

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la
Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Énergies renouvelables en mécanique

Thème

**Etude d'une unité de stockage mécanique par bloc à
bétonde l'énergie renouvelable**

Devant le jury composé de:

..... Président
..... Examineur
..... Examineur
Khechana mohammed Encadreur

Présenté par:

- Matoug ayoub
- Matoug ali
- Ben omor salah
- Hamidatou akram

2021-2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

DEDICACE

Je dédie ce travail à :

Ce qui sont les chers au monde, mes parents, pour leurs soutien inconditionnel

le long de ces années d'étude.

- A toute ma famille.
- A tous mes amis.

REMERCIEMENT

Je remercie avant tout ALLAH, le tout puissant, de m'avoir donné la volonté et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Je remercie sincèrement et mon profonde gratitude et reconnaissance envers mon encadreur Mr., La confiance qui m'a fait.

Pour son encouragement continue, pour le suivi de près de mon travail, pour ses conseils judicieux, et ses observations pendant la période de la réalisation de ce mémoire.

Je remercie tous les enseignants du département sciences de la technologie, en particulier les enseignants de la mécanique de l'université de EL oued

Je remercie aussi tous les membres de jury qui ont accepté de participer à la valorisation de ce travail.

Et enfin nous remercions tous les collègues de la promotion 2021/2022.

Table des matières

Dédicaces	
Remerciements	
Table des figures	
Liste des tableaux	
Liste des Symboles	
Introduction générale	1
Chapitre I	
Etude bibliographique sur les systèmes de stockage des énergies	
I.1 Introduction	3
I.2 Energies renouvelables définitions, ressources et exploitation	3
I.2.1 Le solaire thermique et photovoltaïque	4
I.2.2 La géothermie	4
I.2.3 La biomasse	5
I.2.4 L'hydraulique	5
I.2.5 L'éolien	6
I.3 Définitions de Stockage de l'énergie	6
I.4 Technologies des systèmes de stockage de l'énergie électrique	7
I.4.1 Stockage hydraulique gravitaire (STEP1)	8
I.4.1.1 Avantages et inconvénients de stockage par STEP : [7] Avantages :	10
I.4.2 Stockage hydropneumatique	10
I.4.3 Stockage par air comprimé en caverne hybridé par turbine à gaz (CAES)	12
I.4.3.1 Le principe du CAES:	13
I.4.4 Stockage par air comprimé en caverne adiabatique (ACAES)	14

I.4.5 Stockage via l'hydrogène	14
I.4.5.1 Avantages du stockage d'hydrogène solide :	16
I.5 Conclusion	17
Chapitre II	
Etude des systèmes de stockage des énergies par blocs de bétons	
II.1 Introduction	19
II.2 Stocker les énergies renouvelables à l'aide de blocs de béton.	19
II.3 Une tour de blocs de béton pour stocker l'électricité	20
II.4 Des tours pouvant stocker jusqu'à 35 MWh	21
II.5 Un coût du stockage réduit de moitié selon Energy Vault	22
II.6 Classification des technologies de stockage d'énergie mécanique:	23
II.7. Critères de choix :	23
II.8 Comparaison et choix des technologies de stockage	26
II.9 Les verrous technologiques ou les besoins en R&D:	27
II.9.1 STEP	27
II.9.2 CAES	27
II.10 Stockage en "STEP, CAES, Volants D'inertie" : (application et maturité et perspectives de développement).	28
II.10.1 Station de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP) :	28
II.10.2 Stockage d'énergie par air comprimé (CAES)	28
II.10.3 Volant d'inertie:	31
II.11 Avantages et inconvénients en général:	32
II.12 Conclusion:	34
Chapitre III	
Etude d'un système de stockage par blocs de béton de puissance domestique	
III.1 Introduction	36
III.2 Définition	36

III.3 Calcul d'un système de stockage par tours à béton	36
III.4 Calcul d'énergie (mgh/ en joule ou N.M ou W.S " (10KWh)	37
III.5 Conclusion	39
Conclusion générale	42
Références bibliographiques	

