

## Les STEP (stations de transfert d'énergie par pompage)

LES STEP SONT UN TYPE PARTICULIER D'INSTALLATIONS HYDROELECTRIQUES. CES CENTRALES POSSEDT DEUX BASSINS SITES A DES ALTITUDES DIFFERENTES. EN PERIODE CREUSE, L'EAU EST POMPEE VERS LE RESERVOIR SUPERIEUR. PUIS, EN PERIODE DE PIC DE CONSOMMATION, ON FAIT CHUTER CETTE EAU DANS DES TURBINES POUR PRODUIRE DE L'ELECTRICITE.

La fonction essentielle des STEP consiste en un report de production d'énergie des périodes de faible demande vers des périodes de demande plus conséquente. Le stockage d'énergie par pompage a été largement développé dans les années 1970-1990 pour optimiser le fonctionnement des grandes centrales électriques thermiques et nucléaires, en face d'une demande en électricité très variable dans le temps. Des grandes stations, jusqu'à 3000 MW de puissance unitaire de production, ont été construites dans ce but en Europe, aux Etats-Unis et au Japon ainsi que, un peu plus tard, en Chine. Au-delà de cet usage premier, le stockage d'énergie par pompage contribue à de multiples services aux réseaux et systèmes électriques, comme le réglage de la tension et de la fréquence, la garantie de puissance en heure de pointe, le secours en cas de problèmes sur le réseau. En outre, il permet d'éviter les baisses, voire les arrêts, de production des grosses centrales. Son développement est au plan international nécessaire pour accompagner celui des énergies renouvelables, intermittentes, solaire et éolienne. Ce second modèle d'activité motive une nouvelle vague très importante de développement de cette technologie, en Europe, mais aussi dans d'autres pays comme la Chine ou les Etats-Unis.



**Usine B3, robinet sphérique vu du dessus, STEP de Super Bissorte.**



*STEP de Revin*

### Le stockage d'énergie en grande pompe

La mise en œuvre du stockage d'énergie par pompage est aujourd'hui plus que jamais d'actualité dans le monde. C'est le moyen de stockage électrogène le plus économique, à condition de disposer d'un réservoir en altitude qui puisse être mis en communication, par des conduites et galeries, avec un autre plan d'eau situé plus bas. Les composants clés sont les turbines et pompes, ou turbines-pompes combinant les deux fonctions, auxquelles on demande un fonctionnement extrêmement flexible. Le stockage d'énergie par pompage est à ce jour le moyen de stockage d'énergie le plus utilisé au monde, puisque la capacité mondiale installée des usines de stockage par pompage était déjà en 2010 d'environ 140 000 MW. En France, six stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) ont été implantées par EDF. Ce parc est en cours de rénovation et d'extension.

## PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES STEP

# Des réserves d'énergie

LES STEP, EN PERMETTANT LE STOCKAGE D'ÉNERGIE, CONSTITUENT UNE COMPOSANTE CLE POUR LE DÉVELOPPEMENT DES ÉNERGIES RENOUVELABLES.

Cinq paramètres caractérisent une installation de stockage d'énergie par pompage. **L'énergie maximale**, stockée sous forme d'énergie potentielle de gravité, est supérieure à 10 GWh pour les plus grosses installations et peut atteindre plusieurs centaines de GWh. **La puissance installée** en mode turbinage et en mode pompage (généralement du même ordre de grandeur) : il y avait dans le monde, en 2000, une trentaine de stations de plus de 1000 MW de puissance unitaire de production. En 2020, il y en aura plus du double. En Europe, les 170 STEP existantes ont généralement une puissance de quelques centaines de MW. **La constante de temps** est le rapport de l'énergie stockable à la puissance. La grande majorité des STEP est dite journalière, avec une constante de temps de l'ordre de 8 heures. La STEP EDF de Grand'Maison est hebdomadaire (30 h). Certains projets norvégiens, sur de très grands lacs, pourraient être des stations saisonnières. **Le rendement** global est, sur un cycle complet, le rapport entre l'énergie électrique produite en turbinage et l'énergie électrique consommée en pompage ; il est d'environ 80 % pour les installations récentes, un peu inférieur au produit du rendement de la pompe et de celui de la turbine, à cause des pertes de charges hydrauliques dans les circuits. **Le degré de flexibilité** dépend des caractéristiques dynamiques des pompes et des turbines. Il s'agit là d'une exigence de plus en plus grande, qui est liée à la fourniture de services système. Les installations les plus récentes utilisent des turbines-pompes à vitesse variable afin de pouvoir fournir des services d'ajustement rapide de puissance tant en mode pompage qu'en mode turbinage. La STEP britannique de Dinorwig (1700 MW), construite en 1984 pour accompagner

le développement de l'énergie nucléaire au Royaume-Uni, est maintenant utilisée essentiellement pour fournir des services système à National Grid.

