

Le stockage d'électricité à grande échelle

Jacques Ruer

L'essor actuel des énergies renouvelables, comme l'éolien ou le solaire photovoltaïque, soulève régulièrement un débat lié au caractère intermittent de ces sources d'électricité. Il est communément admis que le réseau peut accepter sans contrainte lourde un taux de pénétration de 20 % de ces énergies renouvelables sur le réseau sans faire apparaître de problème de stabilité en fréquence ou en tension. De fait, des taux beaucoup plus importants sont déjà rencontrés de temps à autre dans certains pays où la génération électrique éolienne est forte, lorsque le vent souffle et que la demande électrique est faible.

Le lecteur trouvera par ailleurs les principales notions qui se retrouvent pour toutes les formes de stockage ainsi que les quelques technologies capables d'apporter un service au réseau grâce à des capacités et à des puissances importantes. Parmi celles-ci, une nouvelle technologie développée par Saipem, dite SEPT (stockage d'électricité par pompage thermique), est décrite de façon plus complète.

L'essor actuel des énergies renouvelables, comme l'éolien ou le solaire photovoltaïque, soulève régulièrement un débat lié au caractère intermittent de ces sources d'électricité. Il est communément admis que le réseau peut accepter, sans contrainte lourde, un taux de pénétration de 20% de ces énergies renouvelables sur le réseau sans faire apparaître de problème de stabilité en fréquence ou en tension. De fait, des taux beaucoup plus importants sont déjà rencontrés de temps à autre dans certains pays où la génération électrique éolienne est forte, lorsque le vent souffle et que la demande électrique est faible. La limite physique de pénétration des sources intermittentes sur le réseau peut être repoussée bien au-delà de la valeur mentionnée grâce, par exemple, au renforcement des lignes d'interconnexion au niveau européen permettant de mutualiser la production de fermes dispersées géographiquement et soumises à des conditions de vent différentes.

Toutefois, en raisonnant par l'absurde, on pressent qu'il ne serait pas possible de garantir la génération d'électricité uniquement à partir de sources renouvelables et intermittentes sans mesures complémentaires.

Notons pourtant que l'Allemagne envisage d'utiliser 80% d'électricité d'origine renouvelable à partir de 2050 [1]. La réflexion sur les moyens à mettre en œuvre pour atteindre cet objectif est déjà engagée outre-Rhin. En complément de l'interconnexion à grande échelle, une option étudiée consiste à stocker l'énergie excédentaire pour la restituer en fonction des besoins. Ceci explique que la thématique du stockage d'électricité suscite actuellement un grand intérêt [2]. L'objet de cet article est de montrer succinctement comment un stockage d'énergie peut être mis en œuvre, ainsi que les principales technologies en cours de développement dans ce domaine.

Le stockage de l'électricité est un sujet très large dont il n'est pas possible de décrire tous

les aspects dans le cadre restreint d'un article. On introduit ci-dessous les principales notions qui se retrouvent pour toutes les formes de stockage. On ne décrit, de façon succincte, que les quelques technologies qui sont capables d'apporter un service au réseau grâce à des capacités et des puissances importantes. Parmi celles-ci, une nouvelle technologie développée par Saipem, dite SEPT (stockage d'électricité par pompage thermique), est décrite de façon plus complète.

1. Stockage d'électricité et stockage d'énergie

Pour les non-spécialistes, il est communément admis que l'électricité ne se stocke pas. Pour les spécialistes, il est exact que l'énergie électrique elle-même ne se stocke directement que dans les condensateurs sous forme électrostatique. La capacité énergétique est limitée, même si l'avènement des super-condensateurs permet déjà des réalisations à faible échelle. En revanche, l'électricité peut être stockée grâce à une chaîne de transformations :

- Conversion de l'énergie électrique en une autre forme d'énergie qui soit stockable ;
- Stockage de cette énergie ;
- Conversion inverse de l'énergie stockée en électricité.

La nature de l'énergie stockable définit les familles de stockage. Parmi les systèmes offrant de grandes puissances, on trouve :

- Énergie potentielle d'eau pompée en altitude (stockage hydraulique gravitaire) ;
- Énergie potentielle d'air comprimé ;
- Énergie chimique (batteries à circulation – hydrogène) ;

- Énergie thermique : stockage d'électricité par pompage thermique (SEPT).
À côté de celles-ci, il existe de nombreuses autres technologies. On peut citer notamment :
- Accumulateurs électrochimiques (batteries au plomb, au lithium, sodium-soufre, etc.) ;
- Énergie cinétique : volants d'inertie tournant à haute vitesse dans des enceintes sous vide ;
- Énergie magnétostatique : énergie magnétique d'électroaimants supraconducteurs à haute induction.

Le fait que le stockage soit réalisé sous une forme d'énergie autre que l'électricité conduit à parler de «stockage d'énergie» plutôt que de «stockage d'électricité». La nuance est importante, car elle introduit la possibilité de stocker de l'énergie apportée par un vecteur qui peut être non électrique (chaleur solaire, biomasse, etc.) en la restituant éventuellement sous une forme autre que l'électricité (chaleur, fuels synthétiques, hydrogène mélangé au gaz naturel, etc.) [3].

