

1.1 Introduction

L'énergie électrique est produite dans sa majorité par des énergies fossiles ou fissiles. Cependant ces deux formes d'énergie présentent des inconvénients majeurs dont l'effet néfaste sur l'environnement et l'insécurité respectivement.

Le recours aux énergies renouvelables est l'une des solutions à ces problèmes, néanmoins la plupart de ces énergies renouvelables ont une production irrégulière et intermittente. Chose qui représente l'un des obstacles à leurs développements. En effet l'alimentation en énergie électrique d'une façon continue durant le jour et la nuit ne peut pas être satisfaite par une énergie renouvelable comme le solaire ou l'éolien. Ces systèmes ne produisent qu'en fonction de la disponibilité de la ressource et ne sont donc pas en mesure de garantir une puissance garantie car une diminution inattendue de la ressource est susceptible d'induire une baisse subite de la puissance produite. Ceci présente, en particulier pour le cas des systèmes à injection aux réseaux, une difficulté technique immédiate résidant dans la nécessité de démarrer sans délai les moyens de productions fossiles ou autres afin de compenser la perte de production des unités renouvelables. Pour cela un taux d'intégration maximale imposé a pour but de préserver la robustesse et la stabilité du réseau et donc de la distribution d'électricité.

Pour remédier à ce problème on fait appel aux systèmes de stockage dont le rôle est d'emmagasiner la production d'une station d'origine renouvelable pour l'utiliser plus tard au moment où elle sera utile localement et d'éviter de mettre en route des centrales d'appoint, généralement au gaz ou au charbon .

1.2 Les différents modes de stockage d'énergie

1.2.1 Notion de stockage

Le stockage d'énergie a pour but de mettre en réserve une certaine quantité d'énergie pour une utilisation ultérieure. Il concerne principalement le stockage de l'électricité et celui de la chaleur (cette dernière ne sera pas traitée dans ce cours). Le stockage de l'électricité vise à répondre à quatre problématiques principales:

- 1) la récupération de la production d'énergie excédentaire par rapport à la demande du moment ;
- 2) la fourniture d'énergie pour compenser l'insuffisance due au caractère intermittent de l'offre ;
- 3) la fourniture d'énergie pour alimenter un pic de demande occasionnel et
- 4) la fourniture d'énergie en cas de défaillance du système électrique ou de mauvaise qualité du réseau local (cas des systèmes à injection aux réseaux). À ce jour, le stockage direct de l'énergie électrique n'étant pas possible, l'électricité est convertie en énergie potentielle qui est stockée puis récupérée et retransformée pour être utilisable.

1.2.2 Caractéristiques

Le stockage d'énergie électrique se caractérise par trois paramètres:

- *la nature*

La nature du stockage est multiple et fonction du temps de décharge, de la puissance et de la durée requises. Le stockage peut être à usage fixe ou centralisé, on parle alors de stockage stationnaire, mais il peut être aussi mobile, il est alors qualifié d'embarqué (moyens de transport, appareils électroniques, etc.).

- *La capacité*

C'est la quantité d'énergie stockée; elle est liée directement à la durée de stockage. Elle peut varier de quelques heures (par exemple compenser le passage des nuages cas du solaire PV ou le calme du vent cas des éoliens) à quelques jours (par exemple pour les jours de faible ensoleillement cas du solaire PV ou les jours de faible vent).

Le stockage est dit de faible capacité lorsque celle-ci est de l'ordre du kWh et de forte capacité si elle est supérieure à 10 MWh. Dans ce cas, on parle de stockage massif de l'énergie.

- *Le rendement*

Le rendement de stockage c'est le rapport de l'énergie cédée à l'énergie introduite.

1.2.3 Type de stockage

Les technologies de stockage massif de l'énergie électrique peuvent être réparties en trois catégories :

- mécanique (potentielle ou cinétique) : stockage gravitaire par pompage (STEP), stockage par air comprimé (CAES), volants d'inertie ;
- électrochimique et électrostatique : batteries, condensateurs, superconducteurs ;
- chimique : hydrogène, méthanation, etc.

