



HAL
open science

Renvoyer le carbone dans le charbon. Le projet Carbolab

Aurélien Leynet

► **To cite this version:**

Aurélien Leynet. Renvoyer le carbone dans le charbon. Le projet Carbolab. Géosciences, 2013, 16, pp.86-93. hal-01061119

HAL Id: hal-01061119

<https://brgm.hal.science/hal-01061119>

Submitted on 5 Sep 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Renvoyer le carbone dans le charbon. Le projet Carbolab

Plus gros émetteur de CO₂ avec 43 %⁽¹⁾, en croissance, du total mondial, la combustion du charbon pulvérise les bonnes volontés de limiter l'ampleur du réchauffement climatique. Peut-on endiguer ces émissions ? Le captage du CO₂ et son stockage en veine de charbon sont une solution à l'étude. Le projet européen Carbolab vise à réaliser un laboratoire souterrain d'injection et de suivi du CO₂ dans le charbon, afin de mieux comprendre les processus à l'œuvre.

(1) Source : International Energy Agency Statistics "CO₂ Emissions from fuel combustion - 2011 highlights" <http://data.iea.org>



Aurélien Leynet

BRGM
DIRECTION DES GÉORESSOURCES
UNITÉ GÉOLOGIE DE L'AMÉNAGEMENT DES
TERRITOIRES, STOCKAGE GÉOLOGIQUE DU CO₂
a.leynet@brgm.fr

▲
**Le puits de la mine de charbon de Monsacro,
Asturies, Espagne.**

*The shaft of the Monsacro coal mine,
Asturias, Spain.*

© Hunosa.

Confrontés à un épuisement des ressources fossiles et à une nécessité de réduire leurs émissions de gaz à effet de serre (GES), la plupart des pays affichent des politiques de développement des énergies renouvelables. La production énergétique mondiale continue pourtant d'être fortement dépendante des ressources fossiles et au premier chef du charbon. À peu près stable entre 1990 et 2000, la production mondiale de charbon est passée de 2,34 Gtep en 2000 à 3,96 Gtep en 2011, avec des augmentations annuelles de 6 % lors des deux dernières années⁽¹⁾. Selon l'AIE⁽²⁾, la demande de charbon primaire augmenterait tendanciellement encore de 138 % entre 2007 et 2050. Le scénario volontariste Blue Map de l'AIE évoque, lui, un recul de cette demande de seulement 36 % sur la même période, preuve que le charbon restera une ressource substantielle pour les prochaines décennies.

Le charbon cumule les défauts environnementaux. Gros émetteur de CO₂ (deux fois plus que le gaz naturel), il est largement disponible (on estime ses réserves prouvées à 112 ans de production), et bien réparti géographiquement, et les techniques de son exploitation, quoique meurtrières, sont bien connues. En utilisation habituelle, l'extraction et

(1) Source : BP www.bp.com/sectiongenericarticle800.do?categoryId=9037183&contentId=7068609

(2) Perspectives des technologies de l'énergie 2010, Scénarios et stratégies à l'horizon 2050. Agence internationale de l'énergie (AIE).

l'exploitation du charbon sont des activités risquées et délétères⁽³⁾ : poussières, coups de grisou, effondrements et chutes de roches tuent deux à dix mineurs par 100 Mt extraites ; les effluents des centrales thermiques au charbon provoqueraient trente morts au TWh et une morbidité dix fois supérieure ; les rejets radioactifs peuvent également dépasser ceux d'une centrale nucléaire de même puissance ! Et cela ne concerne que 5% des ressources charbonnières jugées économiques car suffisamment peu profondes⁽⁴⁾.

