



Fritz CROTOGINO

Manager Special
Projects
Kavernen Bau und
Betrieb GmbH
Hannovre

Le stockage d'air comprimé de HUNTORF : plus de 20 ans de succès dans l'exploitation

Préambule :

Le texte ci-dessous a été présenté, dans sa version anglaise, en avril 2001, lors du congrès du Solution Mining Research Institute (S.M.R.I.) à Orlando.

Traduction : Jean Estivalet (E59)

Introduction

L'idée de base du stockage d'énergie sous forme d'air comprimé ou CAES (**C**ompressed **A**ir **E**nergy **S**torage) est de transférer aux périodes de forte demande l'énergie "hors pointe" produite par les centrales de base nucléaires ou thermiques (charbon), en n'utilisant qu'une partie du gaz ou du fioul qui serait consommé par une installation de pointe classique comme une turbine à gaz conventionnelle.

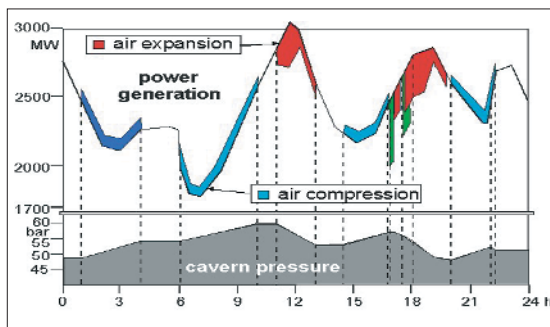


Fig.1 : Exemple de production d'énergie pendant une journée

Il n'y a actuellement que deux installations de stockage d'air comprimé dans le monde : la centrale de 290 MW, propriété de E.N. Kraftwerke, à Huntorf en Allemagne, construite en 1978 et l'installation de A.E.C. (Alabama Electric Corporation) à Mc Intosh en Alabama USA, mise en service en 1991.

En Allemagne, par suite de la baisse prévue des grandes capacités de production d'énergie électrique, on s'attend, dans un proche avenir, à une croissance importante des besoins de la "réserve rapide" puissance de l'installation qui peut être rendue disponible en quelques minutes). Un autre argument en faveur du stockage d'air comprimé réside dans la puissance installée, - en constante augmentation - de l'énergie éolienne pour laquelle la prévision à court terme de la production est assez aléatoire.

Le but de cet article est de décrire brièvement l'installation d'Air Comprimé de Huntorf (essentiellement les installations souterraines) qui a été exploitée avec succès depuis plus de 20 ans et de faire part de l'expérience pratique d'exploitation acquise durant cette période. Les points critiques des cavernes de stockage d'air comprimé sont :

- les tubes de production (risque de corrosion lié à l'humidité de l'air comprimé)
- les phénomènes thermodynamiques (échange de chaleur entre l'air et le sel environnant)
- la stabilité à long terme du stockage souterrain

Principes d'une installation de stockage d'air comprimé

Une installation de stockage d'air comprimé comporte principalement :

- 1) un système de compression,
- 2) une unité moteur-générateur,
- 3) une turbine à gaz,
- 4) une ou plusieurs cavernes de stockage d'air comprimé.

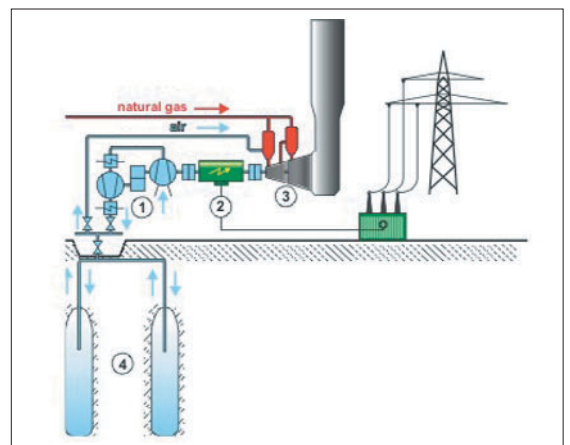


Fig.2 : principaux composants d'une installation de stockage d'air comprimé

Pendant la période "hors pointe" où l'énergie est à bas coût, un moteur consomme de l'énergie pour comprimer et stocker de l'air dans les cavités salines souterraines. Ultérieurement, pendant les périodes de pointe, le processus est inversé ; l'air comprimé est renvoyé à la surface et il est utilisé pour brûler du gaz naturel dans les chambres de combustion. Le gaz de combustion résultant est alors détendu dans la turbine à gaz à deux étages pour entraîner le générateur et produire de l'électricité.

