

SACRE

TITRE DU PROJET: STOCKAGE PAR AIR COMPRIME POUR LE RESEAU ELECTRIQUE

IDENTIFICATION DU PROJET

Edition : 2010

Partenaire (organisme) coordinateur : Ecole Polytechnique, LMS, UMR 7649

Autres partenaires (organismes) du projet : EDF, GEOSTOCK, PROMES (UPR), L2EP-HEI

Projet labellisé par le(s) pôle(s) de compétitivité : DERBI

Contact : Pierre Bérest mail : berest@lms.polytechnique.fr

Date de début / date de fin du projet : 14-1-2011 / 30-6-2014

ELEMENTS FINANCIERS

| Budget total du projet (M€) | dont Aide ANR (M€) | Nombre de personnes.an |
|-----------------------------|--------------------|------------------------|
| 2 323 221€ | 662 455,60€ | 18,5 |

RESUME DU PROJET

Malgré le bon fonctionnement de deux installations industrielles à McIntosh (Alabama) et, depuis plus d'une trentaine d'années, à Huntorf (Allemagne, 320 MW pendant 3 heures), la technique du stockage de l'électricité sous forme d'air comprimé en caverne souterraine (CAES) n'a pas connu le développement attendu dans les années 80. Elle apparaît pourtant, dans la gamme des puissances de plusieurs centaines de MW, comme la seule alternative crédible aux stations de pompage – turbinage installées en régions montagneuses, pour lesquelles l'essentiel des sites disponibles sont déjà exploités.

Cet état de fait s'explique vraisemblablement par deux raisons principales. D'une part, cette technique implique des investissements importants, qui ont été un obstacle à une période où d'autres investissements étaient prioritaires, notamment dans le domaine de la production électrique ; d'autre part, le rendement énergétique de cette forme de stockage était, avec les CAES de première génération, inférieur à 50%.

Plusieurs évolutions du contexte énergétique et technique peuvent sensiblement modifier cette situation, comme le montre l'intérêt accru pour le CAES qui se manifeste dans plusieurs pays, dont l'Allemagne et les USA.

D'une part, des techniques « adiabatiques », intégrant dans le CAES la récupération de la chaleur produite à la compression de l'air, permettent d'envisager des rendements énergétiques globaux de l'ordre de 70%, surtout dès lors que, de plus, on recherche systématiquement des améliorations du système de stockage, en termes économiques et techniques, au niveau du train de compression, de la turbine, des matériaux de stockage de la chaleur et de l'échangeur associé ; et qu'on vérifie, sur un autre plan, la disponibilité de vides souterrains, autant que possible pré-existants, bien localisés par rapport au réseau électrique et susceptibles de supporter des chargements thermomécaniques dans la gamme utile.

D'autre part, les sources d'énergie intermittentes, dont l'éolien, restent encore à la limite de la rentabilité économique immédiate, notamment parce qu'une part significative de leur production, partiellement aléatoire, n'est pas en adéquation avec la demande : la possibilité d'un stockage de



l'énergie produite est susceptible d'accroître sensiblement l'intérêt économique de ces sources nouvelles et en conséquence celui du CAES.

D'ailleurs, le renforcement des préoccupations environnementales conduit à évaluer le coût et les avantages de techniques nouvelles de manière plus complète, en y intégrant des préoccupations comme le bilan carbone, la qualité de l'électricité produite en terme de tension et fréquence, la gestion et le dimensionnement optimaux du réseau de transport, toutes potentiellement favorables à l'option du stockage.

Le projet SACRE vise à répondre à l'ensemble de ces préoccupations – qu'elles concernent le calcul économique, l'intégration du stockage dans le réseau électrique, la disponibilité et la stabilité de vides souterrains à créer ou existants, en France et au-delà et enfin, s'agissant d'un stockage dont le caractère adiabatique est l'innovation essentielle, la problématique du stockage de la chaleur et de son articulation avec l'ensemble du système. Le projet s'efforce donc d'intégrer les innovations déjà proposées – notamment celles apparues à l'occasion du programme AA-CAES du 5^{ème} PCRD, où du projet ADELE piloté par RWE-GE en Allemagne – et, surtout, d'évaluer la crédibilité de quelques solutions innovantes proposées par les partenaires du projet.