Toutefois, dans le cadre de cet article, on limitera l'exposé au stockage d'électricité, l'énergie étant apportée et restituée sous cette forme. De plus, on ne décrira que les systèmes capables de stocker des quantités importantes d'électricité et d'apporter un soutien au réseau.

2. Généralités sur les stockages électriques

Avant même de rentrer dans la description des technologies, il est déjà possible de définir des caractéristiques communes à tous les systèmes de stockage, qui sont la conséquence

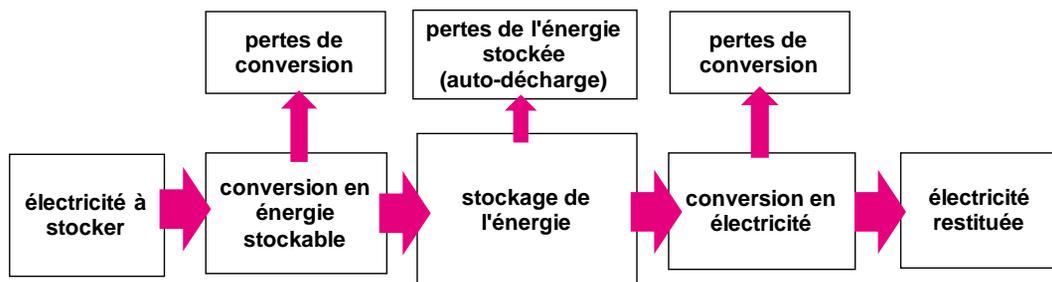


Figure 1 : Principe générique d'un stockage d'électricité.

de la chaîne de transformations illustré sur la figure 1 (voir encadré 1).

D'un autre côté, si l'on examine les raisons qui invitent à mettre en œuvre un stockage d'énergie, on s'aperçoit que celles-ci sont extrêmement diverses (voir encadré 2).

Selon les usages visés, les capacités énergétiques, les temps caractéristiques, et de manière plus large l'ensemble des paramètres examinés, sont très divers. Par conséquent, les technologies de stockage utilisables sont aussi fort différentes d'un cas à un autre.

Comme chaque situation justifie l'utilisation d'une technologie différente, il serait fastidieux de détailler ici tous les cas de figure. On se contentera ci-après de décrire les principaux systèmes de stockage d'électricité capables d'intervenir sur le réseau en fournissant de fortes puissances et de grandes capacités, et ayant des temps caractéristiques de plusieurs dizaines ou centaines d'heures.

3. Principales technologies de stockage de masse d'électricité

A) Stockage d'énergie par pompage hydraulique gravitaire

Ces installations de stockage sont des usines hydroélectriques particulières, capables de

pomper de l'eau entre des réservoirs situés à des altitudes différentes, puis de turbiner cette eau en temps utile. La terminologie adoptée par EDF est Station de transfert d'énergie par pompage ou STEP.

Il existe actuellement une capacité de stockage d'électricité cumulée de 4GW en France, 45GW en Europe, 100GW dans le monde.

L'énergie stockée est proportionnelle au volume d'eau pompé multiplié par la différence d'altitude entre les réservoirs. Les stations sont en général installées dans les zones montagneuses. Mais on peut aussi, par exemple, pomper de l'eau de mer entre la mer et un réservoir construit en haut d'une falaise. On utilise en général des machines hydrauliques différentes pour le stockage et le déstockage, et on peut avoir des puissances différentes pour chaque phase.

En France, l'installation la plus importante est celle de Grand-Maison (Isère). Sa puissance est de 1790 MW et la capacité de 200 GWh. Le barrage a une capacité de 140 millions de m³ et l'élévation est de 800 m [4].

Les besoins nouveaux de stockage conduisent à une modification des usines de production hydroélectrique pour leur permettre de pomper si les réservoirs nécessaires existent à proximité. Plusieurs sites sont ainsi