Dans une centrale à turbine à gaz classique, environ les 2/3 de la puissance dégagée dans la machine sont utilisés pour la compression de l'air de combustion (100 MW de puissance nette + 200 MW de consommation du compresseur = 300 MW de puissance totale). Au contraire, dans une centrale avec stockage d'air comprimé aucune compression n'est nécessaire pendant le fonctionnement de la turbine car l'enthalpie nécessaire est déjà comprise dans l'air comprimé. Ceci présente deux avantages :

- l'énergie excédentaire, moins chère en période "hors pointe" peut être utilisée pour la compression.
- la turbine à gaz peut fournir au réseau électrique les 3 tiers de sa puissance (ou 300 MW dans l'exemple ci-dessus) au lieu de 1/3 (100 MW).

Le type principal de stockage souterrain adapté à cet objectif est la cavité saline. D'autres variantes peuvent aussi être envisagées : un projet de stockage d'air comprimé à Norton dans l'Ohio USA est actuellement à l'étude et, dans ce cas, le stockage souterrain est une mine de calcaire de 10 millions de m³. Des structures aquifères (réservoirs souterrains remplis d'eau) constituent un autre type de stockage possible. Ils ont été étudiés en détail dans les années 80.

Le stockage d'air comprimé de Huntorf (projet et construction)

Données de base : l'installation de Huntorf, située en Allemagne du nord a été mise en service en 1978 ; elle fut la première installation au monde de stockage d'air comprimé à des fins énergétiques. L'installation a été, dans le même temps, complétée par une caverne de gaz naturel de 300 000 m³ pour alimenter les turbines à gaz avec un meilleur rendement économique. Le tableau suivant résume les données de base de l'usine de Huntorf :

Puissance	
- consommée, compresseur en service	60 MW (<12 h)
- produite, turbine en service	290 MW (<3 h)
Débit d'air	
- compresseur en service	108 kg/s
- turbine en service	417 kg/s
- ratio entrée/sortie des masses d'air	1/4
Nombre de cavernes d'air comprimé	2
Volume des cavernes :	
- 1 ^{ère} caverne	140 000 m ³
- 2 ^{ème} caverne	170 000 m ³
Volume total	310 000 m ³
Profondeur des cavernes :	
- sommet	650 m
- base	800 m
Diamètre maximum	environ 60 m
Espace entre puits	220 m
Pression des cavernes	
- minimum autorisé	1 bar
- minimum en exploitation (exceptionnel)	20 bar
- minimum en exploitation (habituel)	43 bar
- maximum autorisé et en exploitation	70 bar
Vitesse maximum de baisse de pression	15 bar/h



Fig. 3-1 Vue aérienne de l'usine de Huntorf

Concept général : compte tenu de la masse d'air à stocker et des pressions d'exploitation, le volume total des cavernes est d'environ 310 000 m³. Il est par ailleurs important de prendre en compte les effets thermodynamiques dans la caverne pendant le remplissage et le soutirage.

Bien que le volume total ait pu facilement être atteint dans une seule caverne, deux unités ont été prévues pour différentes raisons :

- un excédent de capacité permet l'entretien d'une caverne ou peut pallier son arrêt d'exploitation.
- le remplissage des cavernes est plus facile après avoir abaissé la pression jusqu'à la pression atmosphérique.
- la procédure de démarrage de l'unité de compression demande une pression minimale de 13 bars dans au moins une des cavernes

La profondeur des cavernes (Fig. 3-2) a été choisie pour garantir la stabilité pendant plusieurs mois à la pression atmosphérique, ainsi que pour garantir la pression maximale de 100 bars.