### Plusieurs types de STEP

Il y a les **STEP pures** et les **STEP mixtes**. Les dernières ont un bassin supérieur qui reçoit un apport d'eau naturel. C'est le cas de la STEP EDF de Grand'Maison. Les stations se distinguent également



Puits groupe 1 de la STEP du Cheylas

par la nature du bassin inférieur. Les **STEP terrestres**, les plus nombreuses, sont constituées de deux réservoirs dont les volumes sont de l'ordre de 10 à 100 millions de m<sup>3</sup>. **Les STEP de lac** utilisent un grand lac comme bassin inférieur : la station Suisse Hongrin-Leman utilise le lac Léman ; la grosse station américaine de Ludington utilise le lac Michigan. Les **STEP marines**, sur le même modèle, utilisent la mer comme bassin inférieur. Cette technologie, encore peu développée mais prometteuse, reste un défi. D'autres variantes technologiques pourraient voir le jour : petit réservoir et haute chute, par exemple.

## REPÈRES

**Grand'Maison (France, EDF) 1987, STEP mixte**

8 turbines-pompes et turbines Pelton totalisant 1790 MW en pompage et 1160 MW en turbinage.

Volumes utiles des réservoirs inf et sup (10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>) : 14 et 132. Hauteur de chute : variable entre 822 et 955 mètres.

**Vianden (Luxembourg, SEO, exploitée pour RWE) 1964, 1976, encore en cours d'extension.**

10 turbines-pompes totalisant 850 MW en pompage et 1096 MW en turbinage ; une 11<sup>ème</sup> en voie d'installation (+190 MW).

Volumes utiles des réservoirs inf et sup (10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>) : 7. Hauteur de chute entre 266 et 291 mètres.

**Goldisthal (Allemagne, Vattenfall) 2003**

4 turbines-pompes à vitesse variable totalisant 1060 MW. Volumes utiles des réservoirs inf et sup (10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>) : 19 et 12. Hauteur de chute : environ 302 mètres.

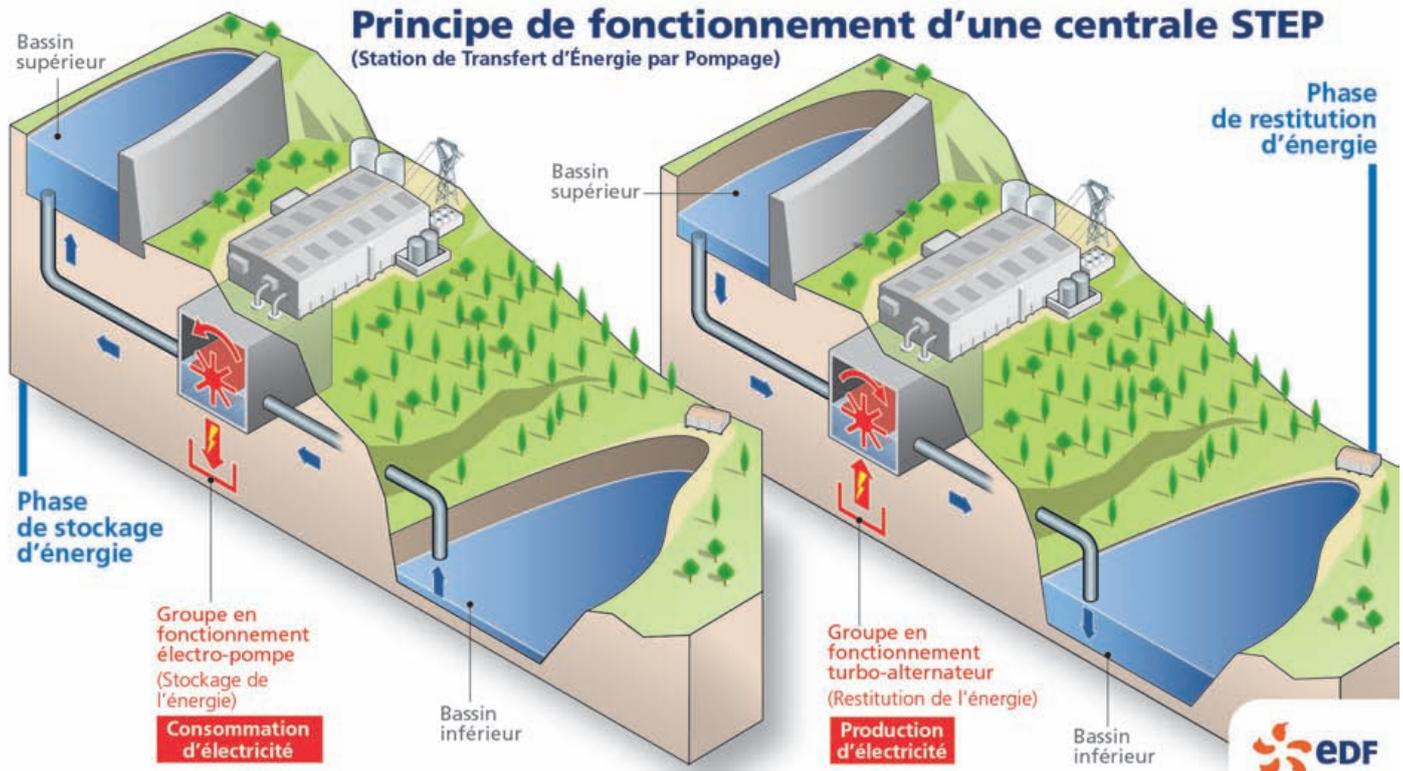
**Nant de Drance (Suisse, ALPIQ) Prévues en 2017**