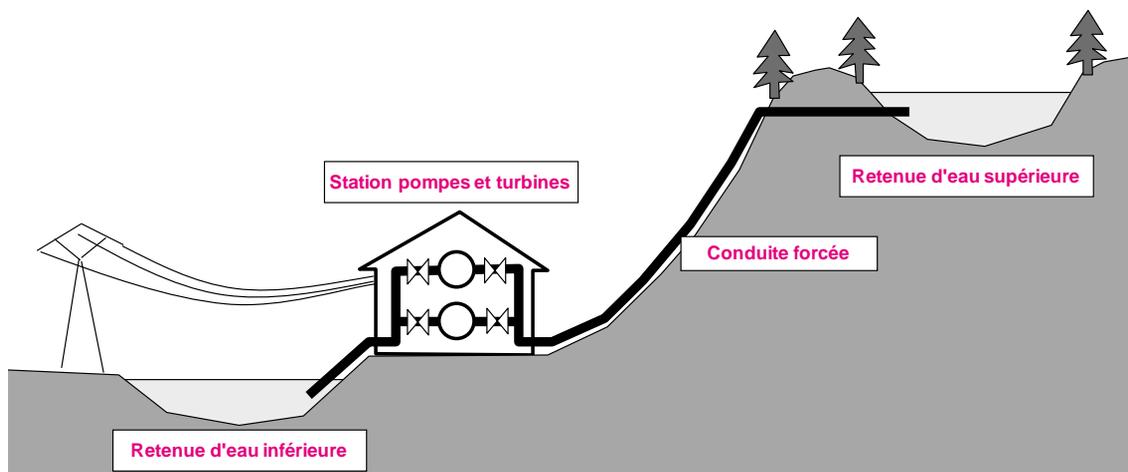


Figure 2 : Schéma de principe d'une station de stockage hydraulique gravitaire.

Les principales caractéristiques d'un système de stockage

Rendement : Toute conversion d'énergie engendre des pertes. La quantité d'électricité restituée est inférieure à celle consommée lors du chargement du stockage.

Capacité : Quantité d'électricité restituée lors de la décharge du stockage. La quantité d'électricité consommée lors du chargement est supérieure à cause des pertes de rendement.

Puissance : Puissance électrique du système vu du réseau. La puissance lors du chargement peut être différente de celle lors du déchargement. La puissance disponible peut varier en fonction de l'état de charge ou de décharge, généralement à la baisse lorsque le stockage est presque complètement chargé ou déchargé.

Temps caractéristique : En divisant la capacité par la puissance (par exemple lors du chargement), on obtient une durée représentative du temps nécessaire pour effectuer une charge complète. On peut de même définir un temps caractéristique de déchargement.

Densité d'énergie : Capacité divisée par l'encombrement du réservoir de stockage.

Autodécharge : L'énergie stockable peut se dissiper au cours du temps sans restitution d'énergie utile. Par exemple, les batteries se déchargent lentement, mais inexorablement en l'absence de toute utilisation.

Nombre de cycles : Nombre de cycles chargement-déchargement que l'installation peut effectuer durant sa durée de vie avant d'être considérée comme usée.

Profondeur de décharge : Pour des raisons techniques, il est parfois nécessaire de limiter les quantités d'énergie échangées lors d'un cycle à une valeur inférieure à la capacité théorique d'un chargement complet. La profondeur de décharge effectuée durant l'exploitation a parfois une répercussion sur la durée de vie. Par exemple, une batterie électrochimique profondément déchargée à chaque cycle subit une baisse progressive de sa capacité et une diminution de son espérance de vie en termes de cycles. Ce problème conduit à définir une capacité utile, inférieure à la capacité définie plus haut, qu'il est judicieux de ne pas dépasser lors de l'exploitation.

Sécurité : Un stockage d'énergie contient, par définition, une certaine quantité d'énergie qui peut s'avérer dangereuse si elle est libérée de façon non contrôlée. La sécurité des systèmes doit donc être étudiée soigneusement.

Coût de l'énergie stockée : Prix du système divisé par la capacité.

Coût de la puissance : Prix du système divisé par la puissance. Selon le service attendu du stockage, on peut s'intéresser plus particulièrement à la puissance de chargement ou à celle de déchargement.

réaménagés en Suisse et en Autriche (Grande Dixence, Limmern, Voralberg, etc.) [5].

Signalons que, pour répondre aux futurs besoins de l'éolien offshore en mer du Nord, des acteurs envisagent de mettre à profit des lacs en Norvège. Une puissance de 20 GW est

accessible en équipant des réservoirs existants. Le seul lac de Blåjø représente une capacité de 7 800 GWh. Ceci suppose des aménagements majeurs localement, ainsi que la construction de lignes haute tension courant continu entre la Norvège et l'Allemagne.

Le rendement énergétique est très bon, voisin de 75 à 80%. La technologie est mature et la fiabilité des installations est excellente.

La densité d'énergie est faible, les réservoirs sont de grandes dimensions. Les sites convenables sont limités et même si de nouveaux projets pourront être réalisés, les futurs besoins ne pourront pas être satisfaits avec cette

seule technique. L'implantation se heurte à des contraintes environnementales, comme toute infrastructure majeure.

B) Stockage d'énergie par air comprimé

Comprimer de l'air réclame de l'énergie tandis que sa détente peut en fournir. Si l'on dispose d'une capacité de stockage de l'air

■ ENCADRÉ 2 ■

Les services apportés par un système de stockage

Mobilité : Le stockage permet à un appareil mobile d'assurer un service. Bien entendu, le problème est très différent pour un ordinateur portable ou un véhicule électrique. La densité d'énergie est ici essentielle. Le coût des batteries n'est guère un problème pour les appareils électroniques, mais constitue actuellement le principal frein à l'essor des véhicules électriques. Dans le cas du téléphone portable, le stockage d'énergie est un composant annexe qui permet à l'appareil d'assurer une fonction pour laquelle la consommation énergétique n'est pas un facteur essentiel. Celle-ci est appréhendée en termes d'impact sur le service (durée de fonctionnement entre recharges, temps de recharge), pas en termes de watt-heures.

