

Centre de géosciences

(MINES ParisTech – GEOSCIENCES)

Directeur : Damien GOETZ

Téléphone (33)1 64 69 49 56/47 10

Courriel contact@geosciences.mines-paristech.fr

Web et publications

<http://www.mines-paristech.fr/Fr/Geosciences>

Enseignants chercheurs 55

Autres personnels 39

Doctorants MINES ParisTech 48

Autres étudiants 41

(y compris les Formations spécialisées)

Le Centre de Géosciences regroupe l'ensemble des activités de recherche et d'enseignement du domaine des sciences de la terre de MINES ParisTech. Ses missions de formation et de recherche sont appliquées à la connaissance, l'exploitation et la gestion du sous-sol, qu'il s'agisse de la mise en valeur des ressources ou encore de l'étude de l'impact des activités humaines sur les objets du sol et du sous-sol dans une perspective de développement durable.



Formation

En matière d'enseignement, et outre la participation aux enseignements du cycle ingénieur civil de MINES ParisTech, le centre est responsable de 5 cycles doctoraux (accrédités dans des Écoles doctorales) et participe à plusieurs formations de type Master. Il est par ailleurs très impliqué dans des actions de formation spécialisée et continue, à travers l'organisation et l'animation de divers séminaires, mais surtout à travers sa responsabilité sur quatre formations spécialisées de MINES ParisTech en partenariat avec le CESMAT (*administration publique des mines, géostatistique, exploitation minière à ciel ouvert, et évaluation économique de projets miniers*).



Recherche

Les activités de recherche du Centre se déploient sur quatre thématiques :

- l'exploitation des matières premières minérales et des combustibles fossiles ;
- la stabilité à long terme des milieux géologiques et de leurs ouvrages ;
- l'environnement ;
- les risques liés au sol et au sous-sol.

À ces thèmes s'ajoute la présentation des moyens expérimentaux, particularité remarquable du Centre, et des outils numériques sur lesquels s'appuient les travaux menés.

Exploitation de matières premières minérales et de combustibles fossiles

L'exploitation de matières premières minérales est une activité profondément ancrée dans l'histoire de l'École. Les équipes du Centre travaillent sur des questions de caractérisation de gisements ou d'environnements de gisements et sur les techniques d'exploitation.

L'exploitation des hydrocarbures est l'un des principaux domaines d'application du Centre, depuis des travaux géologiques de caractérisation ou de modélisation/simulation des gisements, jusqu'au développement de technologies d'exploitation au travers des travaux sur le forage pétrolier, en passant par les développements des techniques géostatistiques et d'imagerie sismique.

Le Centre s'intéresse finalement à des thèmes liés plus largement à l'exploitation de ressources naturelles comme la géothermie.

Le Centre confirme également sa nouvelle orientation vers l'exploitation d'uranium. En partenariat avec AREVA, des simulations chimiques et de transport réactif ont été réalisées à l'amont de l'exploitation, pour recréer la formation des dépôts de type roll-front. L'exploitation elle-même, par récupération *in situ*, a été modélisée pour aider à la compréhension des réactions chimiques dans des colonnes de laboratoire, ou à celle des mécanismes complexes liant chimie, écoulements complexes dans des milieux fortement hétérogènes à l'échelle d'une cellule de production. Enfin, les modèles ont été utilisés pour prévoir à grande échelle les impacts environnementaux de l'exploitation.

Stabilité à long terme des milieux géologiques et de leurs ouvrages

Le domaine du stockage en souterrain étant en très fort développement, toutes les équipes du Centre y sont impliquées soit dans des projets relatifs au stockage de déchets radio-actifs à haute activité et à vie longue (HAVL), soit dans des projets liés au stockage

géologique de CO₂, soit dans des projets liés au stockage de gaz en cavités salines, soit encore dans des projets liés au stockage souterrain de chaleur ou d'énergie.

L'analyse de la stabilité d'ouvrages réalisés ou fondés dans le sous-sol est également un axe de travaux pour le Centre.