Table des figures

	FIGURE	PAGE
Figure 01	Schéma du principe d'une STEP en cycle fermé, source B. Multon d'après	8
Figure 02	La STEP de Revin dans les Ardennes, réservoirs de 7 millions de m ³ , dénivelé 230 m (puissance jusqu'à 800 MWh), source.	9
Figure 03	Schéma du principe d'un système de stockage hydropneumatique à circuit d'air fermé, source B. Multon	11
Figure 04	Schéma du principe d'un CAES, source B. Multon d'après	12
Figure 05	CAES de Huntorf (Allemagne), source	13
Figure 06	Schéma du principe d'un CAES, source B. Multon d'après	14
Figure 07	Schéma de principe du stockage par hydrogène avec valorisations éventuelles directes de l'hydrogène et des pertes de chaleur, source B. Multon	15
Figure 08	Mise en contexte du système dans un parc éolien. Les blocs de béton utilisés sont issus de la récupération de déchets de construction. Crédits : Energy Vault	20
Figure 09	Lorsque de l'électricité doit être injectée sur le réseau, la grue redescend des blocs de béton à une vitesse d'environ 2,9 m/s	21
Figure 10	Energy Vault a signé un contrat avec le cimentier Cemex pour mettre au point des types de béton à empreinte carbone réduite	22
Figure 11	Classification des technologies de stockage d'énergie mécanique	23
Figure 12	Domaines d'applications des différentes techniques de stockage	26
Figure 13	schéma conceptuel de Station de Transfert d'Énergie par Pompage	28
Figure 14	schéma conceptuel de Stockage d'énergie d'air comprimé	30
Figure 15	Schéma conceptuel de Volant d'inertie	32
Figure 16	Energy Vault a signé un contrat avec le cimentier Cemex pour mettre au point des types de béton à empreinte carbone réduite	36
Figure 17	les changements masse (kg) sur le plan de Energie mgh en Joule ou N.m ou w.s	38
Figure 18	les changements hauteur (m) sur le plan de Energie mgh en Joule ou N.m ou w.s	38

Liste des tableaux

	TABLEAU	PAGE
Tableau 01	Quelques exemples de STEP de plus de 1 000 MW en turbinage, source	9
Tableau 02	Quelques exemples de STEP en cours de construction, source	10
Tableau 03	comparatif des technologies de stockage (IFPEN/ENEA)	26
Tableau 04	avantages et inconvénients du stockage d'énergie dans un système mécanique	32
Tableau 05	les changements de stockage d'énergie en termes de masse, de hauteur et de nombre de blocs de béton	38

Liste des Symboles

E	L'énergie potentielle de pesanteur, (joule).
M	La masse, (kg)
G	La gravité, (m/s)
H	L'altitude, (m)
EC	L'énergie cinétique, (joule)
Ω	La vitesse de rotation, (rad/s)
T	temps, (s).

Introduction générale

Introduction générale:

La disponibilité et la production d'énergies renouvelables est une question qui mérite attention. Elle nécessite principalement la mise à disposition de systèmes de stockage d'énergie. Ces systèmes diffèrent sous différentes formes, notamment : chimique, thermique, ainsi que mécanique, et cela est lié au sujet de notre étude.

Le stockage est nécessaire pour utiliser efficacement les sources d'énergie renouvelables

« propres » lorsqu'elles sont intermittentes (comme le vent, la cascade, les courants de marée, etc.), et les études cherchent à s'assurer que le stockage répond à cette demande d'électricité, car il existe de nombreuses technologies de stockage. , nous étudierons l'efficacité de l'un d'entre eux en termes de capacité de production et d'applicabilité.

Le but de toute cette étude est de connaître les mécanismes et les systèmes modernes qui permettent de bien stocker l'énergie et à moindre coût.