Apport momentané de puissance : Certains systèmes peuvent nécessiter un fort surplus de puissance durant une courte durée. Dans les véhicules électriques, on peut trouver des super-capacités qui fournissent les appoints de puissance en complément de la batterie d'alimentation.

Secours : Le stockage permet de pallier à une panne du réseau d'alimentation. Selon l'impact économique éventuel d'une telle panne, l'utilisateur est amené à installer plus ou moins de capacité de réserve, disponible immédiatement et automatiquement lorsque le besoin apparaît. Pour des établissements industriels ou hospitaliers, il peut être suffisant d'assurer le soutien de l'alimentation en électricité jusqu'au démarrage d'un générateur diesel de secours. Par contre, un gestionnaire de réseau peut chercher à fournir une puissance suffisante pour redémarrer progressivement les centrales après une perte du réseau.

Gestion de la puissance : On peut envisager de stocker l'électricité produite à faible coût durant les heures creuses pour la revendre lors des pointes de consommation. La justification économique suppose un bon rendement et des coûts d'investissements acceptables.

Énergies renouvelables intermittentes : L'énergie produite non consommée immédiatement est stockée pour être restituée lorsque la production est inférieure à la consommation. On peut chercher à stocker l'énergie quelques secondes par compenser les effets d'une rafale de vent sur une éolienne, quelques heures pour profiter la nuit de l'énergie solaire captée dans la journée, quelques jours pour pallier à une absence de vent. Les solutions appropriées sont à chaque fois différentes.

90 MW – 360 MWh dans la région de Stassfurt. Le rendement énergétique attendu est de 70% [7].

C) Batteries à circulation

Les batteries électrochimiques constituent l'archétype du stockage d'électricité, l'accumulateur au plomb ayant été inventé par Planté en 1859. Dans une batterie classique au plomb ou au lithium, le volume de la batterie intervient sur la capacité, mais aussi sur la puissance. Le temps caractéristique est typiquement de quelques heures et peut difficilement être modifié.

Afin d'obtenir des temps caractéristique beaucoup plus grands, on utilise des batteries dites à circulation. La figure 5 schématise une batterie de ce type dans le cas particulier de la technologie au vanadium.

Les tanks contiennent une solution de sels de vanadium dans des états d'oxydation différents. Les électrolytes sont introduits dans des cellules qui comportent une membrane semi-perméable échangeuse de protons. Les réactions électrochimiques qui prennent place dans les cellules modifient les quantités respectives d'ions vanadium. On parle de réactions d'oxydo-réduction, d'où le terme de « batterie redox » également employé pour

Tableau 1		
Caractéristiques des installations CAES existantes		
	Huntorf	McIntosh
Puissance chargement	60 MW	110 MW
Puissance déchargement	320 MW	110 MW
Capacité	640 MWh	2860 MWh
Volume des cavernes	300 000 m ³	538 000 m ³
Pression maximale	70 bar	100 bar
Rendement	0,83 kWh élec. + 1,56 kWh gaz à 1 kWh restitué	0,69 kWh élec. + 1,17 kWh gaz à 1 kWh restitué

désigner ce type de batterie. Selon la tension désirée, on met plus ou moins de cellules en série.

La puissance est fixée par la surface d'échange entre les électrolytes, donc par la dimension des cellules électrochimiques. La capacité est proportionnelle au volume des réservoirs, qui peuvent être aussi grands qu'on le désire.

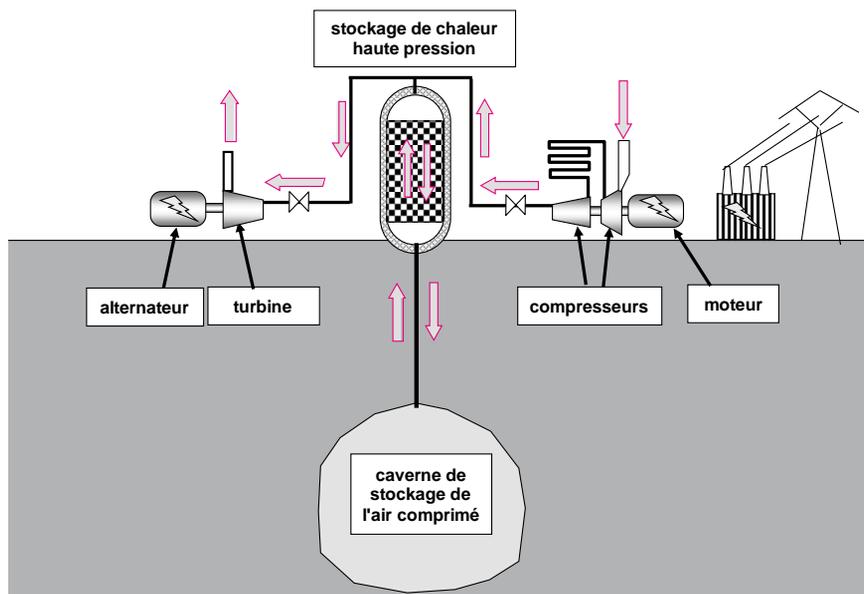


Figure 4 : Schéma d'une installation de stockage adiabatique d'air comprimé (ACAES).

