



## Comité Français de Mécanique des Roches

**le cnam**  
école sciences industrielles &  
technologies de l'information  
Département Ingénierie dans  
la Construction et Energétique  
Géologie Géotechnique

Invitation à la

Séance Technique du 20 octobre 2016

### **Thermomécanique des roches**

CNAM, 292 rue St-Martin, 75003 Paris (métro : Réaumur-Sébastopol)

Amphi Abbé-Grégoire (C) Accès 16.

(Entrée libre et gratuite)

- |                |  |
|----------------|--|
| <b>14 : 00</b> | <b>Accueil des participants</b>  |
| <b>14 : 10</b> | <b>Introduction à la thématique</b>  |
| <b>14 : 20</b> | <b>Flux géothermique et transfert de chaleur</b><br><i>Guy Vasseur, Université Pierre et Marie Curie</i>             |
| <b>14 : 45</b> | <b>Téledétection dans l'infrarouge thermique et températures de surface</b><br><i>Raphael Antoine, Cerema, Rouen</i> |
| <b>15 : 10</b> | <b>Pause</b>   |
| <b>15 : 30</b> | <b>Forages et réservoirs pétroliers</b><br><i>Kun Su, Atef Onaisi, Total EP, Pau</i>                                 |
| <b>15 : 55</b> | <b>Les géostructures énergétiques</b><br><i>Sébastien Burlon, IFSTTAR, Julien Habert, Cerema Lille</i>               |
| <b>16 : 20</b> | <b>Essai sur la mine de Varangéville</b><br><i>Grégoire Hevin, Storengy</i>  |
| <b>16 : 45</b> | <b>Stockage cryogénique d'hydrocarbures</b><br><i>Mehdi Karimi Jafari et Nicolas Gatelier, Geostock</i>              |
| <b>17 : 10</b> | <b>Discussions</b>   |
| <b>17 : 30</b> | <b>Fin de la séance</b>  |

# Flux géothermique et transfert de chaleur

*Guy Vasseur, Université Pierre et Marie Curie*

## Résumé :

L'augmentation de la température du sous-sol observée au-dessous de quelques dizaines de m traduit l'existence d'un flux de chaleur vers le haut : le flux géothermique. Ce flux d'origine profonde est parfaitement négligeable par rapport au flux d'énergie reçue du soleil dont il représente une partie sur 5000 environ ; ainsi c'est bien l'environnement de la Terre solide (énergie solaire, effet de serre...) qui impose la température à la surface du sol. Le flux géothermique, lui, traduit un dégagement de chaleur d'origine profonde dû surtout à la désintégration de certains isotopes radioactifs naturels et au refroidissement de la Terre depuis sa création. C'est ce seul flux géothermique qui régit la température profonde du milieu et c'est aussi lui qui impose la dynamique interne dont les effets les plus évidents sont la tectonique des plaques, la constitution des chaînes de montagne et le champ magnétique.

L'objectif de ce travail est double : il ambitionne de faire le point sur les divers modes de transfert de chaleur intéressant notre planète à diverses échelles mais aussi de focaliser l'attention sur le contexte géologique qui nous est le plus accessible : la croûte continentale. Pour ceci on décrit successivement les mécanismes de transfert à trois échelles : celle de planète, celle de la lithosphère océanique et finalement l'échelle de la croûte continentale.

À l'échelle de la planète, le dégagement de cette chaleur utilise essentiellement deux modes de transfert : la conduction et la convection. Dans la lithosphère (couche superficielle intégrant la croûte et une partie du manteau supérieur), la conduction verticale est généralement le processus dominant. Dans le manteau sub-lithosphérique jusqu'à 2900 km de profondeur assimilé à un fluide visqueux, c'est la thermoconvection ou convection de Rayleigh-Bénard qui est la plus efficace malgré la forte viscosité ( $\sim 10^{20}$  Pa s) du milieu. Excepté dans les couches limites (la lithosphère en haut et la couche D'' au voisinage de noyau en bas) le géotherme mantellique correspond à un gradient vertical très faible (environ  $0.3 \text{ K km}^{-1}$ ). Le noyau externe lui est surtout constitué de fer liquide et possède une très faible viscosité ( $\sim 10^{-3}$  Pa s). Une vigoureuse convection turbulente, affectée par la force de Coriolis et par les forces magnéto-hydrodynamiques, y engendre le champ magnétique terrestre. Le noyau interne lui est solide et la convection éventuelle beaucoup moins importante.