Le tableau attribué au charbon n'est donc pas des plus agréables. Pourtant, certains voient la possibilité d'utiliser le charbon, ou plutôt ses gisements, pour réduire les émissions de GES. C'est la technologie du captage et stockage géologique du CO₂ (CSC) en veine de charbon, l'une des techniques regroupées sous le vocable commun de « charbon propre »⁽⁴⁾. Comme pour le CSC classique⁽⁵⁾, en aquifère salin ou en gisement

épuisé d'hydrocarbures, la technique consiste à capter le CO₂ produit par une centrale thermique ou une aciérie, souvent présentes dans les bassins charbonniers. Ce CO₂ est transporté par gazoduc jusqu'au droit d'une couche réservoir pour y être injecté. Dans ce cas, le réservoir est une veine de charbon inexploitée, à cause d'une profondeur trop importante et/ou d'une puissance (épaisseur) trop faible. La matrice charbonneuse possède la propriété remarquable d'adsorber le CO₂ qui, en outre, provoque la désorption du méthane présent dans la veine. Il est admis qu'il faut deux à cinq moles de CO₂ pour chasser une mole de CH₄. Si l'on arrivait aussi à récupérer ce méthane, il pourrait être valorisé énergétiquement et couvrir une partie des investissements (conséquents) du stockage (figure 1). En ce sens, le CSC en veine de charbon, malgré des capacités en volume faibles face aux enjeux, pourrait s'avérer intéressant à moyen terme.

“ La matrice charbonneuse possède la propriété remarquable d'adsorber le CO₂. ”