6 turbines-pompes à vitesse variable, totalisant 900 MW. Volumes utiles des réservoirs Vieil Emosson et Emosson (10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>) : 210 et 11. Hauteur de chute entre 250 et 390 mètres.

**Hohhot (Chine, Mongolie intérieure, China Three**

Gorges Corp) Prévues en 2014 4 turbines-pompes à vitesse variable totalisant 1224 MW. Volumes utiles des réservoirs (10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>) : 6.

Hauteur de chute : env. 520 m



## LE SAVIEZ-VOUS ?

- Le record mondial de puissance en turbinage est détenu par la station américaine de Bath County, rénovée en 2009, avec 3000 MW.
- La station japonaise de Kannagawa, en cours de construction par TEPCO, pourrait atteindre 2800 MW.
- Les stations chinoises de Guangzhou et Huizou, mises en service en 2000 et 2011 dans le Guangdong, ont chacune une puissance de turbinage de 2400 MW.
- Le record européen est détenu par la STEP EDF de Grand'Maison avec 1790 MW.
- La plus grosse STEP allemande est celle de Goldisthal (1060 MW), qui appartient à Vattenfall.

### L'acceptabilité sociale et environnementale

L'une des conditions du développement des STEP est l'acceptabilité sociale et environnementale. Si le stockage d'énergie a globalement un impact positif sur l'environnement (fonctionnement optimal des grosses centrales à charbon, réduction des moyens de pointe au gaz, intégration des énergies renouvelables), leur développement par pompage passe cependant par l'acceptation locale des projets. Par exemple, le projet de nouvelle station allemande d'Atdorf – 1400 MW – rencontre actuellement de fortes oppositions locales. Certains grands projets de STEP en Inde ou en Chine impliquent par ailleurs des déplacements de populations. L'impact local sur la biodiversité et les poissons doit aussi être pris en compte.

### Les aspects économiques

L'équation économique est également une question délicate. En effet, le concurrent direct d'un projet de nouvelle STEP est celui d'un autre moyen de production flexible, turbine à combustion par exemple. Le coût de construction dépend beaucoup

de l'ampleur des travaux de génie civil, surtout s'il faut construire des barrages ou des digues. Le coût d'investissement global se situe entre 0,5 et 2 millions d'euros par MW de puissance installée. Il est souvent plus économique d'augmenter la capacité d'une installation existante que de construire une nouvelle station. Les coûts de fonctionnement comprennent le coût de l'énergie utilisée pour le pompage, les coûts de maintenance et d'exploitation usuels, et les taxes, dont la taxe d'accès au réseau. Dans certains pays, le coût d'accès au réseau n'est appliqué que sur la différence entre l'énergie consommée par pompage et l'énergie produite par turbinage. En France, il est appliqué à chacune d'elles, ce qui désavantage cette technologie. La vente de l'électricité turbinée ne peut rapporter un bénéfice brut que si le rapport entre les prix de l'électricité heure creuse / heure pleine est inférieur au rendement global de la STEP. Les produits d'exploitation proviennent de la vente de l'électricité turbinée, mais aussi de la rémunération des différents services rendus au système électrique, qu'il est important de valoriser de façon adéquate.