Le régime thermique de la lithosphère et surtout dans la lithosphère océanique s'intègre parfaitement dans le contexte de la tectonique des plaques, ces dernières étant vues comme des couches limites de la convection mantellique. Le flux géothermique de la lithosphère océanique qui décroît depuis l'axe des dorsales (où du matériel chaud est injecté) jusque vers les bassins anciens s'interprète par le refroidissement conductif de la lithosphère depuis cet axe. Ce refroidissement s'accompagne d'une augmentation de la bathymétrie due à la densification des roches refroidies. Dans les zones de subduction, la poursuite du refroidissement de la lithosphère s'accompagne d'une flottaison négative contribuant au moteur de la convection. La tectonique des plaques apparaît comme un résultat de la convection mantellique où la Terre fonctionne comme une machine thermique fournissant, grâce à sa chaleur interne, un travail mécanique avec un rendement compatible avec la thermodynamique.

Les mesures de flux géothermique dans la croûte continentale sont relativement nombreuses. Cependant ces mesures sont éventuellement bruitées par des facteurs superficiels tels effets topographique, paléoclimatique mais surtout liés à la circulation d'eau dans les pores du milieu. La mise en circulation de l'eau sous l'effet de mise en charge par le relief (advection) ou par d'autres causes (thermo-convection) induit un transfert de chaleur convectif et on présente quelques cas de perturbation associée à de telles circulations. La croûte continentale est en général très enrichie en éléments radioactifs surtout dans sa partie superficielle. Le régime géothermique y est donc affecté par l'existence de fortes hétérogénéités de la production de chaleur induite par ces éléments. Mais la croûte continentale est aussi le siège de phénomènes tectoniques et éventuellement volcaniques qui modifient le géotherme crustal de façon transitoire à l'échelle géologique et qui sont illustrés par quelques exemples. Après avoir présenté un bilan de la chaleur qui s'échappe en surface on montre

que la chaleur sensible emmagasinée dans les roches de la croûte fournit potentiellement une ressource très importante d'énergie thermique qui n'est en fait exploitable que dans les contextes les plus favorables.

## Téledétection dans l'infrarouge thermique et températures de surface

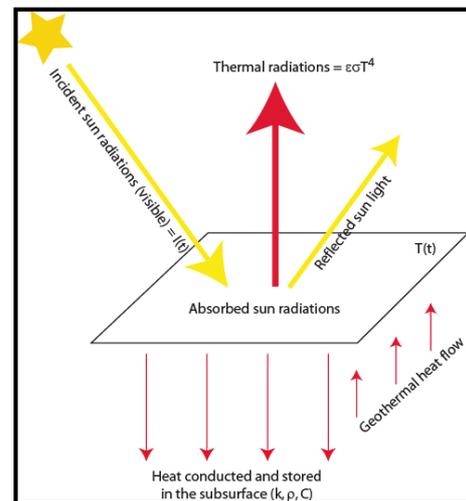
Raphael Antoine, Cerema Rouen et Téodolina Lopez, CesBio Toulouse

### Résumé :

L'objectif de cette présentation est

- 1) de décrire quantitativement la température d'un sol entre la surface et quelques mètres de profondeur
- 2) de faire le lien avec les observations effectuées dans l'infrarouge thermique au travers de quelques applications.

Nous caractériserons l'évolution de cette température, ainsi que ses variations spatiales, en prenant en compte le bilan énergétique de surface journalier et saisonnier (figure). Les paramètres intervenant dans ce bilan (rayonnement incident, albédo, émissivité, conductivité thermique, topographie, etc...) seront décrits et leur influence sur les températures quantifiée au travers d'observations de terrain et de modèles conductifs-radiatifs développés par les auteurs ou dans d'autres travaux



Bilan énergétique à la surface d'un sol

## Forages et réservoirs pétroliers

Kun Su et Atef Onaisi, Total EP, Pau

### Résumé :

Aujourd'hui, il est courant de développer des réservoirs pétroliers très profonds, allant jusqu'à 7000 m d'enfouissement, avec des températures qui peuvent atteindre les 250 °C. La température intervient dans diverses études d'ingénierie de forage et de complétion des puits ainsi que dans la conduite de certaines opérations d'injection et de production. Deux sujets relevant de la géomécanique pétrolière pour lesquels la thermomécanique des roches joue un rôle essentiel seront présentés.