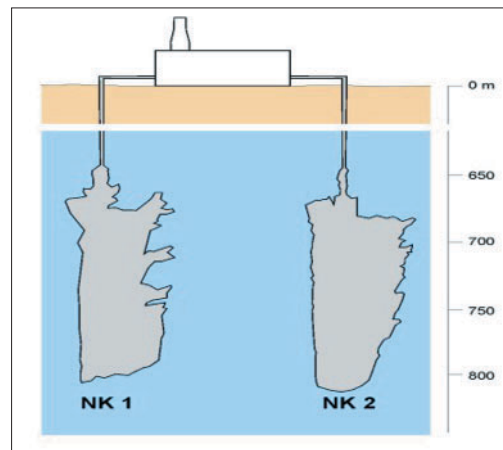


Fig. 3-2 : Les 2 cavernes et l'usine à la même échelle

Les puits d'accès aux cavernes : un aspect critique pour la conception des puits d'accès résidait dans la spécification de débits de soutirage extrêmement élevés de 417 kg/s combinés avec de faibles pertes de charge. Ceci exige un tube d'exploitation de 20" à 21" et donc une enveloppe extérieure de 24 1/2". Par suite de l'absence d'obturateur pour fixer le tube d'exploitation dans l'enveloppe, il y avait un risque que cette enveloppe se corrode par l'humidité pénétrant dans l'espace annulaire. Il y a été remédié par l'injection d'air sec dans cet espace annulaire.

Evacuation de la saumure : dans les cavernes de gaz naturel, la saumure est habituellement déplacée par le gaz pendant le premier remplissage. Dans le cas présent, la saumure a été soutirée en utilisant une pompe immergée car l'unité de compression avait une

pression maximale inadaptée et un débit d'air extrêmement élevé induisant des vitesses de l'air excessives dans le tube de production.

Équipements du puits : l'air comprimé, totalement saturé d'eau, est un milieu très corrosif. Pour réduire les coûts, le tube de production a été réalisé, au départ, en acier ordinaire avec des parois très épaisses. Les tubes de production, soudés en spirale, pendaient sans support sur environ 80m dans la caverne. Ceci avait été prévu pour éviter l'entrée de poussières de sel dans les turbines ;

Premier remplissage des cavernes : par suite du besoin d'une contre-pression minimale pour l'unité de compression, la première caverne a été remplie, la première fois, jusqu'à sept bars par un compresseur mobile. L'unité de compression fut alors mise en service. Ceci impliquait de contrôler le volume d'air, via un by-pass, pour s'assurer que la vitesse de 20 m/s n'était pas dépassée dans le tube de production.

Expérience pratique d'exploitation du stockage d'air comprimé de Huntorf

Nombre de démarrages annuels : l'usine de Huntorf a été exploitée avec succès depuis maintenant plus de 22 ans. La figure 4-1 montre le nombre de démarrage par an depuis 1978.

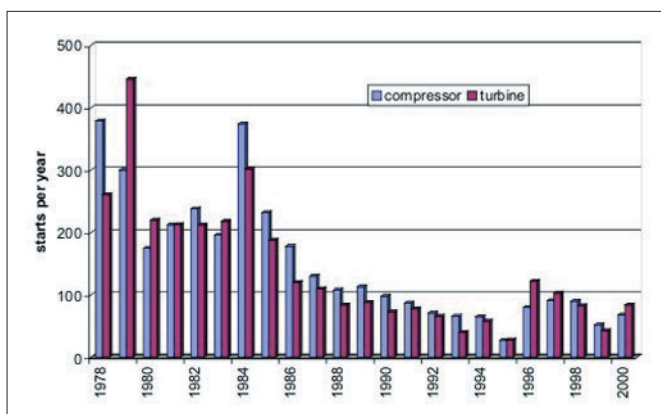


Fig. 4-1 Nombre de démarrages par an

Ce nombre de démarrages a varié largement pendant cette période d'exploitation. Ceci est dû à différentes raisons :

- le raccordement en 1985 à un réseau plus étendu qui ajouta une capacité de pompage hydraulique.
- le premier rôle du stockage d'air comprimé était une réserve de secours en cas d'arrêt imprévu des autres centrales.
- un autre rôle du stockage d'air comprimé est d'offrir une option alternative à l'achat à des fournisseurs extérieurs d'énergie de pointe très chère.

La centrale est actuellement utilisée essentiellement pour fournir de la "réserve rapide" : les centrales de base (au charbon) demandent trois à quatre heures pour atteindre leur pleine capacité ; ce temps d'intervention est de préférence couvert par la centrale d'air comprimé. Un autre usage typique est l'écrtage de pointe en soirée, quand il n'y a plus de capacité hydraulique disponible. Une application supplémentaire est intervenue avec le fort développement des éoliennes en Allemagne du Nord dans les dernières années : comme la disponibilité de ce type d'énergie ne peut pas être prévue de façon sûre, la centrale de Huntorf est capable de compenser rapidement toute baisse inattendue de l'énergie éolienne.