Selon les promoteurs de la technologie, la capacité est de 25 kWh/m³ d'électrolytes et le rendement est de 75% [8]. La quantité de vanadium élémentaire est de 4 kg par kWh.

Signalons que la production mondiale actuelle de vanadium est de 56000 t, si bien que l'utilisation de cette technologie à grande échelle réclamera un changement majeur de l'industrie de production de ce métal. Des applications de quelques MWh existent déjà. D'autres types de batteries à circulation existent, utilisant des couples redox différents [9].

D) Hydrogène

L'électrolyse de l'eau permet de produire de l'hydrogène. On peut imaginer de stocker ce gaz en grandes quantités sous pression dans des cavernes souterraines. La conversion inverse en électricité est réalisable grâce à des piles à combustible. Un problème majeur de ce concept réside dans le rendement du cycle complet, de l'ordre de 40% actuellement. Des progrès sont envisageables dans ce domaine.

Si l'on accepte d'utiliser l'hydrogène directement sous forme chimique ou en profitant de son énergie de combustion, on peut réaliser un stockage d'énergie intéressant. Des projets correspondants sont déjà en cours de réalisation [10].

E) Stockage d'électricité par pompage thermique (SEPT)

Chauffer des corps à haute température nécessite beaucoup d'énergie, ce qui indique qu'il doit être possible de stocker de l'énergie en portant des matières solides à une température élevée. Saipem développe une technologie de stockage d'électricité basée sur ce principe.

L'énergie est stockée sous forme de chaleur et de froid dans deux régénérateurs, réservoirs pressurisés contenant des lits de graviers. Ils sont reliés par un circuit fermé de gaz neutre (argon) [11].

Le fonctionnement durant le chargement peut être décrit comme suit (voir figure 6) :

- Au début de la phase de chargement, les graviers contenus dans le réservoir froid sont à une température de 400°C, tandis que ceux du réservoir chaud sont à une température voisine de l'ambiante.
- Le gaz préchauffé par le passage sur les graviers à 400°C est comprimé. La compression élève sa température à 800°C. le gaz chaud circule de haut en bas dans les graviers du réservoir chaud, auxquels il cède sa chaleur.
- Le gaz refroidi à l'ambiante est détendu à la pression initiale. Il se refroidit à -70°C et pénètre en bas du réservoir froid.

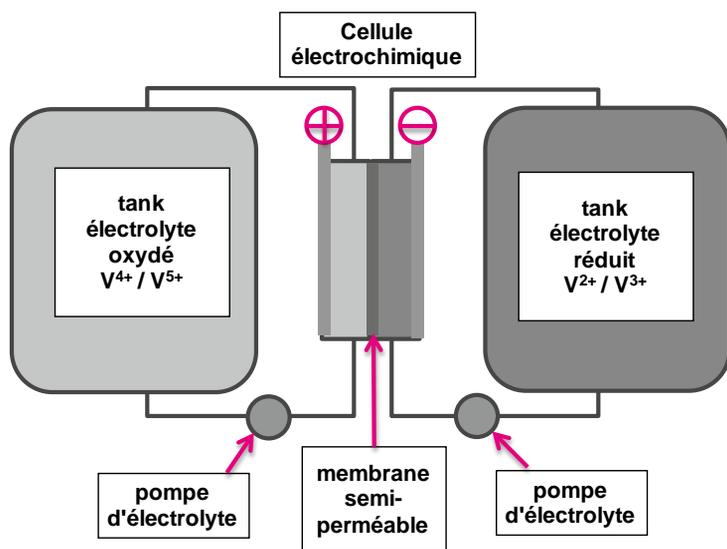


Figure 5 : Schéma d'une batterie à circulation au vanadium.

- À la fin de la phase de stockage, on a ainsi les graviers du réservoir chaud à 800°C, et ceux du réservoir froid à -70°C. On dit qu'on a pompé la chaleur d'un réservoir à l'autre, d'où le nom du procédé.

Durant le déstockage, le gaz suit le parcours inverse, mais des turbomachines différentes sont utilisées (voir figure 7) :

- Dans le réservoir basse pression, le gaz circule de haut en bas et se refroidit au contact des graviers froids.
- Le gaz froid est comprimé. Ceci l'échauffe à une température légèrement supérieure à l'ambiante. Le gaz est ramené à la température ambiante grâce au refroidisseur intégré dans le circuit. La théorie complète du système montre que c'est à ce niveau que sont évacuées les pertes énergétiques inévitables dues au fait que les machines ne sont pas parfaites.
- Le gaz comprimé traverse le régénérateur chaud de bas en haut et s'échauffe à 800°C.
- Le gaz chaud est détendu dans la turbine chaude qui fournit l'énergie mécanique entraînant l'alternateur.

