

Pertinence sociale et économique de la recherche doctorale

La roche étudiée dans le cadre de ces recherches doctorales est le charbon. Le charbon est exploité depuis des siècles, ce fut une ressource majeure qui a permis la révolution industrielle du XVIII^e siècle, soit pour la production d'acier soit pour faire tourner les machines à vapeur. L'utilisation du charbon a continué à s'intensifier aux XIX et XX^e siècles. Avec le déclin de la sidérurgie en Europe, le charbon est maintenant souvent vu comme quelque chose du passé. En Belgique, la production de charbon a complètement cessé en raison des coûts élevés de production, la dernière mine a fermé en Wallonie en 1984. L'énergie nucléaire et les hydrocarbures bon marchés pour produire l'électricité ont rationnellement fait baisser la consommation de charbon. Cependant, il représente quand même toujours environ 40% de la production électrique mondiale.

Beaucoup d'accidents miniers au fil des décennies ont contribué à la mauvaise réputation du charbon. En effet, le méthane relâché des veines de charbon durant les opérations d'exploitation est très inflammable et peut provoquer des explosions. Le grisou était considéré comme la malédiction des mineurs.

C'est la raison pour laquelle les galeries sont ventilées pour accroître la sécurité. Lorsque le gaz est évacué dans l'atmosphère, cela pose bien sûr des questions environnementales importantes. En effet, le méthane est un gaz à effet de serre bien plus puissant que le dioxyde de carbone, contribuant ainsi lui aussi au changement climatique. À côté de ce défi environnemental, c'est également une perte économique réelle car le méthane de charbon est reconnu comme une source énergétique précieuse depuis la crise énergétique des années 70. Il est donc préférable à tout point de vue de brûler le méthane pour produire de l'électricité et émettre du dioxyde de carbone que de relâcher directement ce méthane.

Il faut en fait distinguer le gaz de mine du gaz de couche. Le gaz de mine est le méthane récupéré dans les mines en cours d'exploitation ou abandonnées alors que le gaz de couche fait référence au méthane présent dans le charbon inexploité.

Ces recherches doctorales s'intéressent plus particulièrement au gaz de couche. Dans ce contexte, le gaz est extrait au moyen de forages profonds dans des veines de charbon qui restent en place. Il s'agit donc d'un problème d'écoulement de fluide dans la roche. Bien que le charbon soit miné depuis des siècles, son comportement reste quelque peu énigmatique lorsqu'on envisage cette roche comme un milieu poreux où s'écoule du gaz. Aujourd'hui, le développement de modèles hydro-mécaniques du charbon est d'un grand intérêt. Outre la possible application de ces modèles à l'optimisation de la production du méthane, le charbon est aussi envisagé comme réservoir pour le stockage de dioxyde de carbone. En allant encore plus loin, on peut imaginer un cycle où le méthane est extrait et consommé sur place par des centrales au gaz pour produire de l'électricité, et puis le dioxyde de carbone émis est récupéré et directement injecté dans le charbon (Figure 1). Le carbone pourrait donc être séquestré à un coût modéré et compenser une partie des émissions produites par l'utilisation du méthane extrait.

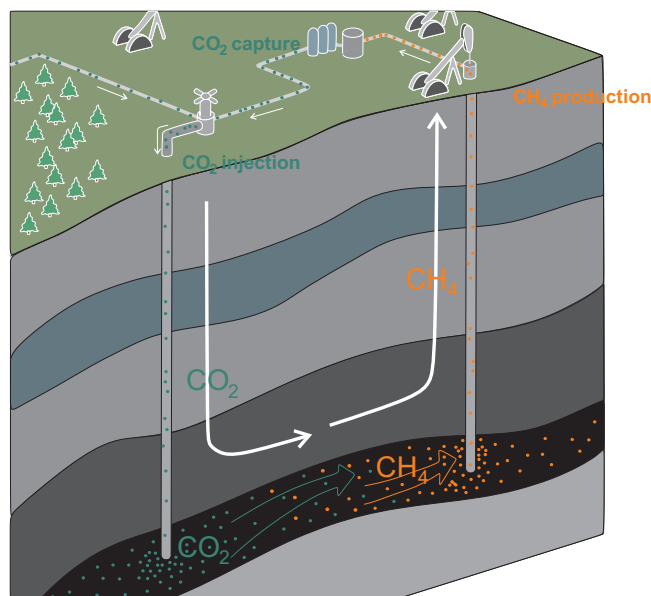


Figure 1 – Production de méthane combinée au stockage du dioxyde de carbone.

La séquestration géologique du carbone a un grand potentiel pour compenser les émissions anthropiques et ainsi atteindre les objectifs des accords climatiques de Paris. Cet accord vise à limiter l'augmentation de température à moins de deux degrés par rapport au niveau pré-industriel. Pour y parvenir, on estime que le stockage du carbone devrait être accéléré pour stocker entre 1,8 et 6 milliards de tonnes de CO_2 par an. Actuellement, 37 millions de tonnes sont capturées et stockées annuellement.