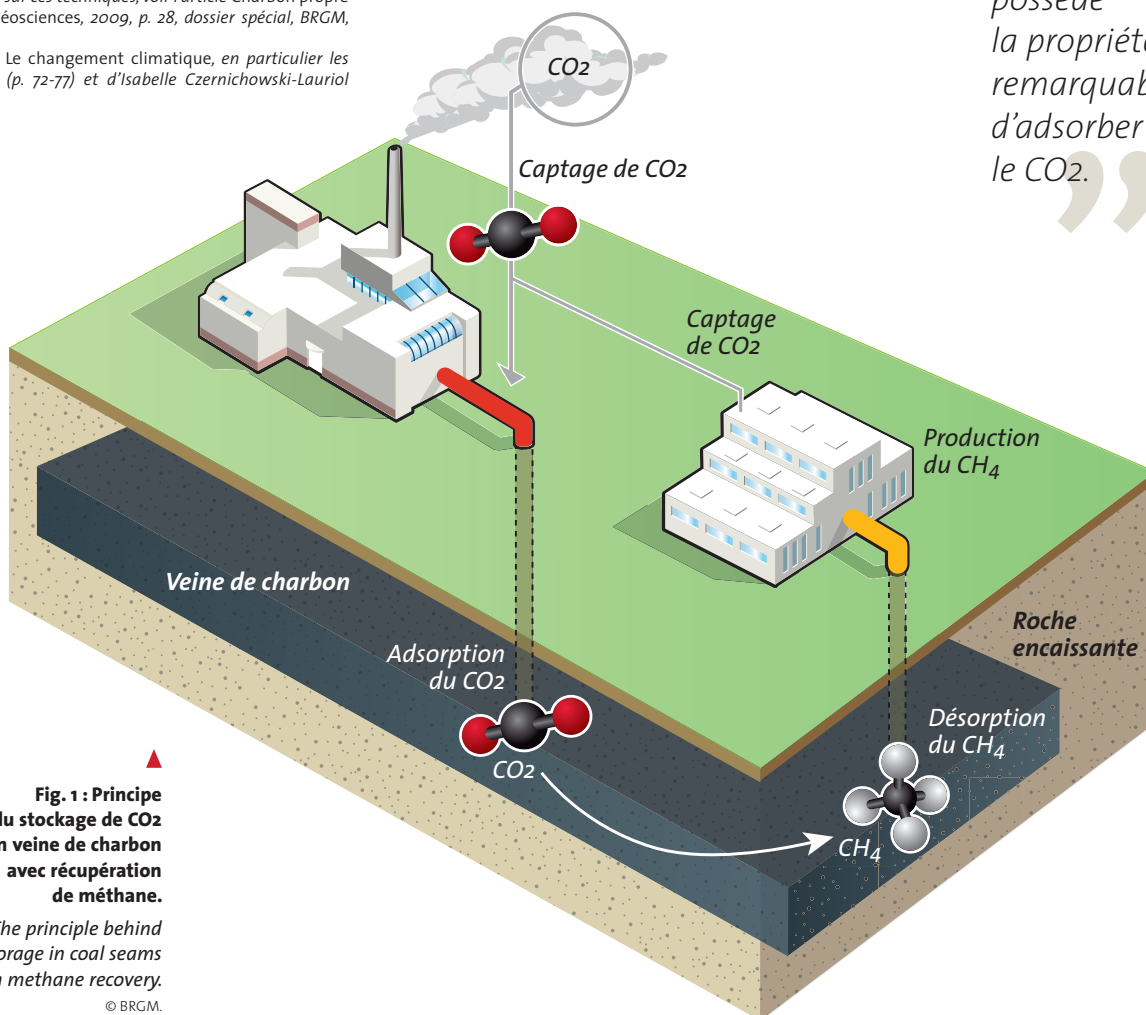


Fig. 1 : Principe du stockage de CO₂ en veine de charbon avec récupération de méthane.

Fig. 1: The principle behind CO₂ storage in coal seams with methane recovery.

© BRGM.

(3) Jean-Marie Martin-Amouroux – Charbon, les métamorphoses d'une industrie, p. 344 et suiv.

(4) Pour plus d'information sur ces techniques, voir l'article Charbon propre dans Les 10 Enjeux des Géosciences, 2009, p. 28, dossier spécial, BRGM, 2009, p.28.

(5) Voir Géosciences n° 3, Le changement climatique, en particulier les articles de Jacques Varet (p. 72-77) et d'Isabelle Czernichowski-Lauriol (p. 78-85).

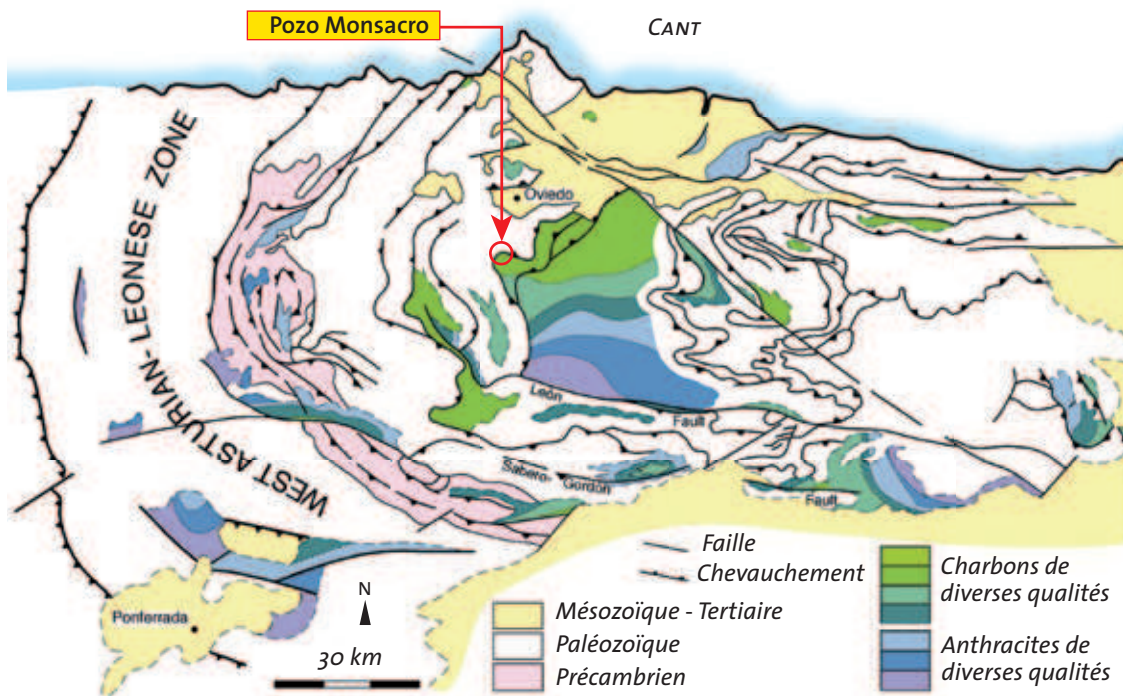


Fig. 2 : Localisation de la mine de Monsacro sur carte géologique simplifiée des Asturies.

Fig. 2: The position of the Monsacro mine plotted on a simplified geological map of Asturias.

© BRGM.