Il ressort de cette explication que :

- L'installation comporte quatre machines à fluide différentes qui sont mises en œuvre alternativement.
- La pression du gaz est bien plus faible que dans le cas du procédé ACAES. Les régénérateurs sont donc plus simples à construire.
- La température maximale est par contre plus élevée (800°C au lieu de 600°C environ).

Il est connu que le rendement de la conversion de la chaleur en énergie mécanique est limité par le théorème de Carnot. Toutefois, dans ce procédé, la chaleur à haute température est obtenue en pompant la chaleur depuis la température tiède. Le même théorème de Carnot enseigne alors qu'on restitue à haute température une quantité d'énergie sous forme de chaleur bien plus élevée que la quantité d'énergie mécanique dépensée pour faire fonctionner la pompe à chaleur. Autrement dit, le théorème de Carnot, qui impose une limitation lors de la conversion de la chaleur en énergie mécanique lors du déstockage, devient un allié lors de la phase

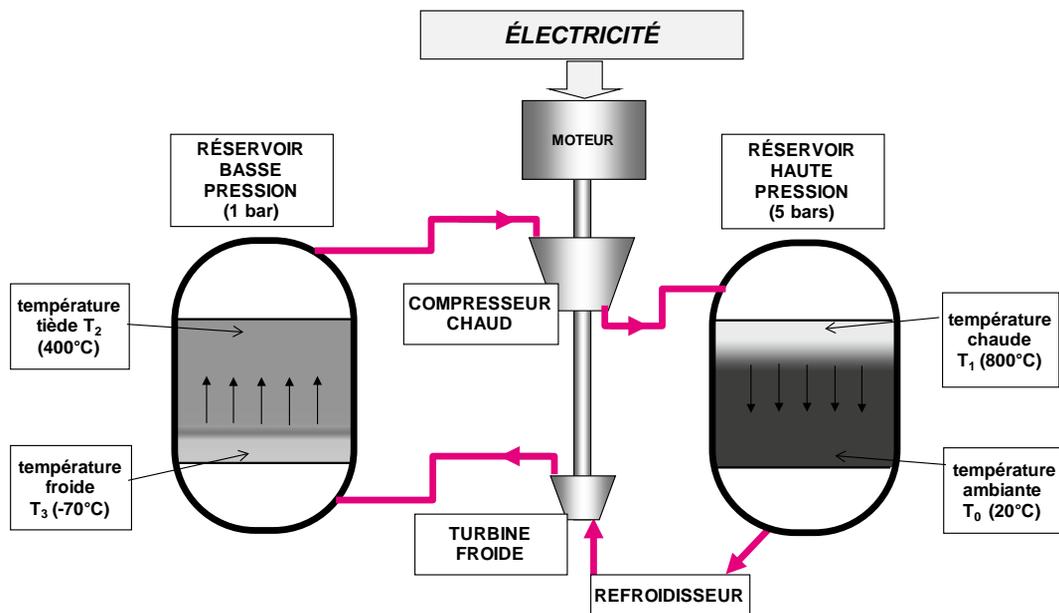


Figure 6 : Schéma de principe du procédé SEPT durant la phase de chargement.

de stockage. Le rendement du stockage pour un cycle complet est ainsi voisin de 70%. La capacité de stockage est de l'ordre de 50 kWh/m³ de réservoirs. Le temps caractéristique du procédé est de plusieurs heures ou dizaines d'heures.

Les turbomachines sont réalisables en utilisant les alliages réfractaires qui étaient déjà employés pour les turbines à combustion construites dans les années 1960 (Inconel). Comme l'argon est un gaz relativement plus lourd que l'air, la conception des machines est simplifiée.

La chaleur peut être stockée dans des céramiques industrielles, mais également dans des matériaux naturels capables de résister à la température souhaitée, tels que les basaltes, gabbros, hématite, magnétite.

Les fuites thermiques par les parois externes, de même que la conduction interne aux lits entre les couches de graviers à des températures différentes, provoquent une certaine auto-décharge. Celle-ci interdit de mettre en œuvre ce procédé pour de petites capacités. Par contre, les pertes par autodécharge sont relativement insignifiantes dans les installations de grandes dimensions.

Le réservoir chaud est pressurisé alors que le réservoir froid est à une pression voisine de la pression atmosphérique. Pour réduire les coûts, on peut construire l'ensemble en plaçant le réservoir froid au-dessus du réservoir chaud. Ce dernier peut aussi être enterré si la géologie locale le permet.

Pour fixer les idées, le tableau 2 résume les caractéristiques potentielles d'un stockage de grande dimension

Un projet de recherche soutenu par l'Agence nationale de la recherche a permis de conforter les bases du procédé [12]. Un projet à venir devrait prochainement permettre la réalisation d'un premier démonstrateur à l'échelle de quelques MWhs.