Environnement

Les travaux menés par le Centre dans ce domaine portent aussi bien sur la caractérisation de sols pollués, le développement d'une plate-forme intégrée de modélisation du cycle de l'eau couplée avec des modèles météorologiques et des modèles d'infiltration des eaux de surface (dans le cadre du PIREN Seine), la caractérisation et la définition de procédures d'échantillonnage dans le domaine de la qualité de l'air.

Risques liés au sol et au sous-sol

Le Centre a développé, durant les dernières années, des travaux portant essentiellement sur l'analyse des effets de site en contexte sismique, ou encore l'analyse des phénomènes de retrait-gonflement de matériaux argileux, qui sont à l'origine de l'aléa de sécheresse géotechnique.

Par ailleurs le Centre travaille sur des questions d'après-mine, aussi bien dans le cadre du GISOS au niveau national, que dans celui de projets européens financés par le Research Fund for Coal and Steel (RFCS).

Moyens de caractérisation et outils numériques

Pour mener à bien ses travaux de recherche et d'expertise, le Centre dispose d'importants moyens de caractérisation et d'expérimentation, parmi lesquels une microsonde ionique, un diffractomètre à rayons X, des moyens de microscopie électronique à balayage, des équipements de pétrophysique (porosimètres, perméamètres), des équipements de mécanique des roches et des sols, des équipements liés à l'étude de la fragmentation mécanique et hydraulique des roches, des équipements liés au forage pétrolier (sur son site palois) et, enfin, des laboratoires d'analyse des eaux.

Par ailleurs le Centre développe ses propres outils numériques au service des travaux de recherche (MODCOU et METIS pour l'étude des écoulements et des transferts de matière dans les milieux poreux ; CHESS et HYTEC pour le transport réactif ; VIPLEF pour l'étude de la stabilité d'ouvrages souterrains ; ABIS pour l'analyse du comportement des systèmes de forage pétrolier), ou contribue au développement de logiciels largement commercialisés (en particulier ISATIS, plate-forme géostatistique diffusée par Géovariances).

Depuis 2006, l'expertise du Centre sur les codes couplés a été valorisée au sein d'un logiciel dédié à l'optimisation des résines de purification des circuits de centrales nucléaires : OPTIPUR. En 2010, le logiciel a évolué avec une interface graphique plus conviviale, l'ajout de nouveaux objets (vannes, termes source), la prise en compte d'événements et l'intégration d'une description plus fine des cinétiques de transport au niveau des couches d'eau immobile qui entourent les billes de résine.



Faits marquants

L'année 2010 a été marquée par l'organisation en avril du séminaire « Modélisation des hydrosystèmes » destiné à fêter les 30 ans de la création du logiciel de modélisation couplée « surface-souterrain » MODCOU, initié et développé par E. Ledoux, directeur de recherche et conseiller scientifique au centre de Géosciences. Les diverses applications de ce logiciel en ingénierie, en prévision opérationnelle en collaboration avec Météo-France ou en prospective dans le cadre d'un possible changement climatique ainsi que les nouvelles applications de type « modélisation intégrée » en cours de développement au sein de divers organismes (CEMAGREF, CNRM de Météo-France, BRGM, INRA, MINES ParisTech...) ont été retracés.

Le Centre de Géosciences a participé en octobre, en tant qu'acteur majeur, à la célébration des 200 ans du corps des Mines. Des outils de forage, fruits de recherches conjointes menées en partenariat avec la société VAREL, ont été exposés dans le hall Bérégovoy du Ministère des Finances. Ces outils présentent les différentes innovations et options mises en œuvre pour améliorer les performances en termes de durée de vie et vitesse d'avancement. De la forme des lames à la taille et la forme des taillants, tout est étudié et simulé à partir de lois de fonctionnement développées par le centre de Géosciences.

Enfin le Centre a été sollicité en tant qu'expert auprès de nombreux médias, lors des événements survenus dans le Golfe du Mexique (marée noire) et au Chili (mine de San José).