Mais les incertitudes et verrous technologiques ne manquent pas. On manque de connaissance sur les comportements des fluides dans le milieu, notamment sur la perméabilité très variable du charbon, sous l'effet de la sorption de gaz. Peu d'essais ont été réalisés sur ce sujet en Europe. Citons seulement Recopol⁽⁶⁾, un projet européen mené de fin 2001 à mi 2005, qui consista à injecter du CO₂ dans une veine de charbon à plus de 1 000 mètres de profondeur dans un bassin houiller en Pologne. Face à une diminution drastique de la perméabilité, il a fallu recourir à la fracturation hydraulique pour injecter au final 800 tonnes de CO₂. Le projet aura révélé le problème de la perméabilité du charbon diminuant au contact du CO₂. En effet, en réponse à l'adsorption du CO₂, la matrice de charbon tend à gonfler. L'effet est extrêmement variable d'un échantillon à l'autre et est son étude est rendue plus complexe par la présence dans le charbon d'une double perméabilité, de matrice et de fracture, qui induit une double propagation des gaz dans la veine, en diffusion et en écoulement.

Le projet ANR Charco, dirigé par le BRGM de 2006 à 2010, a dressé un panorama de vingt-six charbons, principalement européens, analysés selon seize protocoles. Cela a permis d'esquisser une « fenêtre à CO₂ », c'est-à-dire un ensemble de paramètres physico-chimiques définissant les charbons favorables pour le stockage de CO₂.

(6) <http://recopol.nitg.tno.nl>

Au plus près des processus

Après ces études, un saut d'échelle semblait nécessaire afin de vérifier les résultats de laboratoire. C'est l'idée de base du projet Carbolab. Financé par le fonds européen du charbon et de l'acier (*Research Fund for Coal and Steel*), le projet vise à étudier le comportement du charbon *in situ*. Afin de permettre un suivi optimal des processus, la décision fut prise de procéder à une injection dans une veine de charbon « en place » et d'installer des capteurs et des instruments de mesure

“
Le but principal de Carbolab est de tracer le comportement des fluides et du charbon *in situ*.
”

autour du point d'injection. Une veine de la mine de Monsacro, dans les Asturies, en Espagne (figures 2 et 3) fut mise à disposition par le coordinateur du projet, la compagnie d'État Hunosa⁽⁷⁾. Les autres partenaires du projet sont : Aitemin⁽⁸⁾, association sans but lucratif pour le développement des ressources naturelles ; le BRGM ; l'Inéris ; le GIG (institut central des mines de Pologne) et Total sur participation propre.

(7) Hulleras del Norte SA (Houillères du Nord SA).

(8) Asociación para la Investigación y Desarrollo Industrial de los Recursos Naturales (Association pour la recherche et le développement industriel des ressources naturelles).



Fig. 3 : La veine du Carbolab, mine de charbon de Monsacro, Asturies, Espagne.

Fig. 3: The Carbolab seam, Monsacro coal mine, Asturias, Spain.

© Hunosa.

Le projet Carbolab s'articule en trois grandes phases

La première est de caractériser le site retenu pour le test d'injection ; puis de définir le protocole de suivi géophysique et géochimique. La deuxième correspond au test d'injection, au monitoring associé et aux analyses des prélèvements en laboratoire. Enfin, la dernière permet d'analyser l'ensemble des éléments observés ou mesurés afin de conceptualiser les processus mis en œuvre et de les formaliser grâce à la modélisation. L'analyse de ces processus doit également permettre d'évaluer les impacts potentiels dans le cadre d'une étude de risques à long terme.

Un environnement atypique

La veine choisie pour le projet se situe à 464 mètres sous le carreau de la mine. Fortement tectonisée, elle se présente avec un pendage d'environ 70° et sa puissance est d'environ deux mètres. Le charbon, d'âge moscovien inférieur, est un anthracite. L'environnement est humide et poussiéreux, peu favorable à la mise en œuvre des instruments. Il est surtout celui – toujours légèrement grisouteux – d'une mine en activité. L'exploitant Hunosa s'attache à assurer la sécurité des intervenants. À cet effet, il a percé un puits de ventilation supplémentaire dans la galerie d'étude et renforcé l'équipement de détection de gaz.

Caractériser le milieu

Il s'avère que le charbon en place est trop friable pour être carotté. Cette difficulté complique les possibilités de réaliser les analyses prévues en laboratoire, en particulier la mesure de la perméabilité et celle de la distribution des fractures. Ces aspects n'ont toujours pas trouvé de solution technique.