Thermodynamique : pendant le premier remplissage et ultérieurement pendant les périodes d'essai, de nombreuses mesures de pression et de température ont été réalisées. La simulation numérique du comportement thermodynamique a montré que les échanges thermiques avec le rocher n'ont lieu que dans une zone périphérique d'environ 1 m d'épaisseur. Ainsi, la forme très irrégulière des cavernes présente l'avantage d'augmenter les échanges de chaleur entre l'air et les parois, ce qui conduit à accroître de façon significative la capacité de stockage.

Un effet intéressant se produit quand l'air se détend à la pression atmosphérique : la chute de pression initiale entraîne le refroidissement de l'air, mais, après avoir atteint un minimum, la température remonte à nouveau (voir Fig. 4-2).

Stabilité - Convergence des cavernes (résultats d'inspections) : la stabilité du massif de sel environnant et les pertes de volume dues à la convergence sont des aspects importants de l'exploitation des cavernes de stockage d'air comprimé.

En comparaison avec les cavernes habituelles de stockage de gaz, les cavernes de stockage d'air comprimé sont exploitées avec des débits de soutirage plus élevés et donc des gradients de pression plus importants (jusqu'à 15 bar/h). De plus, il est parfois nécessaire de baisser la pression interne des cavernes jusqu'à la pression atmosphérique pour permettre des travaux sur les têtes de puits et les tubes d'exploitation. Dans le cas présent, des problèmes d'isolation d'un nouveau tube d'exploitation en plastique renforcé de fibres de verre ont nécessité de maintenir les cavernes à la pression atmosphérique pendant environ 12 mois.

Pour contrôler la stabilité, des inspections régulières du fond de la cavité à l'aide d'un sonar ont été faites ; l'évaluation pendant toute la période d'exploitation n'a pratiquement montré aucune modification qui aurait pu être attribuée à des chutes de toit...

L'inspection des parois des cavernes s'est révélée difficile, car les outils habituels par ultrasons utilisés dans les cavernes de gaz ont une gamme inadaptée aux cavernes de stockage d'air comprimé et par ailleurs cet air est très humide. Les inspections habituelles par laser, réalisées en variante, se sont aussi révélées inefficaces, par suite du brouillard dans les cavernes et de la condensation de l'humidité sur les lentilles.

Quand la caverne NKI fut détendue à la pression atmosphérique au début 2001, une mesure a été possible avec un laser "chauffé" (voir Fig. 4-3)

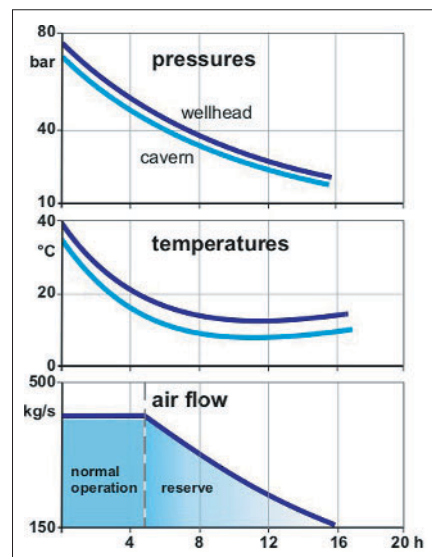


Fig. 4-2 : Pressions, températures et débit d'air lors de la vidange de la caverne



Fig. 4-3 : essai d'un laser SOCON chauffé

L'analyse de cette inspection, après plus de 20 ans d'exploitation n'a montré pratiquement aucun écart par rapport aux conditions d'origine (voir Fig. 4-4)

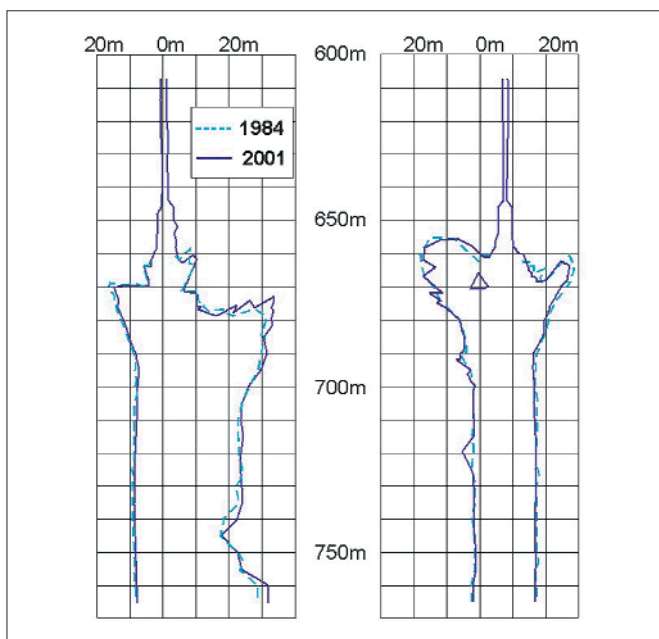


Fig 4-4 : Comparaison d'une inspection par sonar de la caverne NK1 en 1984 et inspection par laser en 2001