ILLUSTRATIONS

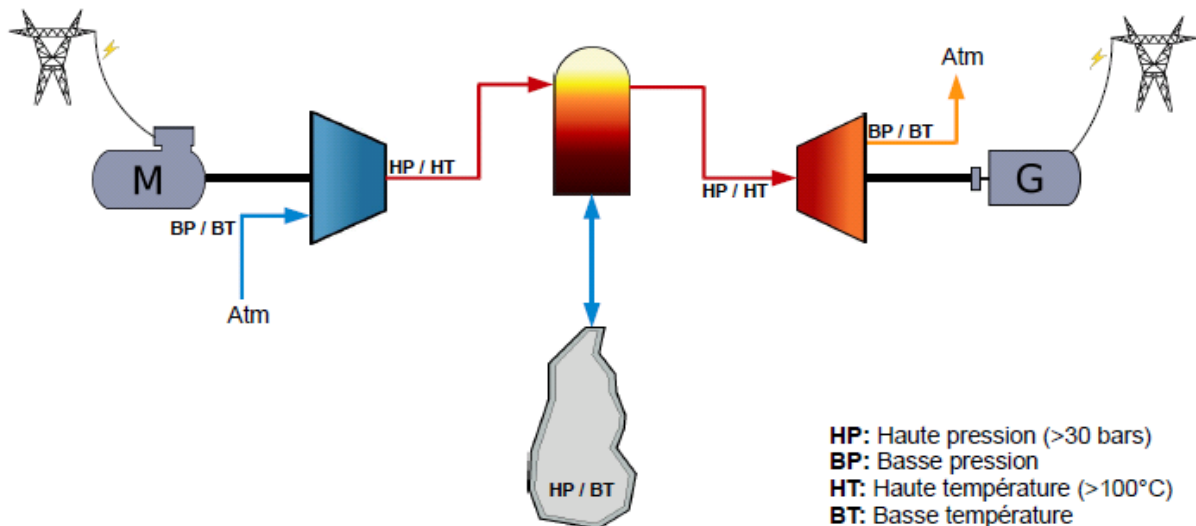


Schéma de principe d'un CAES adiabatique : avant injection dans la caverne, le gaz comprimé chaud passe par un échangeur où sa chaleur est stockée pour être restituée en sortie du gaz de la caverne, en amont de la turbine.