Deux enseignants-chercheurs ont été recrutés pour renforcer l'équipe de *Géologie de l'ingénieur et Géomécanique* et un en *Hydrodynamique et Réactions*.

Kouakou Yao, doctorant en spécialité Dynamique et ressources des bassins sédimentaires, a obtenu pour son travail sur l'albitisation triasique, le prix de la meilleure présentation lors du congrès « Lamprophyres 2010 » de la Société Minéralogique de Pologne.

De l'appliqué au fondamental ...

Contact : Christine Franke – christine.francke@mines-paristech.fr

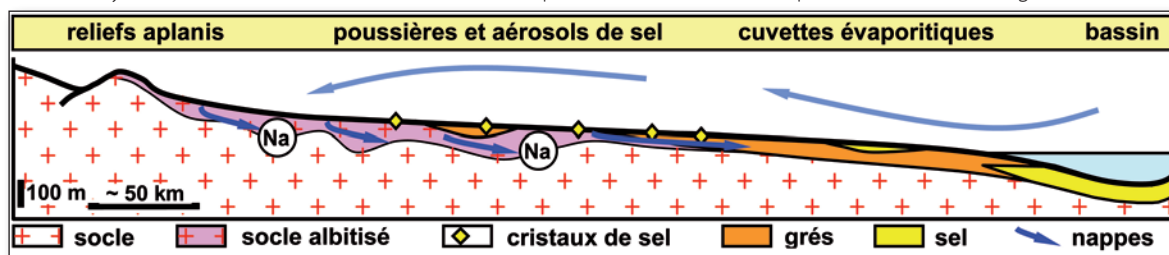
Émergence des idées...

Lors de travaux sur les gisements d'uranium, au cours des années 70, la géologie minière a montré des altérations particulières du socle sous la paléosurface triasique. La question a rebondi ces dernières années. Des missions de terrain ont permis de reconnaître ces albitisations de l'Afrique du Nord jusqu'en Scandinavie et de les dater du Trias par paléomagnétisme. La bibliographie laisse entrevoir son extension au Canada, dans les Appalaches... et jusqu'en Australie.



Signification

Ces albitisations sont liées à la paléosurface triasique et de ce fait imputables à des altérations en connexion avec l'atmosphère et les paysages. Deux phénomènes entrent en conjonction pour favoriser leur développement : la grande stabilité des continents pendant le Trias et le climat chaud et sec de cette période. C'est l'époque du dépôt de gigantesques couches de sel ... du chlorure de sodium (NaCl) ... or l'albitisation est un enrichissement en sodium des roches ... il y a sûrement cause à effet. Cette albitisation pourrait constituer le marqueur d'un évènement global ?



Ainsi va la recherche...

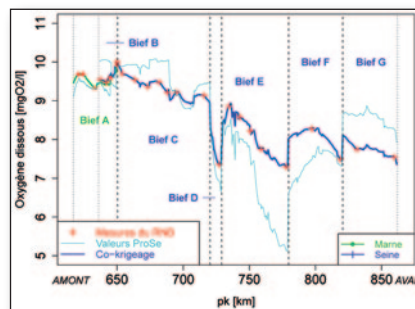
Cette quête de la paléosurface triasique montre l'importance du temps de réflexion et de murissement des idées en recherche ... Il faut savoir « pister » un sujet et maintenir la connaissance, ... pour le cueillir à point ! Pour cela, le chercheur doit disposer d'un espace de liberté, où il lui est possible de « cultiver son jardin » ... pour l'albitisation MINES ParisTech à pleinement joué ce rôle.

