L'INERIS a engagé en 2012 une thèse de doctorat [1] dans le cadre de son axe de recherche EVARISTE. Menée par Tatiana Okhulkova et soutenue le 15 décembre 2015 à l'École centrale de Paris, ce doctorat avait pour objet l'étude des incertitudes de la modélisation en milieu souterrain dans le cadre d'une analyse de risques, avec pour cas d'application concret le stockage souterrain de CO₂.

Méthode

Le travail de thèse s'est centré sur la modélisation de deux scénarios de risques: la migration à travers la roche-couverture sous l'effet d'une surpression et la migration latérale plus lointaine que prévu au sein du réservoir. Il s'agit des scénarios 2 et 5 sur la figure 1 (Fig1), qui illustre les principaux scénarios de fuite de CO₂

Tatiana Okhulkova completed her PhD on Dec.15th, 2015, after studying the uncertainties in modeling the migration scenarios for CO₂ geological storage. Such a storage is envisaged to fight climate change, by injecting CO₂ in deep underground formations after capturing it at industrial plants.

An important task was to build a metamodel that reproduces the results of the complete numerical model previously developed by INERIS, with a mathematical function that demands much less calculation time (typically, 100 000 runs in a few minutes). Here, the polynomial chaos expansion theory was used. The importance of the different input variables was studied and compared for two risk scenarios: lateral migration of the CO₂ plume and overpressure at the caprock.

The PhD thesis also considered the influence of heterogeneities. In order to obtain an uncertainty that is similar to the homogeneous case, a 4.5 times higher standard deviation is needed for heterogeneity as input parameter. This shows that the contribution of heterogeneities to the global uncertainty is weaker. This work necessitated to combine the numerical model with a MATLAB routine that generates a 3D heterogeneous domain.

identifiés par l'INERIS lors des premiers travaux d'analyse des risques [2].

Pour étudier l'incertitude liée à une évaluation de risques à l'aide d'une simulation numérique,

il est nécessaire de réaliser un grand nombre de tirages en faisant varier les paramètres d'entrée du modèle utilisé. À cette fin, une tâche importante de la thèse a consisté à réaliser

FIGURES

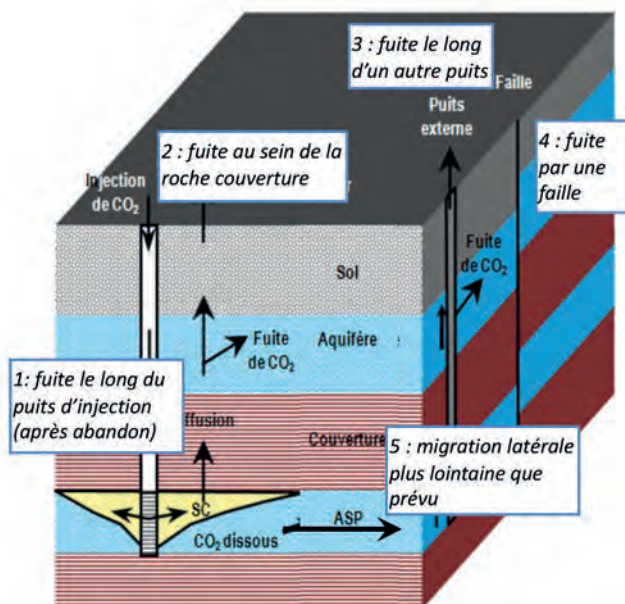


Fig1 : Représentation schématique des 5 principaux scénarios de fuite de CO₂



RÉFÉRENCES

[1] Thèse de doctorat de T.Okhulkova soutenue à l'École centrale de Paris le 15 décembre 2015 : "Integration of uncertainty and definition of critical thresholds in CO₂ storage risk assessment".

[2] Farret R., Thoraval A., Gombert P., *État de l'art et analyse des risques pour un stockage de CO₂ en aquifère salin, Rapport N° 2: les risques en phase de stockage à long terme*, Rapport INERIS-DRS-10-100887-12619A, janvier 2011

[3] Bastug E., Menafoglio A., Okhulkova, Tatiana, *Polynomial Chaos Expansion for an Efficient Uncertainty and Sensitivity Analysis of Complex Numerical Models*, ESREL conference 2013, Amsterdam, Sept 2013

[4] Okhulkova T., Clouteau D., Cottreau R. ; Farret R., *Probabilistic modeling and simulation of CO₂ storage in heterogeneous geological formations*, ICOSSAR Conference 2013, New York, Juin 2013

un métamodèle (également appelé surface de réponse). Son rôle est de reproduire les résultats du modèle numérique complet, pour une variable de sortie donnée, à l'aide d'une fonction mathématique qui demandera nettement moins de temps de calcul que le modèle initial. En effet, le métamodèle a besoin d'une centaine de simulations avec le modèle initial pour se caler, soit plusieurs jours de calcul, puis il peut effectuer 100000 tirages en quelques minutes. C'est la technique des polynômes de chaos qui a été utilisée, décrite dans la publication Bastug et Okhulkova en 2013 [3].