4. Éléments de coût du stockage d'électricité

Comme toute réalisation industrielle, il est difficile de déterminer un coût exact d'une installation de façon générale, car les conditions varient d'un projet à un autre. On ne peut que se contenter de reprendre des éléments publiés par ailleurs, notamment par l'Electricity

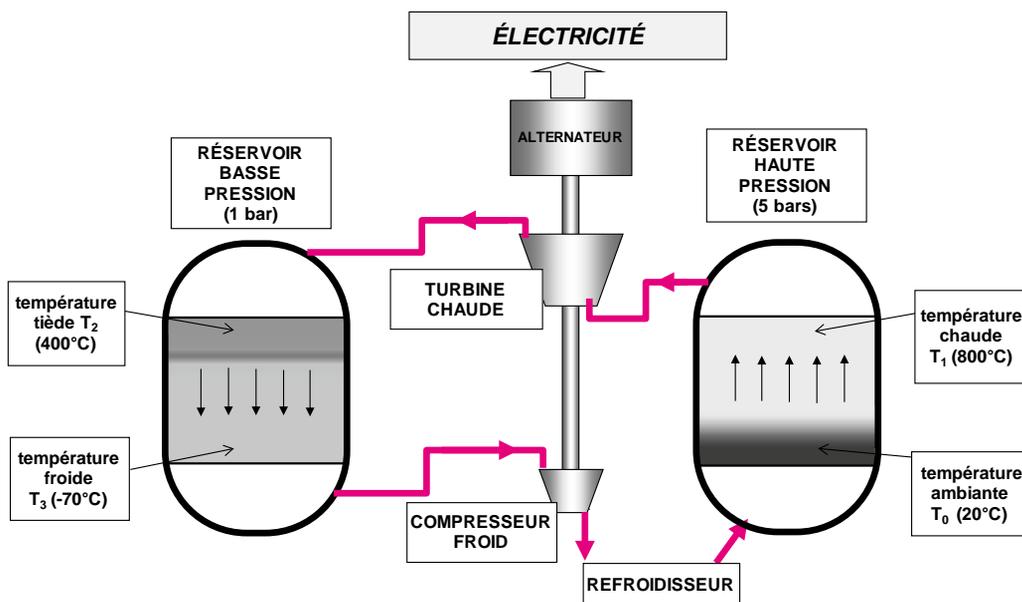


Figure 7 : Schéma de principe du procédé SEPT durant la phase de déstockage.

Storage Association [8]. La figure 8 reproduit l'information correspondante, complétée par nos propres données pour le procédé SEPT.

Dans l'état actuel du marché de l'électricité en France, il est économiquement difficile de justifier le recours à un stockage.

Si l'on considère, en particulier, un modèle d'affaire consistant à stocker l'électricité produite à bas prix lors des heures creuses pour la revendre plus chère au moment des pointes, on se heurte à plusieurs difficultés :

- Le transport de l'énergie sur le réseau devant être payé dans les deux sens, le résultat économique est grevé.
- La différence de prix entre les heures creuses et les heures de pointe ne suffit pas à compenser la perte d'énergie due au rendement du stockage et les frais financiers de l'amortissement du stockage.
- Pour satisfaire les besoins en pointe, l'option consistant à recourir à des turbines à combustion est plus rentable aux prix actuels du gaz naturel et de la taxe carbone.

On peut considérer que le stockage à grande échelle couplé au réseau ne se justifiera qu'à cause du développement des énergies renouvelables.

Installer un stockage d'électricité de grande capacité dans le but, par exemple, de lisser la livraison sur le réseau d'un parc d'éoliennes conduit à prendre en compte les points suivants :

- Comme le rendement du stockage n'est pas unitaire, l'énergie livrée au réseau sera inférieure à celle produite par les éoliennes. Pour une même énergie fournie annuellement, il faut installer plus d'éoliennes.
- Le stockage représente un investissement supplémentaire dont l'amortissement constitue une charge financière.
- Il faut que la différence de valeur entre l'énergie livrée sur le réseau de façon garantie et l'énergie intermittente compense les frais mentionnés plus haut.
- L'installation de stockage peut apporter au réseau des services auxiliaires, tels qu'une réserve tournante, une sécurité de redémarrage du réseau, etc. qui peuvent être valorisés auprès de l'opérateur.

Tableau 2	
Caractéristiques potentielles d'une installation SEPT de grande capacité	
Capacité électrique	10 GWh
Puissance	100 MW
Dimensions de chaque réservoir	diamètre : 65 m – hauteur : 45 m
Pression réservoir chaud	4 bars relatifs
Température maximale réservoir chaud	800°C
Pression réservoir froid	voisine de l'ambiante
Température minimale réservoir froid	-70°C
Masse de graviers de basalte	250 000 t
Rendement	70%
Autodécharge	0,5% par jour

Dans les conditions actuelles en France, il n'est pas encore nécessaire de recourir au stockage.

La situation évoluera dans le futur si la volonté d'augmenter la part d'électricité renouvelable se confirme. Il faudra alors de nombreuses installations de stockage de très grandes capacités. Comme le développement des technologies au niveau requis va réclamer du temps et des étapes intermédiaires, il est nécessaire d'entamer dès maintenant les efforts indispensables. C'est déjà ce qu'on observe en Europe du Nord avec des projets de démonstration ambitieux.