Combiner modélisation déterministe et géostatistique pour améliorer la description de la qualité des cours d'eau

Contact : chantal.de_fouquet@mines-paristech.fr, nicolas.flipo@mines-paristech.fr

L'état des cours d'eau est caractérisé à partir des réseaux de mesures, qui comportent un nombre réduit de stations par bief, ou à l'aide de modèles déterministes tels le modèle ProSe, développé au Centre de Géosciences, qui simulent les processus de façon approchée en tout point du réseau hydrographique. Rapprochant les équipes Géostatistique et Systèmes hydrologiques et réservoirs, ce projet financé par l'institut Carnot M.I.N.E.S. explore les solutions offertes par la géostatistique pour améliorer l'estimation des concentrations le long d'un réseau hydrographique en combinant ces deux informations. Dans une première étape, l'analyse exploratoire conduit à modifier les conditions aux limites amont afin d'assurer la cohérence entre le modèle ProSe et différents ensembles de mesures. ProSe est ensuite utilisé comme maquette pour l'inférence d'un modèle géostatistique cohérent avec la topologie arborescente du réseau hydrographique, pour deux substances importantes pour la qualité de l'eau : les nitrates et l'oxygène dissous. Un krigeage multivariable fournit alors une estimation des concentrations à partir des mesures aux stations de surveillance, ou mieux, en couplant ces mesures au modèle ProSe afin de restituer les singularités entre stations.

Estimation des concentrations annuelles en oxygène dissous dans la partie aval de la Marne et de la Seine, couplant les mesures du Réseau National de Bassin (RNB, en rouge) aux résultats du modèle déterministe ProSe (« Valeurs ProSe », en bleu clair). La courbe des concentrations estimées (Co-krigeage) passe par les mesures aux stations tout en présentant les irrégularités affichées par ProSe.



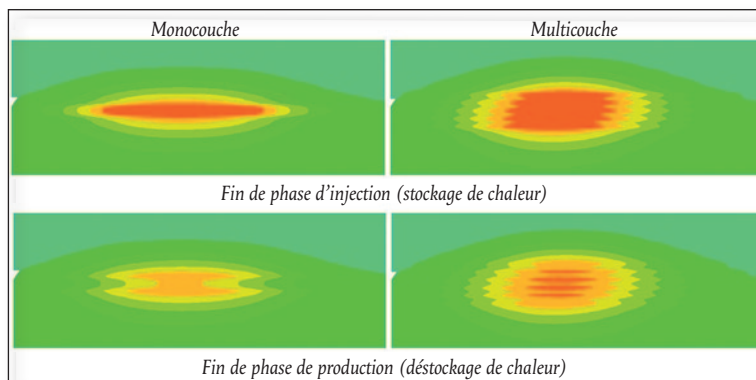
GEOSTOCAL - Projet BRGM, EIVP, UMLV, MINES ParisTech, CPCU, CFG Services

Contact : patrick.goblet@mines-paristech.fr

Le projet GEOSTOCAL (GEO-STOckage de ChAleur : opportunités, optimisation et faisabilité du stockage de chaleur perdue en aquifère) étudie la faisabilité scientifique, technique et économique d'un stockage inter-saisonnier d'énergie thermique en aquifère.

Pour qu'un tel projet puisse se développer, il faut localement et simultanément disposer d'une source de chaleur excédentaire en période estivale, de niveaux géologiques permettant du stockage (réservoir aquifère) et avoir la possibilité de valoriser le déstockage en période hivernale. Ces trois conditions sont parfaitement remplies sur un site situé à Ivry-sur-Seine (Val de Marne) :

1. Les trois usines d'incinération des ordures ménagères parisiennes produisent de la chaleur en excès en période estivale : une puissance (jusqu'à 100 MW) pourrait être accessible à Ivry via le réseau de vapeur de la CPCU.
2. L'aquifère du Dogger est un réservoir géologique potentiellement favorable pour du stockage. Un ancien doublet géothermique sur le site d'Ivry donne accès à une première connaissance locale du réservoir qui est complétée par les retours sur expérience des nombreuses exploitations de la ressource géothermale du Dogger en Île de France.
3. Les besoins énergétiques du réseau de chaleur local existant devraient pouvoir facilement bénéficier de l'énergie déstockée. Un projet de renouvellement urbain programmé à Ivry prévoit à moyen terme l'extension des réseaux de chaleur avec des caractéristiques directement compatibles avec la température de déstockage.