Le premier sujet concerne la stabilité des parois des puits sous les actions de la pression statique ou dynamique exercée par la boue de forage et des écarts de température, par rapport au gradient géothermique naturel, provoqués par la circulation de la boue le long du puits. Parmi les types de roches divers et variés traversés par les puits, le sel gemme et les formations argileuses sont ceux qui s'avèrent être les plus sensibles aux changements de température. Au travers de quelques exemples, nous montrerons l'impact de la thermomécanique sur les calculs de la densité de boue nécessaire pour maintenir la stabilité des parois de forage, en particulier un exemple d'un forage traversant du sel gemme sur près de 3 km d'épaisseur.

Le deuxième sujet dans lequel la thermomécanique des roches joue un rôle de premier ordre est celui de la fracturation induite thermiquement dans les puits injecteurs d'eau, (qui peut être de l'eau de mer ou de l'eau produite après séparation de l'huile), à cause de la plus faible température de l'eau injectée par rapport à celle du réservoir. En situation normale, la fracturation des injecteurs est indésirable car elle affecte la répartition des flux dans le réservoir. Il existe toutefois des situations où la fracturation induite thermiquement est au contraire considérée comme bénéfique. C'est surtout le cas en réinjection des eaux de production réputées par leur capacité de colmatage des milieux poreux

qui réduisent significativement le potentiel d'injection de puits colmaté. La fracturation thermique est vue d'un bon œil dans ce contexte grâce à sa capacité à restaurer un débit normal. Nous présenterons un modèle analytique basé sur la théorie d'inclusion pour calculer les contraintes thermomécaniques et des déplacements à la fois dans les réservoirs et leurs couvertures. Elles servent ensuite à l'analyse dynamique des conditions de fracturation de ces objets géologiques dans les contextes de forage et de production/injection. Toutefois, nous disposons d'une panoplie d'outils numériques par éléments ou volumes finis qui permettent de modéliser les perturbations thermomécaniques de manière beaucoup plus précise en tenant compte de toutes les complexités structurales, sédimentaires, hydrauliques et mécaniques.

## **La géothermie dans les ouvrages géotechniques**

*Sébastien Burlon, IFSTTAR et Julien Habert Cerema*

### **Résumé :**

La géothermie basse énergie a connu un développement conséquent ces dernières années à travers l'installation de sondes géothermiques, d'une part, et la réalisation de géostructures, d'autre part. Les géostructures sont des ouvrages géotechniques comme des pieux, des parois moulées, des tunnels assurant, en plus de leur fonction traditionnelle de fondation et de soutènement, un rôle dans l'échange de chaleur avec le sol environnant. L'objectif est de subvenir à des besoins de chauffage et de rafraîchissement de bâtiments ou d'infrastructures situées à proximité. Dans les géostructures appelées aussi ouvrages thermoactifs, le système d'échange thermique avec le sol est constitué de tubes échangeurs de chaleur mis en œuvre lors de la construction de l'ouvrage, ce qui ne nécessite pas de réaliser des trous de forage dédiés comme pour la pose des sondes géothermiques.

Les ouvrages thermoactifs présentent un comportement complexe car ils sont utilisés à la fois comme éléments de fondation ou de soutènement avec un rôle mécanique évident, et comme structures d'échanges thermiques. Le chapitre de cet ouvrage se propose d'aborder différents aspects de leur fonctionnement et de leur conception. Leur fonctionnement est abordé à partir d'une description et d'une analyse des phénomènes physiques mis en jeu : d'une part, les échanges de chaleur par conduction ou par advection dans le cas de la présence d'une nappe en mouvement, d'autre part, les interactions entre l'ouvrage thermoactif et le sol qui résultent des déformations thermiques imposées par les échanges thermiques. Les aspects liés à la conception des ouvrages thermoactifs sont abordés selon deux points de vue : l'efficacité thermique qui doit permettre de subvenir aux besoins du bâtiment à chauffer ou à rafraîchir et la résistance mécanique qui doit garantir la fiabilité du système de fondation ou de soutènement. Enfin, des applications pour différents types d'ouvrages sont proposées pour illustrer de manière pratique les différents sujets développés au préalable.

## **Essai sur la mine de Varangéville**

Grégoire Hevin, *STORENGY* ; Cyrille Balland, Pascal Bigarré, Anne Raingear, Roxanne Muller, *INERIS* ; Joël Billiotte, Bruno Tessier, Faouzi Hadj Hassen, Ahmed Rouabhi, Laura Blanco-Martin, Chloe Bonnard, *MINES PARISTECH* ; Kurt Staudtmeister, Dirk Zapf, Bastian Leuger, *IUB/Leibnitz Universität Hannover* ; Nicolas Thellier, Emmanuel Hertz, Daniel Tribout, *CSME/Salins*.