Dès les premières études de caractérisation du site, la veine et son environnement ont montré une grande hétérogénéité. De fait, la caractérisation apportera son lot de découvertes.

L'établissement de logs géologiques le long de la galerie et d'un forage dans le massif a affiné la compréhension de la stratigraphie locale. Des analyses d'échantillons prélevés en galerie et sur carotte ont apporté les paramètres de base (humidité, densité, porosité, perméabilité, vitesse sismique) qui permettront de contraindre les modèles numériques. Des caractérisations mécaniques des matériaux ont également été menées, des lames minces ont été réalisées et étudiées. La réalisation de diagraphies dans le forage de caractérisation a de plus permis d'enregistrer huit paramètres en continu (contribution Total).

L'université d'Oviedo (Espagne), sur demande d'Hunosa, a procédé à des profils gravimétriques. Deux venues d'eau majeures traversant la galerie ont été repérées. Elles sont situées de part et d'autre de la veine d'étude,

leur géochimie (pH, conductivité électrique, composition, rapports isotopiques en ^2H et ^{18}O , microscopie électronique à balayage) a été caractérisée par Aitemin. À notre grand étonnement, tout le massif s'est révélé partiellement saturé en eau. Un modèle hydrogéochimique de la zone a été monté. L'université d'Oviedo a procédé à des analyses géomécaniques.

Le tenseur des contraintes mesuré par la technique de surcarottage par l'Ineris et Total a rappelé le contexte tectonique particulier des Asturies, indiquant des contraintes principales fortement anisotropes.

Quinze forages pour une injection

Le but principal de Carbolab étant de tracer le comportement des fluides et du charbon, un soin particulier a été porté aux méthodes de suivi. Pas moins de quinze forages ont été pratiqués pour l'injection et le suivi des gaz (figure 4). Un forage d'injection du CO_2 atteint la veine de charbon à 26 mètres derrière la paroi. Un forage d'extraction du CH_4 sert à la fois à la mise en sécurité de l'installation et à des tests éventuels de récupération assistée du méthane.

Trois forages dédiés à la sismique passive encadrent la veine dans les épontes à 10 mètres de part et d'autre. Deux éventails de trois forages, situés dans les épontes à cinq mètres de chaque côté de la veine, permettent de réaliser les mesures électriques (méthodes passive et active), de sismique active et de radar. Deux forages géochimiques longent également la veine, à quelques mètres ; ils doivent détecter les éventuelles fuites de CO_2 ou de CH_4 par les épontes. Enfin, deux autres forages géochimiques aboutissent dans la veine de charbon ; ils doivent permettre de repérer les différents fronts de propagation des fluides par des mesures de pH, chimie, isotopie des gaz et gaz dissous. Un suivi microgravimétrique est entrepris depuis la galerie, ainsi qu'une surveillance des gaz (figures 5).

“ Pas moins de quinze forages ont été pratiqués pour l'injection et le suivi des gaz. ”

Fig. 4 : Schéma en plan des forages entourant la veine de charbon, et le travers-banc (en orange).

D'après Hunosa.

Fig. 4: A two-dimensional diagram of the boreholes surrounding the coal seam, and the cross-cut (in orange).

From Hunosa.