Modélisation par METIS du comportement du réservoir hétérogène.

reste très supérieure à celle nécessaire pour alimenter un réseau de chaleur (70°C). Tout ceci indique que les prédictions de comportement thermique du réservoir sont robustes vis-à-vis de la connaissance forcément limitée de ce dernier.

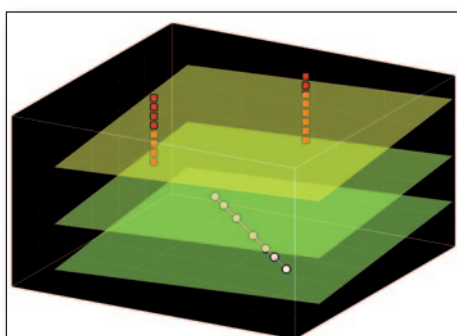
L'équipe Systèmes hydrologiques et réservoirs du centre a étudié dans ce contexte la faisabilité scientifique, technique et économique du stockage inter-saisonnier de chaleur en aquifère profond et a précisé un scénario pratique dans le cas de l'aquifère du Dogger en région parisienne pour stocker une énergie fatale estivale en vue d'une réutilisation hivernale en réseau de chaleur. La modélisation du comportement du réservoir a montré qu'un régime d'équilibre est atteint (autour de la 10^e année) et que, indépendamment de la structure monocouche ou multicouche du réservoir, la température de l'eau tout au long de la période de déstockage

Approche stochastique de l'inversion tomographique (projet Carnot)

Contacts : alexandrine.gesret@mines-paristech.fr, mark.noble@mines-paristech.fr, nicolas.desassis@mines-paristech.fr, thomas.romary@mines-paristech.fr

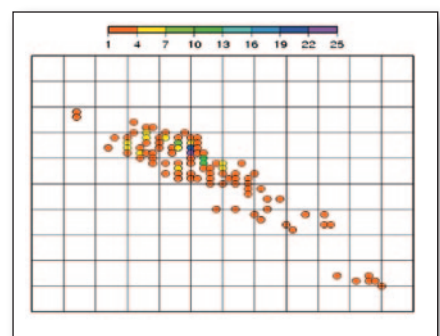
Cartographier le modèle de vitesse à partir de données géophysiques (passives ou actives) est l'un des objectifs de l'équipe Géophysique. La vitesse à laquelle se déplace l'onde dans un milieu renseigne indirectement sur certaines propriétés géomécaniques du milieu ; le modèle de vitesse peut également être utilisé directement pour localiser les hypocentres des séismes ou des failles.

Des développements récents ont permis d'accélérer la résolution de ce problème dans un cadre déterministe mais ne permettent pas d'évaluer l'impact des incertitudes de mesure et de modélisation sur la solution. Dans le cadre d'un projet Carnot, des algorithmes stochastiques ont été développés. Ils permettent de générer différentes réalisations du modèle de vitesse conditionnellement aux données observées et rendent compte des incertitudes de mesure. Les réalisations générées par l'algorithme peuvent ensuite être utilisées, par exemple, pour la localisation d'événements micro-sismiques. Cette approche permet une caractérisation plus fine des incertitudes de localisation que les approches classiques comme l'illustre la seconde figure.



Incertitudes de localisation d'un événement microsismique (l'échelle de couleur indique la probabilité de l'occurrence de l'événement en un point donné).

Vue 3D d'un modèle de vitesse à couches, avec des tirs enregistrés (cercles blancs) par des capteurs (carrés rouges).