### **Résumé :**

Lors de l'exploitation d'un stockage souterrain de gaz en cavités salines (air, gaz naturel...) , des mouvements rapides d'injection et de soutirage de gaz génèrent, associés à la décompression, de fortes variations de température dans les cavités. Pour étudier l'impact des basses températures sur le sel, le Solution Mining Research Institute a lancé un appel à projet.

Pour y répondre, une équipe composée de la Compagnie des Salins du Midi et des salines de l'Est (CSME/Salins), Mines ParisTech, l'INERIS, IUB/Leibnitz Universität Hannover et Storengy a proposé de réaliser une expérience grandeur nature dans une mine de sel, à Varangéville, près de Nancy.

L'expérience a consisté à réaliser trois cycles de refroidissement/réchauffage sur une surface de sel de 10m<sup>2</sup> au centre d'une dalle de sel de 13 m de large. Le site expérimental a été miné et préparé spécialement à 120 m de profondeur. Une chambre froide a été construite sur la dalle pour refroidir le sel de 20°C par rapport à sa température initiale (de 14°C à -6°C).



Le site a été instrumenté de plus de 60 capteurs thermiques, mécaniques, acoustiques ainsi que d'imagerie numérique pour observer les effets des différents cycles de température.

Dès les premières heures de refroidissement, des fissures thermiques jusqu'à 1 mm d'ouverture sont apparues dans le sel. Dans la suite de l'expérience, les fissures se sont refermées puis ré-ouvertes au gré des réchauffements et des refroidissements jusqu'à 1 m de profondeur.

Si cette expérience a mis en évidence le phénomène de fissuration thermique du sel, elle a surtout permis de le quantifier (nombre de fissures, ouverture, profondeur...). Cela permettra d'extrapoler ce résultat aux cavités dans des conditions réelles. On pourra ainsi vérifier que cela ne remet pas en cause l'étanchéité globale des ouvrages et, a terme, permettra d'affiner les critères d'exploitation en prenant en compte ce phénomène de fissuration thermique.

## Stockage cryogénique d'hydrocarbures

Mehdi Karimi Jafari et Nicolas Gatelier, *Geostock*

### Résumé :

Le concept du stockage cryogénique consiste à stocker des hydrocarbures gazeux sous forme liquide à basse température et à la pression atmosphérique : GPL (Propane) à -45°C et GNL à -162°C.

Les premiers stockages de GNL au rocher développés consistaient en des silos excavés dans la roche sans barrière d'étanchéité et sans isolation thermique. L'étanchéité était assurée par le massif supposé imperméable après congélation préalable aux travaux d'excavation et formation de la glace dans les pores et fissures. On pourra citer comme projet développé sur ce concept le stockage de GNL d'Arzew, Algérie, mis en service en 1965 (Belhadj & Berrahou, 2007). En cours d'exploitation, les opérateurs ont dû faire face à des désordres dans le massif (conduisant à la perte d'étanchéité du stockage) ainsi que dans la structure qui formait le toit du stockage. L'autre exemple est le projet du stockage semi-enterré de GNL à Hopkinton, Massachusetts, Etats-Unis en 1967 (Glamheden & Lindblom, 2002). Peu de temps après le remplissage du stockage, un taux de boil-off beaucoup plus élevé que la prévision a été constaté. Le monitoring thermique a également montré la migration de GNL au travers des fractures générées à la paroi des cavités.

La principale difficulté du stockage cryogénique en souterrain est la génération des contraintes thermiques dans les roches encaissantes et des fractures induites qui mettent en cause le confinement du produit. Aujourd'hui, grâce aux différents retours d'expérience acquis par les réalisations pilotes,

le stockage souterrain cryogénique d'hydrocarbures est considéré comme une solution mature d'un point de vue technico-économique.

Geostock a participé à deux projets pilotes de stockage souterrain cryogénique de GNL : Schelle (en Belgique) et Daejeon (en Corée du Sud). Chacun de ces deux projets a été développé à partir d'un concept adapté à la nature de la roche encaissante: l'argile de Boom dans le cas du projet pilote de Schelle et une roche cristalline dans le cas du projet pilote de Daejeon.