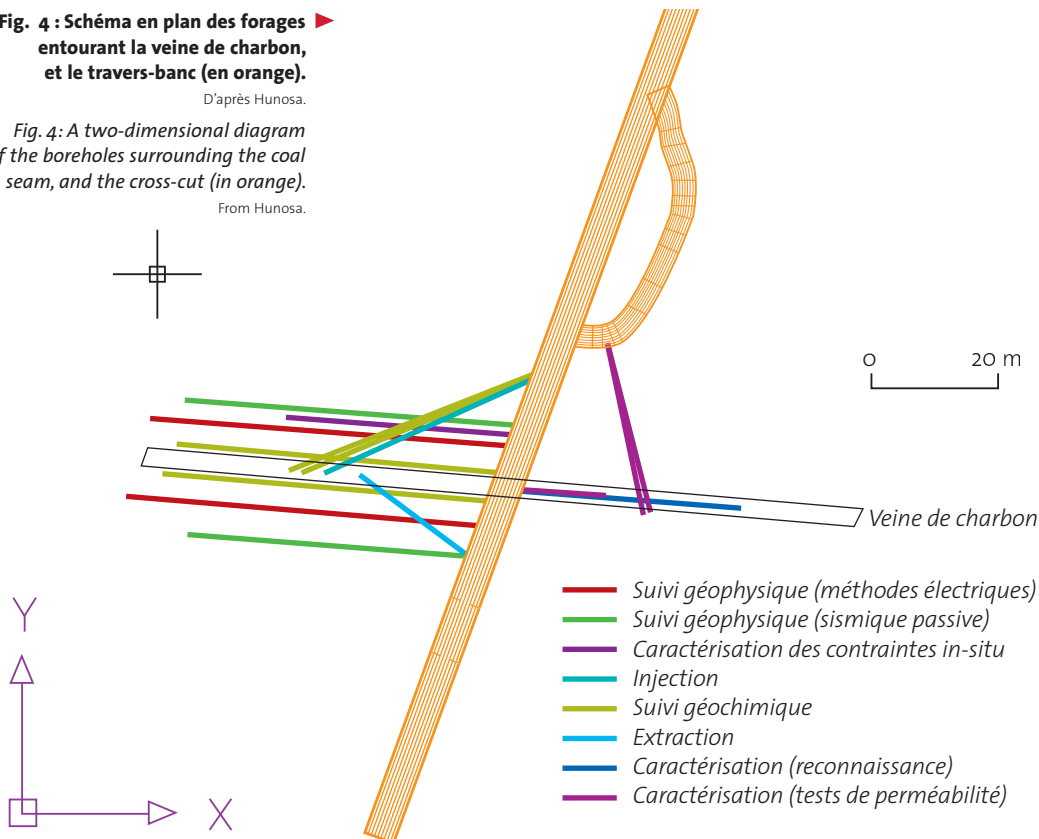


Fig. 5 :

a : Le puits de la mine de Monsacro.

a: The Monsacro mine shaft.

© BRGM – E. Proust.

b : Opération de forage dans la galerie.

b: Drilling operation in the gallery.

© Hunosa.

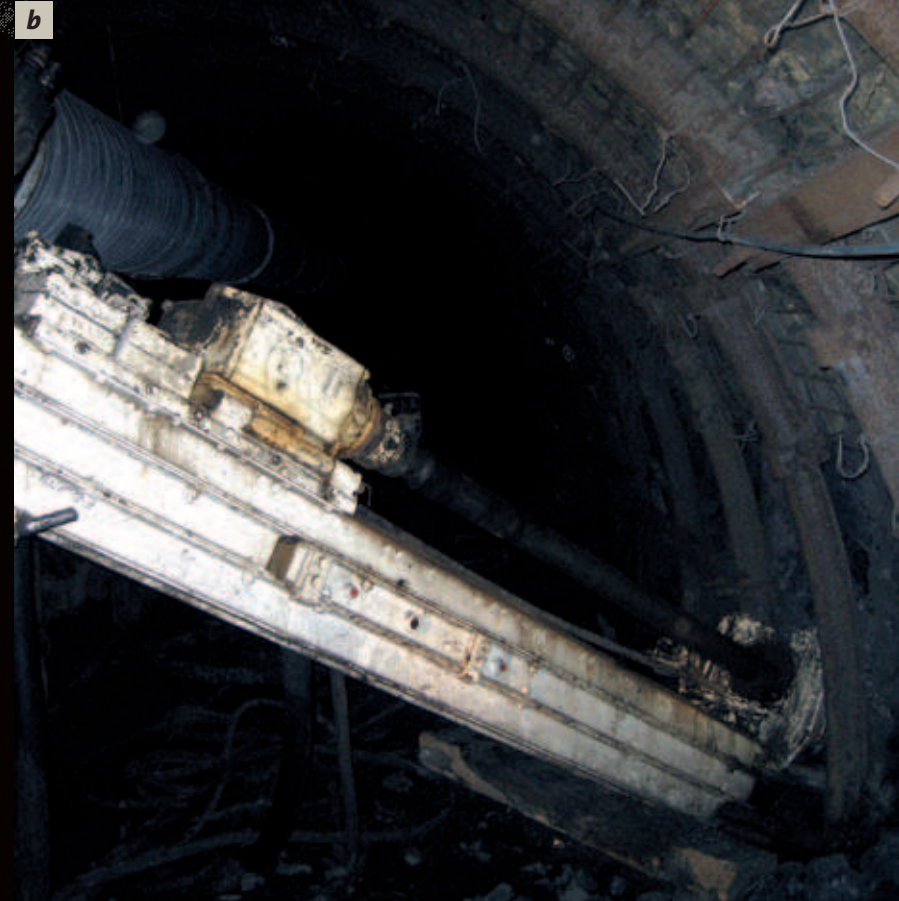
c : Installation du matériel de géophysique en armoire étanche au fond de la mine.