Tube de production : comme cela a déjà été mentionné, un tube d'exploitation en acier, soudé en spirale et non enrobé a été utilisé au début. Cependant, après seulement quelques mois d'exploitation, de sérieux problèmes de corrosion apparurent avec des quantités très importantes de rouille dans le filtre en amont des turbines à gaz. Ceci fut la cause d'arrêts peu après le démarrage de la centrale.

Les solutions suivantes ont été étudiées pour résoudre le problème :

- tubes d'exploitation enrobés
- tubes d'exploitation en acier inoxydable
- tubes d'exploitation chemisés
- tubes d'exploitation en matériau synthétique.

Suite à des études détaillées le FRP (plastique renforcé de fibres de verre) a été choisi au début des années 80 pour des raisons de coût et de facilité de mise en place ; les 58 sections de tube ont été installées en 12 jours à l'aide d'un derrick de 40 t de levage au crochet.



Fig. 4-5 Point de cassure du tube d'exploitation FRP

Après plus de 20 ans d'exploitation sans difficultés, des problèmes de matériau sont apparus sur quelques-uns des tronçons par suite d'une destruction partielle des deux tubes d'exploitation. La figure 4-5 met en évidence la zone de cassure.

Des études sont actuellement menées pour remplacer les tubes.

Enveloppe extérieure cimentée (24-1/2") : à la différence du tube de production, l'enveloppe extérieure cimentée ne peut être remplacée. La protection contre la corrosion a donc été prise en compte dès le début en injectant un gaz - actuellement de l'air sec - dans l'espace annulaire entre l'enveloppe et le tube FRP.

L'analyse des logs avec le MEET (**M**ultifrequency **E**lectromagnetic **T**hickness **T**ool) de SCHLUMBERGER a montré que les dispositions de protection contre la corrosion avaient été un succès et qu'il n'y avait aucune corrosion en surface ou piqûres.

Salinité : les turbines à gaz sont sensibles au sel contenu dans l'air de combustion. Les mesures faites durant deux cycles à des débits décroissant jusqu'à 365 kg/s ont montré une contamination par le sel inférieure à 1 mg (sel/kg d'air). Ce résultat positif a été confirmé par l'examen des pales des turbines.

Conception de deux cavernes indépendantes : plus de 20 ans d'expérience pratique de l'exploitation ont confirmé le choix qui avait été fait de construire deux cavernes indépendantes. Pour diverses raisons, il a été nécessaire, à plusieurs reprises, d'abaisser la pression dans l'une ou l'autre des cavernes jusqu'à la pression atmosphérique. Ainsi que cela a été décrit à propos du premier remplissage, un nouveau remplissage des cavernes coûte cher et demande beaucoup de temps, par suite de la nécessité de démarrer le processus en utilisant des compresseurs mobiles, relayés par les compresseurs de l'installation.

Comme indiqué plus haut, la procédure de démarrage d'un compresseur de l'installation exige une pression de 13 bars dans la caverne. Il est très facile de satisfaire à cette condition en remplissant partiellement la caverne en question à partir de la caverne voisine.

De plus, pendant les travaux de remise en état, une caverne de rechange est toujours disponible pour produire de la puissance, bien qu'avec une capacité de stockage réduite.

Conclusions

L'installation de HUNTORF est la première centrale du type " turbine à gaz/ stockage d'air comprimé dans le monde et constitue un tour de force d'ingénierie sans précédent. L'usine a démarré son exploitation après une courte période de mise en service et elle a dépassé les paramètres prévus lors de la conception (durée d'exploitation des turbines). Suite au remplacement, après quelques années, des tubes de production d'origine en acier par d'autres en FRP, l'installation a continué d'être exploitée sans problème pendant plus de 20 ans. L'entretien s'est limité aux interventions sur les têtes de puits et les vannes associées.

Après la cassure des tubes de production, suite à un défaut du matériau, une étude est menée pour définir les meilleures solutions de remplacement en termes de matériau et de méthodes d'installation. Après la mise en place des nouveaux tubes, l'usine CAES de HUNTORF continuera son exploitation avec succès. ■