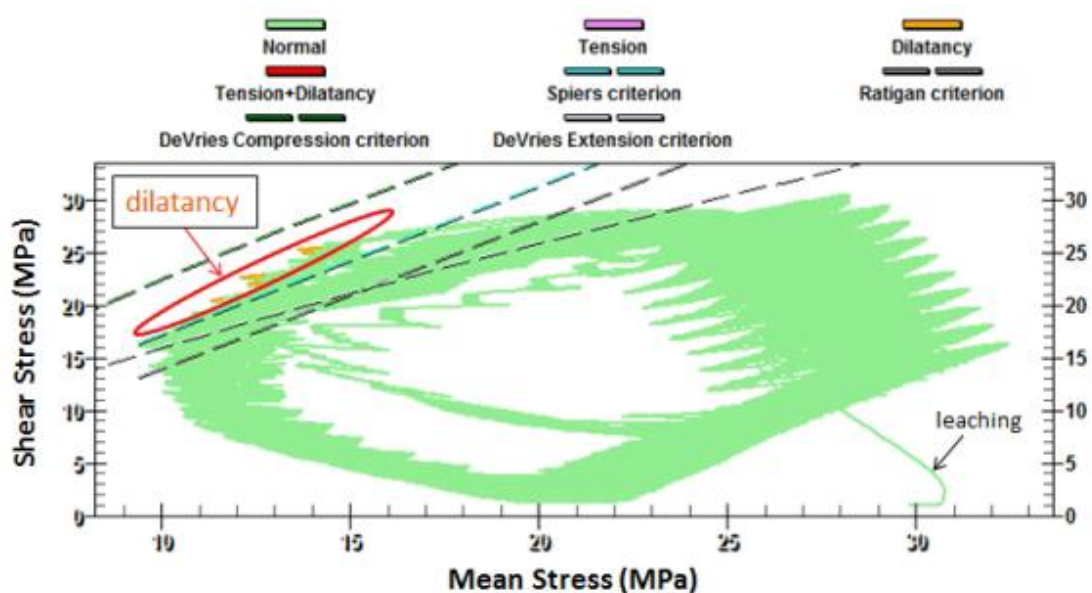


Banc d'essai de stockage/déstockage d'énergie sur matériaux recyclés (600-300°C). Vue de la conduite d'air intérieure équipée de mélangeurs statiques et de plaques planes de stockage (PROMES-SACRE).





Banc d'essai pour l'étude du fluage du sel sous sollicitations cycliques (LMS.SACRE)



Calcul de la trajectoire des invariants du tenseur des contraintes à la paroi d'une cavité multi-cyclée (GEOSTOCK et LMS, SACRE)

PUBLICATIONS – COMMUNICATIONS MAJEURES

International, communications multipartenaires

Kéré A.; Py X.; Olives R.; Goetz V.; Sadiki N.; Mercier-Allart E.(2012); *High temperature energy storage material from vitrified coal-fired power plant Fly-Ash*; Innostock 2012, Lleida 16-18 Mai, 2012.

Kéré A., Dejean G., Sadiki N.; Olives R.; Goetz V.; Py X.; Mercier E. (2012); *Vitrified industrial wastes as thermal energy storage materials for high temperature applications*; Int. Conf. on Eng. For Waste and Biomass Valorisation, Porto, 10-13 septembre, 2012.

Bérest P. (2011). *Thermomechanical Aspects of high frequency cycling in salt storage caverns*. Conférence Invitée, Int. Res. Gas Cong. (IRGC), Séoul, Corée du Sud, Octobre 2011.



SEMINAIRE MI-PARCOURS PROGRAMME ANR STOCK-E 2010
Paris, 4 Décembre 2012

Kéré A., Goetz V., Py X., Olives R., Sadiki N., Mercier-Allart E., *Thermal reservoir sizing for adiabatic compressed air energy storage.* IRES 2012, Berlin, 12-14 Novembre 2012.

International, communications monopartenaires

Brouard B., Bérest P., Djizanne H., Frangi A. (2012). *Mechanical stability of a salt cavern submitted to high frequency loading.* Mechanical Behavior VII, Bérest, Ghoreychi, Hadj-Hassen & Tijani (eds). Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-62122-9, 381-390.

Bérest P., Djizanne H., Brouard B., Hévin G. (2012). *Rapid depressurizations: can they lead to irreversible damage?* SMRI Spring Meeting, Regina, Canada, 63-84.

Rouzeyre M., Mercier E. (2011). *Adiabatic CAES: theoretical efficiency improvements & industrial considerations.* IRES 2011. Berlin

Vergnol A., Robyns B. (2011). *Localization of storage by identification of weakness of power systems* MixGenera 2011, November 17, 2011, Leganés, Madrid, Spain.

France, communications multipartenaires

Karimi-Jafari M., Bérest P. (2012). *Résultats du projet SACRE*, Séminaire organisé par l'ANR et Armines : Haute Température pour le stockage de l'électricité, 4 juillet 2012, Ecole des Mines – Paris Tech.

P. Bérest, H. Djakeun Djizanne (LMS), B. Brouard (BC), G. Hévin (Storengy), M. Karimi-Jafari (Geostock). Effets de chargements thermomécaniques rapides et répétés dans les cavités salines de stockage de gaz naturel ou air comprimé (CAES). Comité Français de Mécanique des Roches, 6 décembre 2012.

France, communications monopartenaires

Djakeun-Djizanne H., Bérest P., Brouard B. (2012). *Effets mécaniques d'une détente dans une caverne de stockage de gaz.* Journées Nationales JNGG, Bordeaux 2012, 715-722.