c: Installation of geophysical equipment in a watertight cabinet at the bottom of the mine.

d : Emplacement futur des flûtes géophysiques.

d: Future position of the geophysical streamers.

© BRGM – P. Wawrzyniak.



Le projet retardé par la crise espagnole

Comme fréquemment, ce projet a connu des retards, dus notamment à des difficultés de foration. Mais depuis mi-2012, il souffre surtout de la conjoncture économique espagnole. En effet, les plans de l'Union européenne prévoient un arrêt des aides à l'exploitation charbonnière d'ici 2018. Or, les mines ne peuvent être rentables sans aide. Face à la crise, le gouvernement espagnol a décidé d'anticiper la décroissance de la production charbonnière et de réduire ses aides dès 2012 (111 M€ contre 301 M€ en 2011, soit -63%). Le 31 mai 2012, les syndicats ont appelé à la grève illimitée. Elle s'est poursuivie durant 67 jours, mais les syndicats n'ont pu obtenir d'assouplissement du gouvernement.

Depuis le début du bras de fer, nos partenaires espagnols ne sont plus en mesure d'encadrer le travail en mine. L'injection a dû être reportée, et aura lieu au tout début de mars 2013.

Modélisation et long terme

Toute l'activité du projet n'est pas tributaire d'opérations en mine. Les enregistrements de suivi d'injection devaient permettre de caler un modèle dynamique créé pour l'occasion. Celui-ci a été développé. Il inclut l'adsorption, les déformations mécaniques (gonflement, retrait) et les variations de porosité et de perméabilité liées aux contraintes mécaniques et aux sorptions différentielles des gaz. Notons cependant qu'il se limite à un traitement isotherme et surtout néglige les réseaux de fractures.

La modélisation a pris le parti d'associer deux codes sous l'ordonnancement d'un superviseur. Tough2 est largement utilisé dans les études de stockage de CO2 en aquifères. Son module EOS7C a été modifié dans le cadre du projet en un EOS7CS prenant en compte l'adsorption, sous la forme d'un modèle de sorption selon Langmuir étendue. Cependant, il ne comprend pas les effets mécaniques (gonflement et fluage) induits par la sorption et l'échange avec le CH4 adsorbé. Pour cette partie, le dialogue est établi avec un solveur mécanique développé par le BRGM sous Code_Aster, fourni par EDF. Un superviseur écrit en langage Python mène le calcul en parallèle sur les deux codes.

Un jeu de paramètres a été choisi de manière à représenter le charbon tel que nous l'imaginons après les travaux de caractérisation. Une simulation de test a consisté en l'injection numérique, dans un charbon 2D-axisymétrique d'un rayon de 25 mètres, de CO2



sous 4,5 MPa pendant 24 heures, suivi de 96 heures de relaxation. Un premier résultat prédit l'absence de réponse mécanique notable des épontes.

Une résolution se calcule en 6 heures sur un ordinateur courant. Les simulations ont montré une surpression (+0,5 MPa) limitée aux premiers mètres et de faibles variations de porosité. Durant ces simulations, près de 700 kg de CO2 ont été injectés en 24 heures. Comme attendu, on observe une montée en CH4, chassé par le gaz injecté, suivie d'une baisse abrupte à l'arrivée du front de CO2. Les études montrent également une forte sensibilité aux paramètres de déformation volumique des gaz. Cela peut expliquer les différences de comportements entre plusieurs injections *in situ*.