## Perspectives

Les réseaux de transport d'électricité permettent de mutualiser les besoins de stockage d'énergie des parcs d'énergie renouvelables, en développant le stockage d'énergie par pompage. En Europe, tous les pays qui développent de façon massive l'énergie éolienne ont un important besoin de stockage : dix jours sans vent en Allemagne en 2050 pourraient nécessiter une capacité de stockage de l'ordre de l'ordre de 5 TWh. La Suisse, l'Allemagne et l'Autriche ont annoncé en 2012 une initiative commune pour développer le stockage d'énergie par pompage-turbinage. Les objectifs propres aux Allemands sont ambitieux mais pourraient être difficiles à atteindre en raison des oppositions locales. Ce pays pourrait être amené à compter sur ses voisins pour cette fourniture. La Suisse conduit un programme pour passer de 1400 à 5000 MW de puissance installée en STEP entre 2012 et 2030 avec, par exemple, Nant de Drance, un projet nouveau dont ALPIQ détient 39 %. La Norvège dispose d'un gisement considérable grâce à ses nombreux lacs ; ce pays a lancé une "green energy initiative" qui prévoit la construction

de nouvelles installations de stockage par pompage (jusqu'à 10 000 MW) en construisant galeries et usines souterraines entre des lacs existants, et ambitionne de devenir la "batterie verte" de l'Europe. L'Espagne et le Portugal ont des plans ambitieux de développement du stockage par pompage avec les projets de La Muela II (852 MW), Frades II (760 MW), Alto Tamega (900 MW). En France, des opérations de rénovation et d'extension sont prévues sur la STEP de Revin. La remise en service après rénovation de l'ancienne STEP des Lacs Blanc et Noir est à l'étude. C'est la Chine qui donne l'exemple de la dynamique la plus importante. En 2009, elle comptait 22 stations totalisant 11 GW de puissance installée. Elle devrait avoir 30 GW de puissance installée en 2015, et entre 50 et 60 GW en 2020. Ce développement se manifeste par des grands projets de constructions nouvelles (dont une troisième STEP de 2400 MW) dans les régions de grande consommation et par l'apparition récente de projets soutenant le développement éolien. La STEP de Hohhot, prévue en 2014 en Mongolie intérieure, a pour principale motivation de venir en complément d'un parc éolien développé par le même investisseur.

## Lexique

**Watt (W) :** unité internationale de puissance. Correspond à la quantité d'énergie consommée ou produite par unité de temps (un joule par seconde). La puissance correspond à un débit d'énergie.

**kWh :** un kWh vaut 3,6 mégajoules (MJ) et correspond à la consommation d'un appareil électrique de mille Watts pendant une heure.

**Pertes de charge hydrauliques :** perte d'énergie au cours de l'écoulement d'un fluide, causée par la viscosité, la turbulence, le frottement sur les parois des conduits.

**Système électrique :** ensemble constitué de machines de production d'énergie électrique et de points de consommation, reliés par un réseau maillé.

**Service système :** est l'ensemble des services rendus par des centrales de production et permettant d'assurer la sécurité des réseaux, notamment la régulation en tension et fréquence, la fourniture des réserves à la hausse et à la baisse...

### > pour en savoir plus

- ENGELS Klaus, HARASTA, Michaela, BRAITSCH Werner, MOSER Albert, SCHAFER Andreas, [Machine concept optimization for pumped-storage plants through combined dispatch simulation for wholesale and reserve markets](#), La Houille Blanche, n°3, 2012, p. 37-43
- LEMPERRIERE François, [Stockage d'énergie par pompage d'eau de mer](#) à paraître dans Les Techniques de l'Ingénieur, 2013.
- URSAT Xavier, JACQUET-FRANCILLON Henri, RAFAI Isabelle, [Expérience d'EDF dans l'exploitation des STEP françaises](#), La Houille Blanche, n°3, 2012, p. 32-36.
- VENNEMANN Peter, GRUBER Karl Heinz, HAAHEIM Jan Ulrik, KUNSCH Andreas, SISTENICH Hans-Peter, THONI Hans-Rudolf, [Pumped storage plants – Status and perspectives](#). VGB Powertech Report, 4/2011.
- VIOLLET Pierre-Louis, [Stockage d'énergie par pompage hydraulique](#), article à paraître dans Les Techniques de l'Ingénieur, 2013.
- VIOLLET Pierre-Louis, [Histoire de l'Energie Hydraulique](#), Presses de l'Ecole des Ponts et Chaussées, 2005.

N'imprimez que si vous en avez l'utilité.

**EDF**  
 22-30 avenue de Wagram 75382 Paris Cedex 08  
 FRANCE

SA au capital de 924 433 331 euros - 552 081 317 R.C.S. Paris

[www.edf.fr](http://www.edf.fr)

**Publication EDF R&D** - 1 av Général de Gaulle 92141 Clamart Cedex  
 Directeur de la publication : **Stéphane ANDRIEUX**  
 Secrétaire de rédaction : **Florence METGE-LAYMAJOUX**  
 Le contenu de cette publication n'engage que son auteur et en aucune manière la responsabilité d'EDF.

© 2013 EDF  
 Toute reproduction interdite sans l'autorisation de l'auteur.  
 Crédits photos : EDF, Airdiasol-Rothan - EDF, Franck ODDOUX.

Le groupe EDF est certifié ISO 14001

**Contact :**

[communication-rd@edf.fr](mailto:communication-rd@edf.fr)  
<http://innovation.edf.com>