Résultats

Tatiana Okhulkova a étudié un cas hypothétique de stockage dans le Dogger du Bassin parisien, sur la base d'un modèle 2D-axisymétrique puis d'un modèle 3D. Considérons à titre d'illustration le scénario 5, c'est-à-dire le risque que la migration latérale du panache de CO₂ soit plus lointaine que prévu : quand le rayon r_0 du panache est estimé proche de 1 200 m dans le cas nominal, l'étude des incertitudes montre qu'il y a une probabilité de 2 % que ce rayon dépasse en fait 1 500 m. En comparant l'importance¹ des différentes variables d'entrée, on montre que cette incertitude est gouvernée avant tout par deux variables : la perméabilité de la roche et la saturation maximale en gaz.

Le travail de thèse a également considéré l'étude des hétérogénéités, en construisant sous MATLAB un module de génération de champ 3D hétérogène pour la perméabilité [4] (Fig2). La figure 3 (Fig3) montre que la contribution de l'hétérogénéité spatiale à l'incertitude globale est plus faible que lorsque la perméabilité est supposée homogène (courbe rouge), ce qui met en évidence le caractère « automoyennant » des réalisations géostatistiques. Ainsi, pour avoir une incertitude équivalente sur le rayon du panache r_0 , dans le cas hétérogène, l'écart-type relatif à la perméabilité devrait être multiplié par 4,5 par rapport au cas homogène.

Les travaux ont été encadrés par R. Farret, chef de projet pour la filière CSC à l'INERIS, avec l'appui de F. Laoufa et A. Thoraval. Ils ont été l'occasion d'une collaboration étroite avec deux laboratoires de l'École centrale de Paris : laboratoire de mécanique des matériaux (D. Clouteau - directeur de thèse - et R. Cottreau) et laboratoire de mathématiques (E. de Rocquigny). Des échanges ont également eu lieu avec d'autres partenaires impliqués avec l'INERIS dans des projets de recherche portant sur le stockage de CO₂.

¹ Dans l'étude des incertitudes d'un modèle, l'importance d'une variable d'entrée (ou d'un paramètre) combine sa variabilité naturelle (donc son incertitude propre, habituellement représentée par une loi de distribution probabiliste) et la sensibilité du modèle à cette variable.

FIGURES

Fig2 : à gauche : Champ de perméabilité hétérogène, en coupe verticale ; à droite : Saturation en CO₂ 10 ans après l'injection, modèle 3D (haut : cas homogène, bas : cas hétérogène).

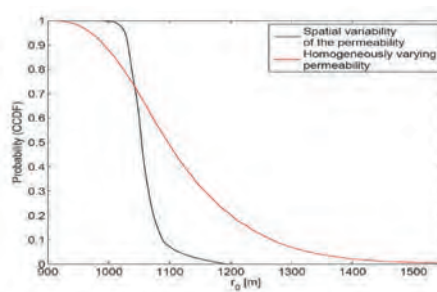
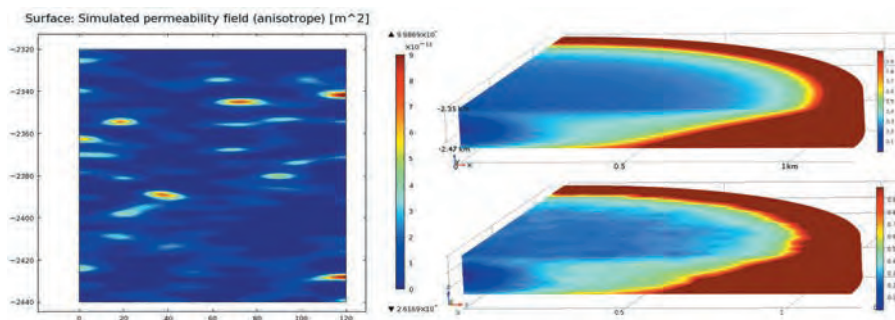


Fig3 : Incertitude sur la variable de sortie r_0 (rayon du panache) pour une variation homogène et pour une variation hétérogène de la perméabilité, basées sur la même distribution de probabilité en entrée.