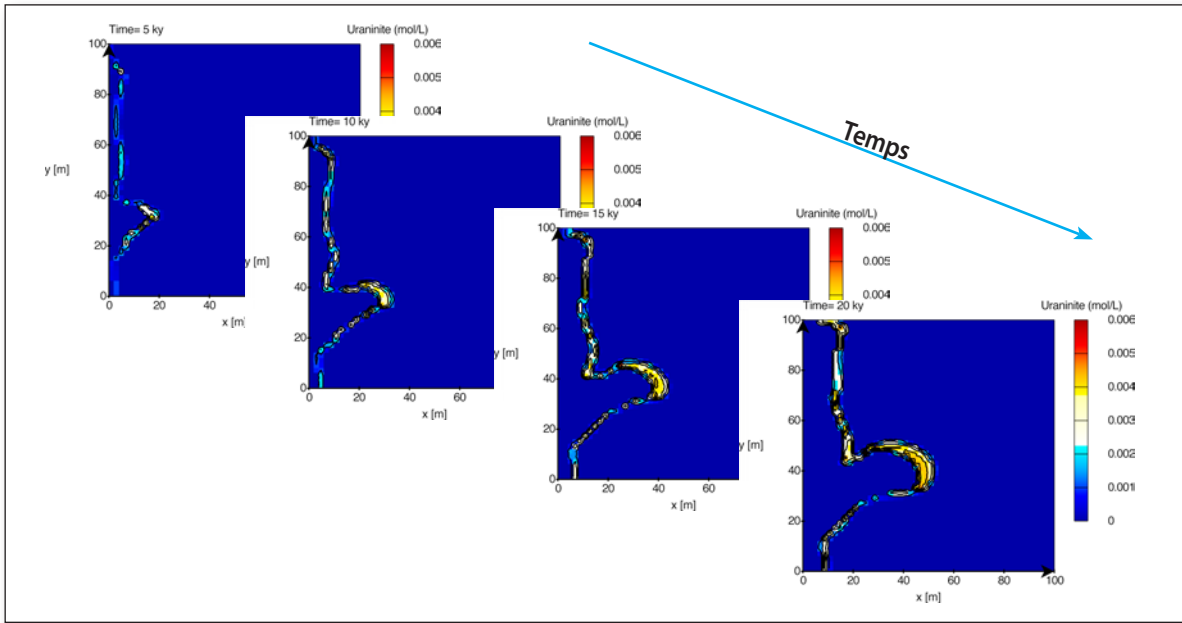


Modélisation du transport réactif de gisements d'uranium : du dépôt à l'exploitation

Contact : vincent.lagneau@mines-paristech.fr

En partenariat avec AREVA, les logiciels de géochimie CHESS et de transport réactif HYTEC sont utilisés dans différents domaines de l'exploitation.

À l'amont, des simulations tentent de recréer la formation des dépôts de type *roll-front*. À partir d'informations générales sur les conditions de dépôt de l'aquifère cible, la mise en œuvre des mécanismes géochimiques et d'écoulement en milieu poreux permet de retracer la mise en place des gisements. Les études se poursuivent au Centre pour adapter à des sites réels la méthodologie développée.



L'exploitation elle-même, par Récupération *in situ*, est aussi étudiée : les modèles reproduisent et aident à la compréhension des réactions chimiques dans des colonnes de laboratoire, ou des mécanismes complexes liant chimie, écoulements complexes, le tout dans des milieux fortement hétérogènes à l'échelle d'une cellule de production.

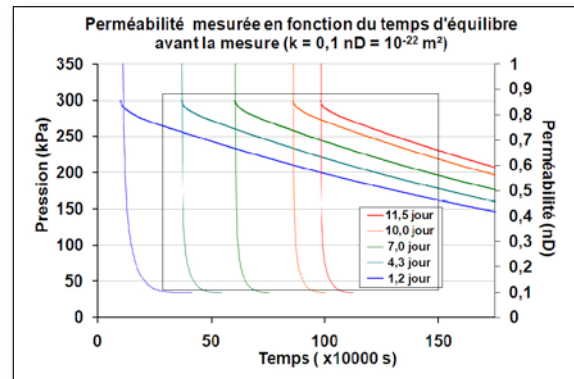
Enfin, ces modèles sont utilisés pour prévoir à grande échelle les impacts environnementaux de l'exploitation.