A côté des anciens réservoirs pétroliers, les veines de charbon apparaissent comme des réservoirs intéressants dans ce contexte de séquestration du carbone. En raison de sa haute surface spécifique (variant entre 20 et $300m^2/g$), de grandes quantités de CO_2 peuvent être piégées par sorption dans la matrice du charbon, de la même manière que le méthane est initialement stocké.

L'injection de dioxyde de carbone pourrait en plus améliorer la production du gaz naturel. En effet, le CO_2 a une plus grande affinité pour le charbon que le méthane, c'est pourquoi il déplace les molécules de méthane piégées dans la matrice du charbon. Les choses ne sont malheureusement pas aussi simples car le CO_2 prend plus de place que le CH_4 . La matrice du charbon a donc tendance à gonfler, ce qui diminue l'ouverture des fractures entourant les blocs matrice. C'est par ces fractures naturelles de la roche que le gaz s'écoule jusqu'au puits. Ce phénomène de gonflement a donc comme conséquence de faire chuter la perméabilité du réservoir.

La production du méthane via l'injection de CO_2 n'est pas une technologie mature. Aucun site industriel (plus d'un million de tonnes par an) n'est opérationnel. Plusieurs projets pilotes ont par contre été développés. Le premier site a vu le jour en 1995 aux Etats-Unis. Malgré une chute de la perméabilité du site, la production de méthane a augmenté et le test fut considéré comme un succès. Plusieurs autres projets ont alors suivi, notamment au Canada, en Pologne et au Japon. Mais ces projets ont, pour diverses raisons, donné des résultats plus mitigés que le premier projet pilote. Après analyse, les médiocres performances ont pu en partie être expliquées par des problèmes de design et d'implémentation des différents sites. Suite à ces leçons, les projets pilotes suivants ont montré des résultats plus prometteurs.

Dans les bassins de charbon américains, on estime qu'il y a un potentiel de séquestration pour environ 90 milliards de tonnes de CO_2 . Pour mettre en perspective ces chiffres, les émissions annuelles américaines au cours des dernières années étaient entre 5 et 6 milliards de tonnes. A l'échelle mondiale, à partir des données du méthane potentiellement récupérable dans le charbon, le potentiel de séquestration est près de 500 milliards de tonnes.

Pouvoir modéliser correctement les écoulements de gaz dans le charbon est un enjeu majeur pour estimer les capacités de stockage et/ou de production. Pour n'importe quel modèle, il est important de connaître à quel point il peut représenter la réalité, c'est-à-dire que les hypothèses et approximations inhérentes au modèle permettent toujours de représenter le processus qui nous intéresse. Les modèles numériques disponibles sont généralement peu satisfaisants car ils ne tiennent pas suffisamment compte des couplages entre l'hydraulique et la mécanique. Les deux aspects s'influencent mutuellement dans le cas du charbon. En plus du gonflement ou du retrait de la roche avec le contenu en gaz de la matrice, on observe que la chute de pression du fluide au cours de la production conduit à une augmentation des contraintes mécaniques qui a tendance à fermer les fractures naturelles. La perméabilité est donc susceptible de baisser et de diminuer la rentabilité du puits.

Cette thèse avait pour but de développer des modèles hydro-mécaniques permettant de tenir compte de l'évolution de la perméabilité. Idéalement, un modèle numérique devrait détailler la microstructure du matériau afin de représenter le comportement distinct des différents constituants. Cependant, la modélisation directe de l'entièreté de la microstructure est généralement impossible en raison du coût de calcul que cela impliquerait à l'échelle d'un réservoir.

C'est pourquoi les modèles de réservoir sont habituellement phénoménologiques par nature : le comportement de tous les constituants sont représentés collectivement par un système d'équations macroscopiques. Cette approche a des limites car il est difficile de formuler des équations macroscopiques qui tiennent compte de tous les phénomènes se déroulant à l'échelle microscopique. C'est la raison pour laquelle ces modèles présentent de nombreuses hypothèses simplificatrices.

Une approche alternative efficace pour modéliser à l'échelle d'un réservoir est d'utiliser une description multi-échelle. L'idée est de modéliser les phénomènes à l'échelle des constituants au moyen d'une modélisation directe et puis ensuite il s'agit d'homogénéiser leurs effets pour les transmettre à l'échelle supérieure. Cette méthode a l'avantage qu'elle ne nécessite pas de développer des lois de comportement à l'échelle du réservoir mais seulement à l'échelle de la microstructure. Lorsque des éléments finis sont utilisés aux deux échelles, la méthode est appelée *éléments finis au carré*. Cette méthode n'avait à ma connaissance jamais été appliquée au charbon avant cette thèse. Les recherches doctorales ont aussi permis d'étendre la méthode à des conditions non saturées, présence à la fois d'eau et de gaz, ce qui peut trouver d'autres applications que le charbon.

Remarque : les chiffres cités dans cette présentation peuvent facilement être retrouvés avec leurs références dans l'introduction de la thèse.