Une fois étalonné, ce modèle devra permettre également d'explorer numériquement les conditions de sécurité à long terme d'un stockage de taille industrielle. L'objectif consiste à abaisser le plus possible les risques associés à cette technique pour l'homme et l'environnement.

Le laboratoire souterrain du Carbolab est prêt à être utilisé. L'environnement de la veine est équipé pour le suivi de l'injection de CO2, de même que les outils

▲ Carottes provenant du fond du puits d'injection, mine de Monsacro.

Drilling cores extracted from the base of the injection well, Monsacro mine.

© BRGM – H. Bauer.

Rejoignez l'Enag

l'École Nationale d'Applications des Géosciences

Pour répondre aux nouveaux besoins en ressources minérales



Une formation axée vers :

- > La gouvernance des ressources minérales (législation, économie, gestion, ...),
- > La géologie minière (de l'exploration à l'exploitation),
- > Les géotechnologies, pour valoriser les ressources et prévenir les risques environnementaux,
- > La pratique du terrain (2 mois d'écoles de terrain en France et à l'étranger)

Au cœur du campus Géosciences Orléans, l'ENAG s'insère, sur le site du BRGM à Orléans La Source, dans un campus d'Enseignement Supérieur (OSUC, Polytech'Orléans), de recherche (CNRS, INRA, Université, ...) et d'entreprises innovantes.

Rejoignez l'ENAG

Spécialisation en ressources minérales pour titulaires de M2 ou diplôme d'ingénieur. Formation en 16 mois (dont 5 mois de stage) ou 22 mois avec un contrat d'apprentissage.

Informations et inscriptions :

www.enag-brgm.fr
enag@brgm.fr



Publicité

de modélisation permettant des premières estimations de comportement sont opérationnels.

L'injection réelle dans la veine, prévue en mars 2013, apportera sa moisson d'informations. Il restera aux équipes à interpréter les observations géophysiques et géochimiques, étalonner et valider les modèles de simulation, déterminer et encadrer les risques à long terme.

Une fois achevé, ce projet aura permis de lever plusieurs des verrous majeurs qui bloquent l'utilisation des gisements de charbon, non économiquement exploitables, comme puits de CO₂. Il aura en tout cas fait avancer la connaissance sur ce milieu et sur les interactions complexes dont il est le siège.

Dans l'hypothèse d'une remontée des prix du carbone, les résultats accumulés pourront ouvrir la voie à l'établissement de pilotes de stockage de CO₂ en veine de charbon, avant le déploiement de projets à l'échelle industrielle. ■

Pour plus d'informations, consulter le site web du projet : www.carbolab.eu



Returning carbon into coal – The Carbolab Project

CO₂ injection into deep, unmineable coal seams is one means to reduce greenhouse gas emissions whilst recovering methane, a valuable gas. However, this storage option entails considerable uncertainties and technical difficulties.

Its potential feasibility and economic interest depend essentially on the coal's permeability and the quantity of the recoverable methane. The methane content of coal generally ranges from 5 to 25 m³/t, and CO₂ injection conventionally allows 1 mole of methane to be replaced by 2 to 5 moles of CO₂ (the CO₂ adsorption rate increases with the pressure). Tests to date involved highly permeable coal like that mined in the United States under conditions quite unlike those in European deposits. The only European tests are those of the EC-supported RECOPOL project. Yet none have proven the controllability of the actual CO₂ storage process. What percentage of CO₂ is absorbed, what percentage stored in the coal's permeability, what percentage diffused

into adjacent strata, often with higher permeability than coal? These unknowns remain and are a serious obstacle to demonstrating this technique's feasibility and its reliability and safety as a storage option.

The Carbolab project will address these issues by performing underground CO₂ injection and CBM production tests in a panel of a Spanish coal mine conditioned for the purpose. Tests will be run from below ground to save cost and improve experiment control by reducing size. Data obtained should be of higher quality and density than in tests piloted from the surface (i.e., RECOPOL) and, together with laboratory tests, will enable the behaviour of the injected gases and of the methane initially contained in the coal bed to be observed in detail and yield clear parameters for the processes at work. This information will help model these phenomena and contribute to our understanding of the ECBM process and the long-term safety of CO₂ storage.