Caractérisation des géomatériaux très peu perméables (projet Carnot)

Contact : joel.billiotte@mines-paristech.fr

L'appellation très peu perméable traduit la non imperméabilité absolue des géomatériaux, c'est-à-dire le fait qu'un fluide peut les traverser... sans pour autant que les mécanismes d'écoulement et de transfert soient bien connus. Le Centre de Géosciences s'est engagé dans la maîtrise de la détermination expérimentale de très faibles perméabilités et la connaissance des flux dans ce type de milieux de manière à pouvoir ainsi répondre aux demandes d'opérateurs de stockages in situ (hydrocarbures, déchets) et à celles de l'exploration pétrolière profonde. Une action CARNOT M.I.N.E.S *Géomatériaux Très peu perméables* a permis de doter le Centre d'une capacité de mesure effective et précise des perméabilités et de lui assurer une compréhension de l'ensemble des processus physiques intervenant dans le transfert de masse au travers de ces géomatériaux très peu perméables. Ces mesures précises et sensibles de la perméabilité sont utilisées pour la caractérisation intrinsèque de roches en géologie ou pour l'évaluation de l'endommagement et du vieillissement de roches ou de matériaux cimentaires dans des structures souterraines et des ouvrages de génie civil.

Le protocole expérimental développé à partir d'un essai de Pulse-test permet de découpler la mesure de la perméabilité de celle de la porosité et de s'affranchir de l'obtention d'un état d'équilibre initial qu'il n'est pas possible d'atteindre pour d'aussi faibles perméabilités. Plusieurs maquettes d'un banc de mesure ont été réalisées et validées ($k \geq 0,3$ nD) avec un contrôle des contraintes mécaniques (≤ 30 MPa) et de la température (30 - 70°C). De futurs développements devraient permettre d'atteindre des valeurs de perméabilité de 0,01 nD (10^{-23} m²).



Stabilité des cavités de stockage

Modélisation de la stabilité des blocs rocheux aux parois des cavités minées destinées au stockage de produits pétroliers (GEOSTOCK) et détermination d'un éventuel soutènement assurant la stabilité

Thèse de Rima Ghazal, rima.ghazal@mines-paristech.fr

Contact : faouzi.hadj_hassen@mines-paristech.fr

Des blocs de toute forme géométrique peuvent être étudiés grâce à une discrétisation (maillage) de la surface (Fig1). L'étude de stabilité se fait pour chaque bloc isolé en prenant en compte les contraintes initiales et la loi de comportement des joints et en considérant un déplacement du bloc en corps solide sous forme de translation et de rotation.

Le degré d'instabilité est évalué en calculant le coefficient de déchargement de la future face libre au moment où le critère de Mohr-Coulomb est atteint. Une valeur inférieure à 1 signifie que le bloc est instable. Ce coefficient dépend largement des contraintes initiales et du rapport entre les rigidités des joints (Fig2). Les résultats en termes de contraintes calculées au niveau des faces (Fig3) sont beaucoup plus proches des résultats des méthodes exactes que de ceux obtenus avec les autres méthodes classiques de blocs clés.

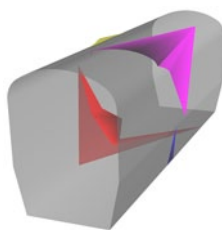


Fig1. Blocs et galerie.

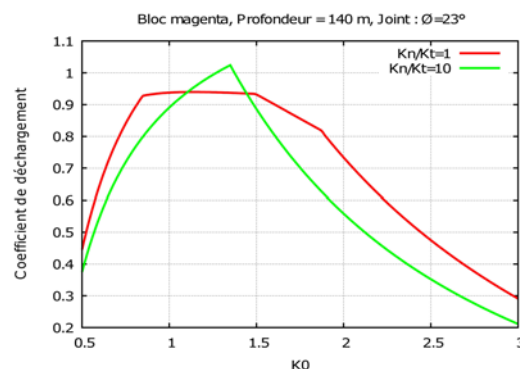


Fig2. Degré d'instabilité d'un bloc.