La figure 1.1 montre que les technologies permettant la gestion de fortes puissances sur des périodes longues concernent principalement les STEP, les CAES et la chaleur. Le stockage massif de l'énergie est majoritairement du stockage stationnaire mais quelques batteries mobiles peuvent aussi stocker des quantités d'énergie de l'ordre de quelques dizaines de MWh. Ces batteries sont utilisées comme réserve d'énergie à la différence des batteries UPS (Uninterruptible Power Systems) qui livrent une brève impulsion en régime continu (pour mettre en route un générateur de secours par exemple).

Le stockage de l'hydrogène commence également à être utilisé hors piles à combustible pour véhicules.

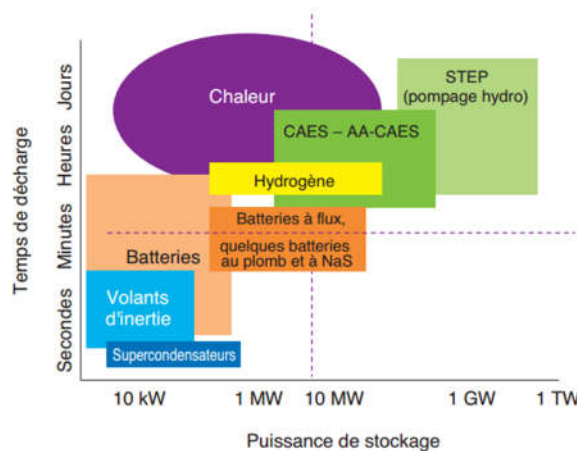


Figure 1.1 Les différentes technologies de stockage en fonction de leur puissance et du temps de décharge (autonomie)

La figure 1.2 montre la répartition des moyens de stockage installés dans le monde. On constate que le stockage sous forme de STEP est de loin le plus répandu puisqu'il représente près de 99% de la capacité de stockage mondiale.

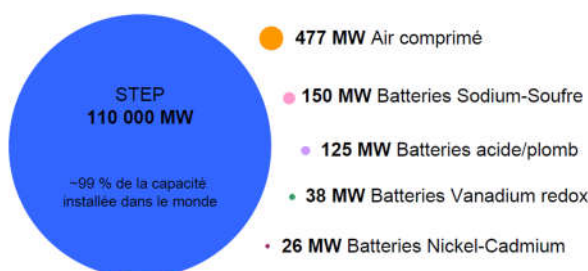


Figure 1.2 Rapport des puissances installées à l'échelle mondiale

1.3 Energie Mécanique (potentielle ou cinétique)

1.3.1 Stockage gravitaire par pompage (STEP)

1.3.1.1 Principe

Ces systèmes de stockage reposent sur le principe de l'énergie gravitaire. Ils fonctionnent sur le principe de deux retenues d'eau à des hauteurs différentes et est souvent couplé avec un barrage. Lorsque l'électricité est produite en excès, l'eau du bassin inférieur est pompée via une conduite forcée vers le bassin supérieur, qui devient un réceptacle d'énergie potentielle. Lorsque le besoin se fait

ressentir, une partie du réservoir supérieur, est vidée et par gravité, l'eau passe dans une turbine qui produit l'électricité. C'est un système réversible qui associe pompe et turbine.

La STEP est une technologie mature nécessitant néanmoins des installations conséquentes et un contexte géographique spécifique. Elle est en plein essor dans les régions montagneuses du monde entier. C'est un stockage qui permet de stocker la plus grande quantité d'énergie. La puissance nominale varie entre 400 et 4000 MW avec un temps de décharge entre 10 et 100 heures.

1.3.1.2 Types de STEP

La réalisation pratique des STEP peut être effectuée de deux manières :

- avec deux conduites d'eau : l'une est destinée au pompage de l'eau vers le réservoir haut et l'autre est destinée à la production d'énergie à travers les turbines (Fig 1.3a).
- avec une seule conduite : la même conduite d'eau est utilisée pour le stockage et la production de l'énergie. Les machines utilisées sont alors réversibles. La machine hydraulique peut fonctionner comme turbine et comme pompe. La machine électrique sur l'arbre de la turbine peut travailler comme générateur ou comme moteur (Fig 1.3b).