BREVETS

Brevet en cours de dépôt national et international :

Titre : Procédé et installation de stockage (EDF)

Numéro de demande : 1251663 Numéro de soumission : 1000141434

FAITS MARQUANTS

A ce stade du projet, au plan des études :

PROMES a étudié jusqu'à 800°C les propriétés thermophysiques de trois matériaux dont des céramiques issues de déchets amiantés. Un modèle numérique de l'échangeur de chaleur a été mis au point. Un prototype permettant l'enchaînement des phases de stockage – déstockage de 300 à 600°C (mais sans pression) sur des matériaux mis en forme est en fonctionnement.

Géostock a établi une carte des sites potentiels de CAES en France et réalisé un pré-dimensionnement pour trois types de stockage souterrain, aquifère, cavité minée, cavité saline.

LMS dispose d'une cinquantaine de mois d'essais de fluage cyclique sur éprouvette de sel, a publié plusieurs articles sur les effets thermomécaniques d'une décompression rapide et dispose d'un logiciel de calcul thermoviscoplastique d'une cavité soumise à un grand nombre de cycles de pression.

EDF a étudié la valorisation technico-économique d'un CAES sur le marché français, étudié les performances des compresseurs et turbines travaillant à puissance variable, estimé des rendements et construit des chroniques d'exploitation pour les calculs thermomécaniques.

Séminaire d'avancement des projets ANR

Programme Stockage de l'Energie 2010

Paris, 4 Décembre 2012



L2EP-HEI a recensés les services rendus par un CAES au système électrique, proposé une méthode d'analyse statique du réseau et appliqué cette méthode au réseau 225/400 kV afin de définir les nœuds préférentiels d'implantation d'un CAES.

Au plan des collaborations internes et externes on peut mettre en exergue :

Contacts engagés entre PROMES-EDF et la société TELLUS CERAM pour l'élaboration de matériaux de stockage par frittage de cendres volantes en quantités pour prototypes.

Collaborations PROMES - EDF et Saint-Gobain – CEMHTI engagées sur la base d'un projet ANR CEDES déposé auprès de MatePro pour le développement de procédés hybrides de traitement de cendres volantes de centrales au charbon et la production de matériaux réfractaires pour le stockage haute température.

Collaboration LMS – Geostock : l'étude des effets des contraintes thermiques à la paroi des CAES, menée dans le cadre de SACRE, a des retombées pour le cas des stockages de gaz naturel, exploités plus agressivement que dans le passé. LMS a porté devant le SMRI, organisme de recherche qui rassemble la plupart des stockeurs en cavités salines dans le monde, un projet d'appel d'offres pour un essai *in situ* dont le principe a été accepté. SACRE était cité à cette occasion.

Collaboration entre Geostock et EDF-L2EP. Elle a permis de dégager plusieurs sites concrets attractifs pour la réalisation d'un stockage CAES.

Collaboration EDF-Geostock-Ecole Polytechnique. Elle a permis une prise de contact avec un exploitant de cavités salines pour, dans un premier temps, dimensionner un CAES dans une cavité réelle et, le cas échéant, concevoir un pilote.

RETOMBÉES PREVISIBLES

Les retombées concernent divers domaines relatifs aux matériaux (propriétés thermo-physiques de matériaux de stockage de la chaleur, comportement cyclique du sel), des procédés (élaboration de matériaux, turbines et compresseurs), des logiciels (thermique du stockage de chaleur, comportement cyclique des cavernes), à l'analyse du réseau électrique.

Le projet doit conduire à un pré-dimensionnement d'un CAES dans un site concret.

VERROUS RESTANT A LEVER

Formulation d'un critère d'endommagement du sel sous chargement cyclique.

Optimisation de la mise en forme du matériau permettant d'atteindre des efficacités de stockage élevées au cours des cycles successifs de stockage/déstockage.

Le verrou principal tient au coût du CAES. L'enjeu d'un prédimensionnement du stockage sur un cas de cavité réel est de rendre économiquement crédible la réalisation d'un pilote.



SEMINAIRE MI-PARCOURS PROGRAMME ANR STOCK-E 2010
Paris, 4 Décembre 2012



Séminaire d'avancement des projets ANR

Programme Stockage de l'Energie 2010

Paris, 4 Décembre 2012

AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE
ANR