



COMITE FRANCAIS DE GEOLOGIE DE L'INGENIEUR ET DE L'ENVIRONNEMENT

Sylvine Guédon, Secrétaire Générale  
IFSTTAR – PARIS  
Cité Descartes, 14-20 Boulevard Newton  
77447 Marne-la-Vallée cedex 2  
jeanne-sylvine.guedon@ifsttar.fr  
Site internet [www.CFGI-geologie.fr](http://www.CFGI-geologie.fr)

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

# INVITATION

**Judi 03 Novembre 2016**  
à 14 h 00  
au Cnam (amphi à préciser)  
292 rue St-Martin, 75003 Paris

« Le stockage d'énergie en milieu géologique »  
CFG I - CFMR

*Coordination : Xavier Daupley (CFG I), Christophe Vibert (CFMR)*

La promotion et l'essor des énergies renouvelables dont une partie d'entre elles se caractérise par une production intermittente, fluctuante et souvent disséminée sur un territoire pose la question du stockage de l'énergie non consommée. Une des voies possibles est le stockage de l'énergie en milieu géologique. Il peut s'agir de structures à ciel ouvert ou souterraines déjà existantes (mines, carrières ...) qui trouvent une seconde vie et participent ainsi au soutien de la demande énergétique et au maintien d'une activité économique au bénéfice de la protection de l'environnement. Des cavernes souterraines dédiées de grands volumes peuvent permettre le stockage d'énergie en masse. A ce titre, le cas classique du stockage de gaz naturel en cavités salines peut être apporté comme exemple. Dans tous les cas, il est nécessaire d'apprécier les potentialités et les contraintes apportées par l'encaissant géologique pour créer des unités de stockages pérennes, mécaniquement stables et limitant les impacts sur le milieu.

Cette séance technique commune du Comité Français de Géologie de l'Ingénieur et du Comité Français de Mécanique des Roches vous propose cinq exposés couvrant une partie des possibilités de stockage d'énergie en souterrain : la chaleur, le transfert d'énergie par pompage, l'air comprimé, le gaz naturel en cavité saline.

## **14h00 – 14h30 : Etude des impacts géomécaniques et hydrogéologiques pour l'installation de systèmes de pompage – turbinage dans d'anciennes carrières à ciel ouvert et mines souterraines**

Robert CHARLIER<sup>1,\*</sup>, Pascal GODERNIAUX<sup>2</sup>, Angélique POULAIN<sup>2</sup>, Benjamin CERFONTAINE<sup>1</sup>, Philippe ORBAN<sup>1</sup>, Alain DASSARGUES<sup>1</sup>, Jean-Yves PARFAIT<sup>3</sup>, Michel PIROTTON<sup>1</sup>, Sébastien ERPICUM<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université de Liège, département ArGEnCO, <sup>2</sup>Geology and Applied Geology, Université de Mons, Mons, <sup>3</sup>Multitel, Mons, Belgique

\* Robert.Charlier@ULg.ac.be

L'intégration dans les réseaux électriques d'une part de plus en plus importante de production électrique renouvelable et intermittente pose problème. Ce problème est renforcé par le caractère variable de la demande en électricité au cours de la journée. Parmi les solutions envisagées, le stockage d'énergie par turbinage-pompage hydraulique représente une des approches les plus prometteuses. Ces systèmes sont toutefois très dépendants des surfaces disponibles et du dénivelé topographique exploitable. Dans ce

contexte, le projet SMARTWATER propose d'utiliser d'anciennes carrières ou d'anciennes mines souterraines, aujourd'hui inondées, comme bassin inférieur des systèmes de pompage – turbinage. Cette configuration permettrait d'exploiter des dénivelés et des volumes d'eau potentiellement importants, d'économiser certains coûts liés à la construction des bassins, et de profiter des nombreux sites potentiels présents sur le territoire. Un ensemble d'outils et de contraintes rencontrées lors la réalisation de ces systèmes sont étudiés, parmi lesquelles les contraintes liées au sous-sol. Six cas-types, comprenant des lithologies, des configurations et des dimensions différentes, représentatifs du contexte régional, sont plus spécifiquement étudiés. Ces cas-types incluent quatre carrières (calcaire, grès, craie et diorite) et deux mines souterraines (ardoise et houille). Les cycles de pompage – turbinage induisent des fluctuations du niveau d'eau dans la carrière ou la mine souterraine. Ces fluctuations sont influencées par les échanges d'eau avec la nappe d'eau souterraine, et se propagent dans le milieu rocheux jusqu'à une certaine distance autour du réservoir. Ces interactions réservoir – massif rocheux ont été quantifiées par simulations numériques, et varient en fonction des propriétés hydrauliques de la roche et de la fréquence des sollicitations cycliques. Dans certains cas, leur impact est significatif et peut influencer la rentabilité ou la faisabilité du système. L'utilisation d'anciennes mines et carrières comme réservoir de stockage, soumis à des cycles de vidange et de remplissage plusieurs fois par jour, pose également des questions cruciales quant à la stabilité du massif rocheux, et la faisabilité des projets. Le comportement géomécanique de la roche soumise à de telles sollicitations est étudié numériquement. Une loi constitutive complexe a été développée pour prendre en compte la dégradation potentielle possible des propriétés mécaniques du matériau avec le nombre de cycles ainsi que sa limite de fatigue. Les paramètres de la loi sont calibrés par comparaison à des essais de laboratoires monotones (compressions simples, triaxiaux) et cycliques (compressions simples).