5. Conclusions

L'électricité peut se stocker. Les grandes capacités de stockage couplées au réseau sont actuellement des usines hydroélectriques capables de pomper l'eau en hauteur. Celles-ci ne peuvent être construites que dans des sites convenables.

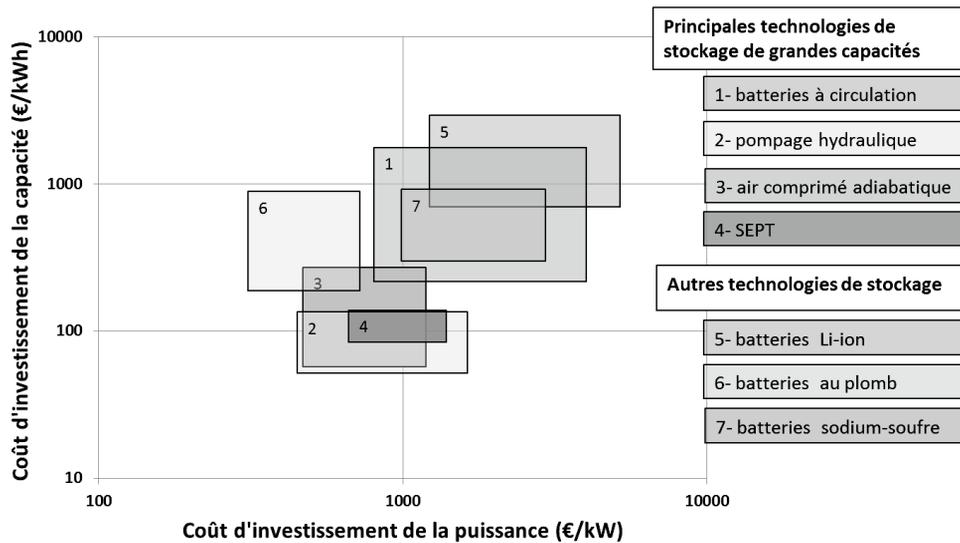


Figure 8 : Coûts de diverses technologies de stockage d'électricité.

Le développement souhaité pour les énergies renouvelables intermittentes va nécessiter de nouvelles capacités de stockage, au-delà de la disponibilité des sites potentiels de pompage en montagne.

De nouvelles technologies de stockage à grande échelle sont en cours de développement, comme par exemple le stockage par air comprimé, les batteries à circulation et le stockage par pompage thermique.

La mise au point de toutes ces solutions va réclamer du temps et des étapes intermédiaires. C'est pourquoi l'on assiste dès maintenant à la naissance de projets qui ont pour but de jaloner le chemin à parcourir. ■

Bibliographie

[1] Site du gouvernement fédéral allemand.
http://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Energiekonzept/_node.html

[2] ENEA-CONSULTING – Le stockage d'énergie, enjeux, solutions techniques et opportunités de valorisation – mars 2012.
<https://www.enea-consulting.com/wp-content/uploads/ENEA-Consulting-Le-Stockage-dEnergie.pdf>

[3] Fraunhofer Institute – *Energiewirtschaftliche und ökologische Bewertung eines Windgas-Angebotes* – février 2011.

http://michaelwenzl.de/wiki/_media/ee:greenpeace_energy_gutachten_windgas_fraunhofer_sterner.pdf

[4] Aménagement de Grand Maison – document EDF.
http://energie.edf.com/fichiers/fckeditor/Commun/En_Direct_Centrales/Hydraulique/Centres/Les_Alpes/publications/documents/FicheamenagementGrandMaison.pdf

[5] *Renaissance for pumped storage in Europe* – Hydroworld.com.
http://www.hydroworld.com/index/article-tools-template/_saveArticle/articles/hydro-review-worldwide/volume-19/issue-3/articles/new-development/renaissance-for-pumped-storage-in-europe.html

[6] Fritz Crotogino (2011) Le stockage d'air comprimé de Huntorf : 20 ans de succès dans l'exploitation, texte traduit disponible sur : http://www.mines-energie.org/Dossiers/Stock2006_13.pdf

[7] RWE – Project ADELE.
<http://www.rwe.com/web/cms/mediablob/en/391748/data/364260/1/rwe-power-ag/innovations/adele/Brochure-ADELE.pdf>

[8] *Electricity storage association web page*.
http://www.electricitystorage.org/technology/storage_technologies/batteries/vanadium_redox_batteries1/

[9] *Flow battery*. http://en.wikipedia.org/wiki/Flow_battery

[10] *Grid energy storage – hydrogen*.
http://en.wikipedia.org/wiki/Grid_energy_storage#Hydrogen

[11] T. Desrues, J. Ruer, P. Marty, J.-F. Fourmigué (2009) "A thermal energy storage process for large scale electric applications", *Journal of Applied Thermal Engineering* doi:10.1016/j.applthermaleng.2009.10.002

[12] ANR – projet SETHER.
http://www.agence-nationale-recherche.fr/fileadmin/user_upload/documents/aap/2008/finances/stocke-2008-resumes.pdf