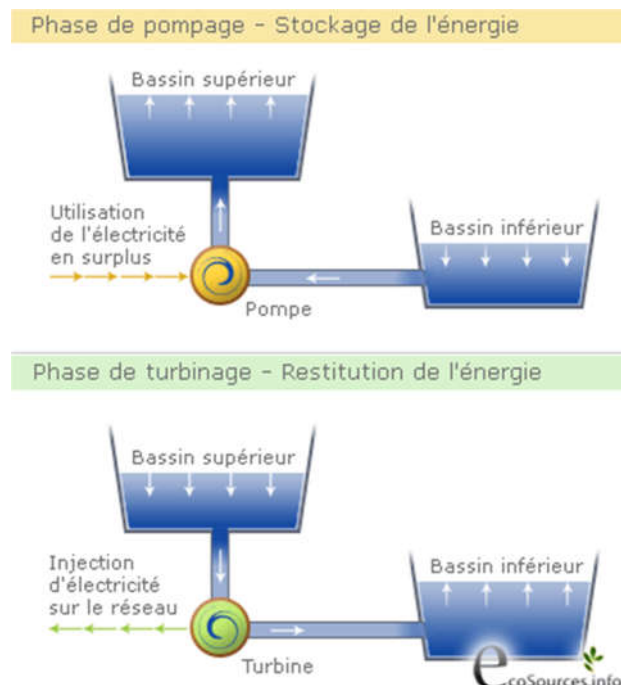


Figure 1.3a Phases de pompage et de turbinage

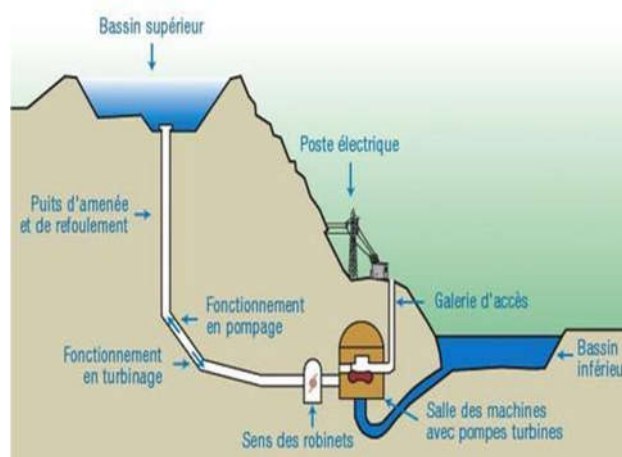


Figure 1.3b Principe d'une STEP

1.3.1.3 Bilan énergétique

Le rendement d'un tel système est de l'ordre de 70 à 85% en tenant compte des pertes de la conversion d'énergie, de l'évaporation de l'eau en contact avec l'atmosphère et des pertes de charge.

Le bilan énergétique peut être présenté comme suit :

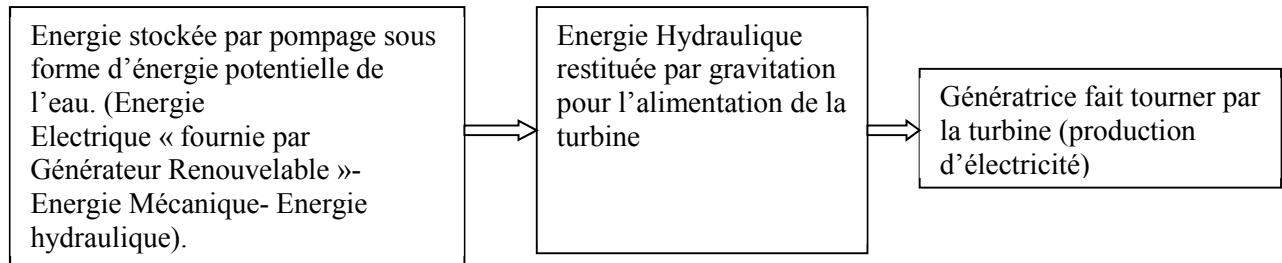


Figure 1.3c Bilan Energétique

Les énergies du Box 1 seront données dans le cours du pompage PV. La puissance hydraulique correspondant à un débit d'eau de Q (m³/s) tombant par une dénivelée de H mètres est donnée par la relation suivante :

$$P = Q\rho gH \quad (1.1)$$

1.3.2 Stockage par air comprimé classique (CAES, Compressed Air Energy Storage)

1.3.2.1 Principe

Le principe du CAES repose sur l'élasticité de l'air : l'air est d'abord comprimé via un système de compresseurs, à très haute pression (100 à 300 bar) pour être stocké dans un réservoir (cavités souterraines par exemple). Pour récupérer cette énergie potentielle, l'air est détendu dans une turbine qui entraîne un alternateur (fig. 1.4a). Comme l'air se réchauffe pendant sa compression, la chaleur à la sortie du compresseur peut être récupérée via des échangeurs et stockée afin d'être utilisée pour réchauffer la turbine.