### **14h30 – 15h00 : Micro-STEP hydroélectrique de la carrière de Kaolin de Berrien**

François Savatier<sup>1</sup> et Marie-Yvonnick Legal<sup>2</sup>, IMERYS<sup>1</sup> et Hydrowatt<sup>2</sup>

Le kaolin de Berrien issu de l'altération d'un leucogranite par des fluides hydrothermaux a été exploité depuis le début des années soixante. Plusieurs sociétés s'y sont succédées jusqu'au rachat de DAM en 2005 par IMERYS, société Française leader mondial des spécialités minérales pour l'industrie.

L'exploitation arrive en fin de vie et la dernière fosse est en voie d'achèvement.

Au-delà de ses obligations réglementaires prévoyant un réaménagement classique de la fosse d'extraction et de ses abords, Imerys a entrepris de trouver un partenaire pour assurer la continuité d'une activité industrielle présentant un intérêt économique local ou régional et respectueuse de l'environnement.

La topographie et l'hydrologie du site entre la carrière située sur un point haut et les haldes occupant un ancien talweg en contrebas, présente un contexte idéal pour la société Hydrowatt de développer son projet de micro –STEP (Station de Transfert d'Énergie par Pompage)

Ce projet vise à mettre en place, un système de stockage de type micro-STEP hydroélectrique, dont l'énergie nécessaire pour le pompage sera fournie en partie par un parc photovoltaïque. Les objectifs du projet sont de :

- Démontrer la faisabilité du pompage par les énergies renouvelables ;
- Développer des modes de gestion adaptés de la centrale « photovoltaïque - stockage » pour étudier les modes de valorisation possibles du stockage ;
- Définir un modèle d'affaire innovant démontrant la viabilité économique, sans tarif d'achat, des unités de productions d'énergies renouvelables (EnR) couplées à des unités de stockage ;
- Montrer l'intérêt de la reconversion d'un site tel qu'une carrière de kaolins en fin de vie (maintien d'une activité industrielle et d'emplois non délocalisables), et de la réplique et l'exportation de ce type de micro-STEP.

### **15h00 – 15h30 : DEMOSTHENE : DEMONstrateur de Stockage saisonnier d'énergie Thermique en carrière souterraine partiellement ENnoyée**

Philippe Gombert, INERIS

Le stockage souterrain d'énergie thermique est l'une des options à mettre en œuvre dans le cadre du développement des énergies renouvelables. Il s'agit de stocker en été de la chaleur produite en excédent afin de la récupérer en hiver pour le chauffage des bâtiments : on peut également stocker du froid en hiver et le récupérer en été pour la climatisation.

Subventionné par l'ex-région Picardie, le projet DEMOSTHENE a pour but de tester la réalisation d'un stockage saisonnier d'énergie thermique en carrière souterraine en Picardie.

L'objectif du projet est triple : 1) inventorier les carrières souterraines de Picardie, les caractériser

(localisation, dimension, état) et sélectionner un site accessible et représentatif afin d'y implanter un pilote expérimental, 2) caractériser le site du pilote expérimental et l'instrumenter, 3) réaliser le pilote, le faire fonctionner pendant quelques mois puis simuler son fonctionnement sur une plus longue durée.

La première phase du projet est terminée et l'exposé décrit la démarche suivie. Les critères de choix du site expérimental sont les suivants :

- carrière souterraine de craie ou de calcaire, accessible et représentative ;
- superficie suffisante ;
- présence d'une lame d'eau d'au moins 1 m.