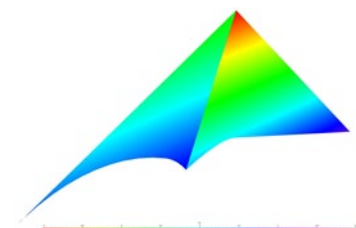


Fig3. Contraintes normales.

Stabilité des cavités de stockage

Recherche des lois de comportement qui régissent l'action du soutènement par boulons et câbles des parois des cavités souterraines de stockage des déchets nucléaires (ANDRA)

Thèse de Laura Blanco-Martin, laura.blanco_martin@mines.paristech.fr

Contact : faouzi.hadj_hassen@mines-paristech.fr

Un nouveau banc expérimental (Fig 4) a été conçu afin d'étudier le comportement à l'arrachement des boulons et des câbles d'ancrage sous différentes conditions (pression de confinement, matériau de scellement, type et profil de la tige, etc.). Ces essais ont pour but la détermination de la loi de comportement de l'interface boulon-scellement, loi dont la connaissance est nécessaire pour prédire par modélisation le rôle stabilisant d'un système de soutènement utilisant des boulons ou des câbles avec un ancrage réparti.

Dans le cadre d'une approche théorique classique une solution analytique inédite a été développée (modèle théorique). La confrontation entre réalité (un boulon en acier de 20 mm de diamètre et une roche sous un confinement de 5 MPa) et le nouveau modèle est encourageante.

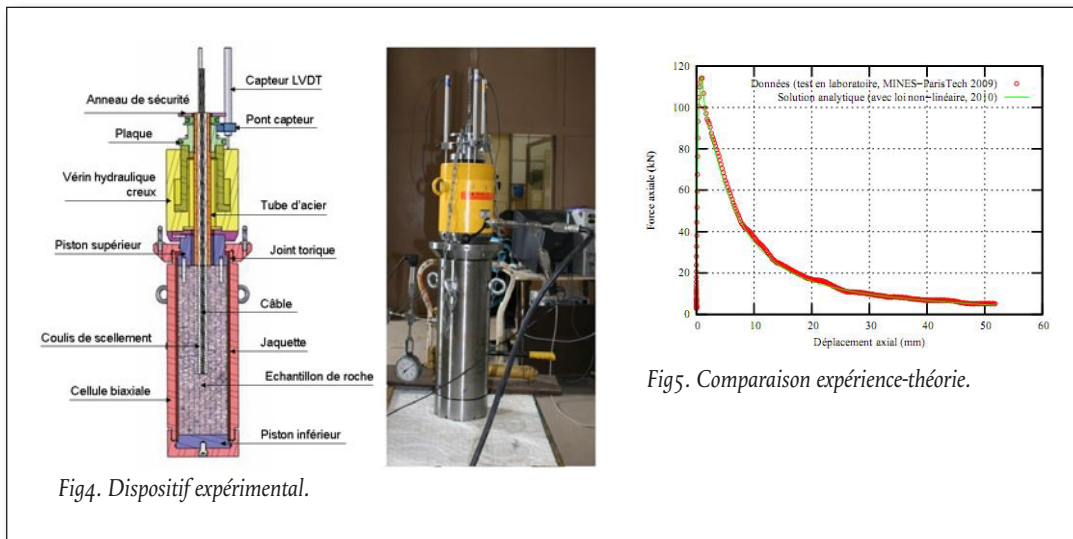


Fig4. Dispositif expérimental.

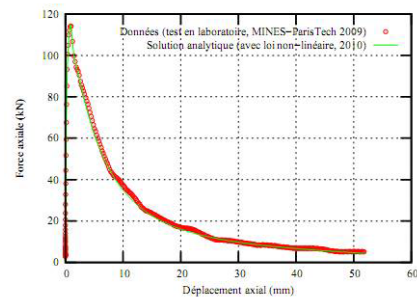


Fig5. Comparaison expérience-théorie.