Il existe deux types de stockage à air comprimé : CAES classique et Advanced Adiabatic CAES (AA-CAES)

→ *CAES classique*

Le système fonctionne pratiquement comme une centrale à gaz sauf que les phases de compression et de détente sont séparées et décalées dans le temps. Ce système met en œuvre une turbine à gaz; la chaleur produite n'est pas stockée mais seulement récupérée et le stockage de l'air comprimé se fait dans des cavernes souterraines. Le rendement d'une installation CAES classique est de l'ordre de 50 %.

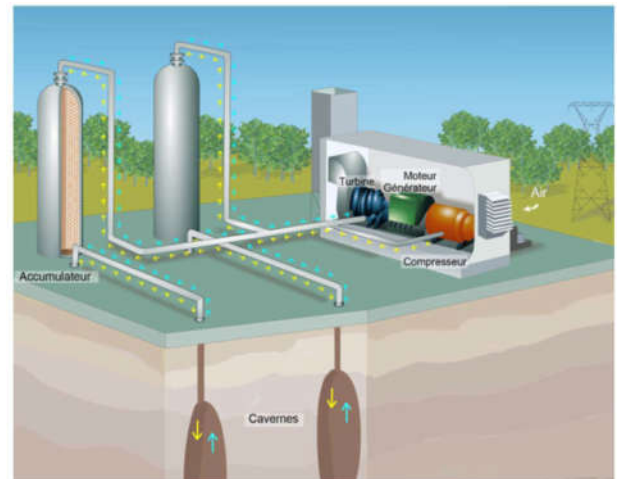


Figure 1.4a Principe d'un stockage par air comprimé CAES

→ *Advanced Adiabatic CAES (AA-CAES)*

Le système A-CAES (Adiabatic* CAES), voir fig.1.4b, vise à améliorer le système CAES classique en évitant la perte de chaleur à la sortie des compresseurs en stockant l'air chaud directement dans le réservoir. Mais il n'existe pas de tel réservoir capable de supporter à la fois une forte pression et une forte température (de l'ordre de 600 °C), et sans perte de chaleur pendant le stockage.

Le principe du AA-CAES reprend cette idée, mais propose que les deux énergies thermique et de compression soient stockées dans deux réservoirs spécifiques. La chaleur nécessaire pour réchauffer

l'air comprimé pour sa détente est apportée par cette réserve et le système s'affranchit ainsi des apports en gaz comme dans le CAES classique. La pression dans le réservoir d'air comprimé froid est de l'ordre de 200 bars et la température dans le réservoir de stockage de chaleur est voisine de 600 °C. Comme pour le CAES classique, d'autres environnements de stockage que les cavités salines peuvent être envisagés. Ce procédé peut être adapté à tous les types de besoins et de sources énergétiques et peut être complémentaire à tout système énergétique qui produit des surplus en périodes creuses. A titre d'exemple un projet de 80 MW sur 5 h en continu à partir d'énergie éolienne est réalisé en Allemagne (projet ADELE).

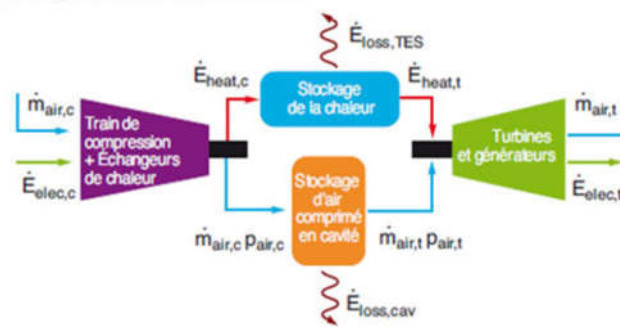


Figure 1.4b Principe du AA-CAES

* Un processus est dit adiabatique lorsque les deux systèmes qui le composent n'échangent pas de chaleur entre eux.