On a tout d'abord réalisé un inventaire qui a permis de recenser les cavités souterraines, leur localisation et leur nature (carrière, karst, abri souterrain...). On a ensuite estimé la superficie de carrière minimale permettant de stocker la chaleur nécessaire au chauffage d'un petit ensemble collectif : compte tenu du taux moyen de défruitement des carrières souterraines, cette superficie est de l'ordre de 10 000 m<sup>2</sup>.

Face au nombre très limité de cas répondant à ces critères, et afin que le site expérimental soit plus facilement reproductible, on s'est donc tourné vers des carrières souterraines de superficie suffisante mais sèches avec la possibilité d'y réaliser un dispositif d'ennoyage artificiel. Cela représente théoriquement un millier de sites en Picardie dont 40 sont actuellement connus et localisés, c'est-à-dire potentiellement transformables en stockage souterrain d'énergie thermique.

## **15h30 – 16h00 : Variations rapides de température dans les cavernes de stockage de gaz.**

Pierre Bérest<sup>1</sup> et Benoît Brouard<sup>2</sup>, Ecole Polytechnique<sup>1</sup> et Brouard Consulting<sup>2</sup>

Le stockage de masse de l'électricité en aval des modes de production intermittents rencontre un intérêt croissant. Diverses solutions sont envisageables. Elles impliquent le stockage de grands volumes de gaz (air comprimé, hydrogène, oxygène, CO<sub>2</sub>) en cavernes souterraines, le plus souvent dans le sel, avec des cycles de pression rapides (journée ou semaine). Le stockage du gaz naturel est plus classique mais la dérégulation du marché conduit aussi à des modes d'exploitation dans lesquels les pressions peuvent chuter de plus d'une dizaine de bars par jour. Dans ces modes d'exploitation, le gaz n'a pas le temps de se mettre en équilibre de température avec le massif rocheux, son évolution s'approche de l'adiabatique, et le gaz peut, à la détente, se refroidir de plusieurs dizaines de °C. Des contraintes de traction importantes apparaissent aux parois refroidies et peuvent y engendrer des fractures qui menacent la stabilité et l'étanchéité des cavernes. Depuis une dizaine d'années, ces thèmes ont fait l'objet de nombreuses recherches en France (EDF, Storengy, Géostock, Ecole Polytechnique, Ecole des Mines, Brouard Consulting) et à l'étranger. On montre que les fractures créées sont perpendiculaires à la paroi, qu'elles sont plus profondes quand le refroidissement est durable, mais que le nombre de fractures actives décroît quand elles s'approfondissent. Au total les risques pour les cavernes apparaissent limités.

## **16h00 – 16h30 : Réhabilitation de cavités minées de Petit-Couronne en stockage d'énergie renouvelable**

Arnaud Réveillère<sup>1</sup> et Philippe Cracowki<sup>2</sup>, Géostock<sup>1</sup> et Shell<sup>2</sup>

Dans la perspective de l'arrêt d'exploitation de cavités minées stockant du GPL à Petit-Couronne, l'opportunité de les convertir en stockage journalier d'énergie électrique a été étudiée. Deux grandes options ont été considérées techniquement: le stockage d'air comprimé seul (CAES) ou couplé à une station de transfert d'énergie par pompage (CAES/STEP). Dans ce dernier cas, l'air est stocké à pression constante dans un volume rendu variable par le pompage et turbinage d'eau entre la caverne et la surface.

Du point de vue de l'intégrité des cavernes et de leur étanchéité, le CAES/STEP est favorable, les conditions d'opération étant similaires à celles pour lesquelles les cavités ont été conçues. Les modifications à apporter aux ouvrages sont en revanche lourdes : il est nécessaire d'installer une turbine en profondeur, c'est-à-dire en caverne, dans un puits ou dans une salle des machines à excaver. Chacune de ces options implique des difficultés fortes sur les équipements nécessaires et/ou sur les travaux à réaliser.

Dans le cas du CAES, les modifications à apporter aux liaisons fond-surface sont essentiellement limitées au besoin de rendre les puits résistants à la corrosion, et sont estimées faisables. Les cycles infra-journaliers de pression induisent en revanche des conditions nouvelles du point de vue du confinement, qui a pu être encadré par des études hydrodynamiques. Ces cycles de compression et détente engendrent également des variations de températures importantes en caverne, à l'origine de contraintes mécaniques aux parois de la craie.