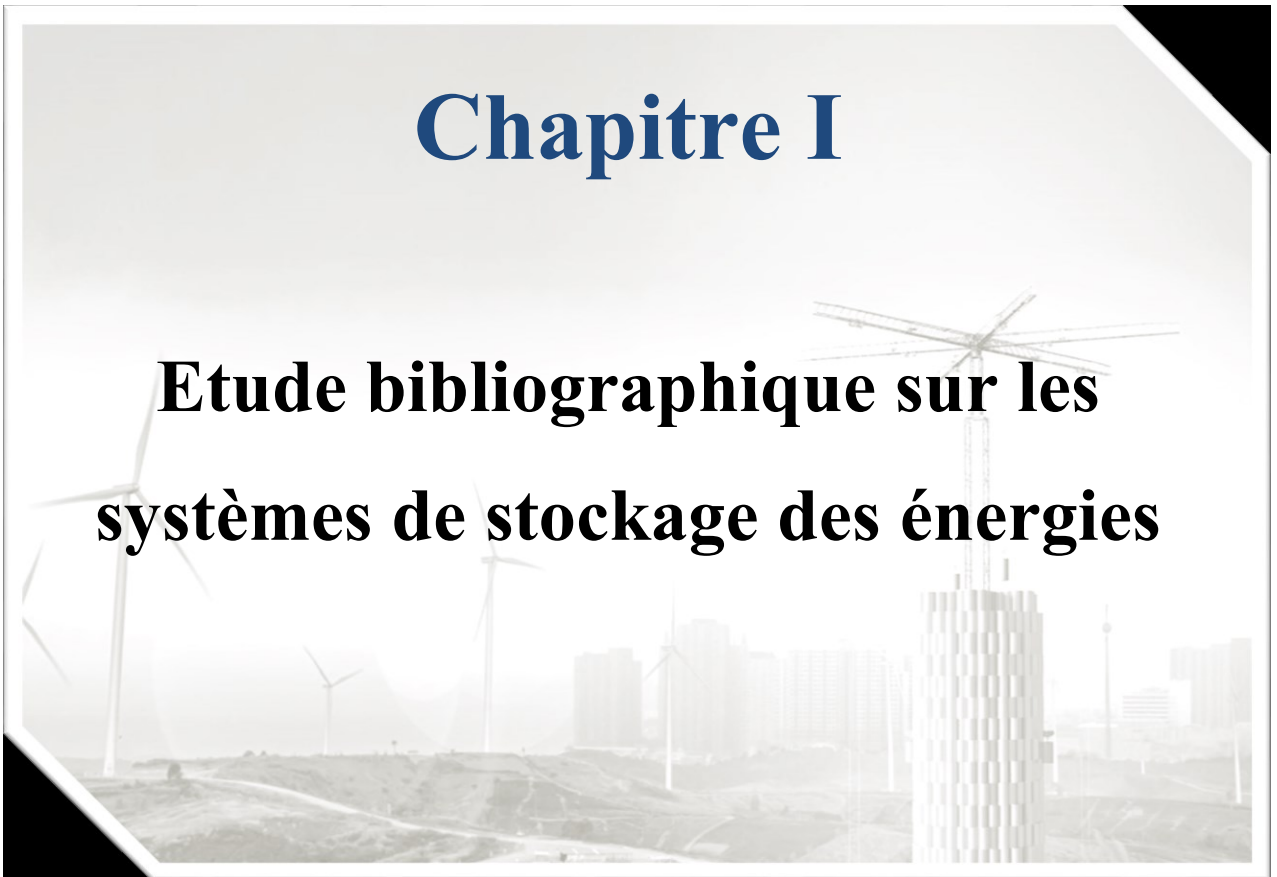
Dans le premier chapitre, nous aborderons les généralités sur les systèmes de stockage d'énergie, qui sont représentés dans le stockage du côté mécanique. Nous avons évoqué leurs types, l'histoire de leur développement et leur principe de fonctionnement. Nous avons également évoqué leurs avantages et inconvénients en général.

Dans le deuxième chapitre, nous étudierons les classifications et les critères de ces systèmes de stockage, (Station de Transfert d'Énergie par Pompage, Compressed Air Energy Storage, Volants D'inertie) et nous terminons le chapitre en choisissant l'un des systèmes pour notre étude empirique sur celui-ci Les troisième.

En fin, on terminera par une conclusion générale discutant les résultats obtenus par les différentes méthodes.

Chapitre I

Etude bibliographique sur les systèmes de stockage des énergies



I.1 Introduction

Le stockage de l'énergie consiste à mettre en réserve une quantité d'énergie provenant d'une source pour une utilisation ultérieure. Il est nécessaire pour valoriser avec efficacité les énergies renouvelables et propres lorsqu'elles sont intermittentes, telles que l'énergie éolienne et l'énergie solaire. Stocker de la chaleur ou de l'électricité permet ainsi de stabiliser les réseaux énergétiques et de lisser les irrégularités de production/consommation dans le contexte de développement des énergies renouvelables, particulièrement sur les sites insulaires ou isolés.

I.2 Energies renouvelables définitions, ressources et exploitation

Une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future.

C'est le cas de l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau de la terre de la biomasse, à l'échelle de la durée de vie de l'humanité, ce n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires [1].

L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas nouvelle, elles ont été exploitées par l'homme depuis l'aube de l'humanité, bois de feu, traction animale, bateau à voile, moulin à vent ...

Malheureusement, ces énergies furent délaissées au profit d'autres sources d'énergies que l'on pensait à l'époque plus intéressantes.

Ce n'est que dernièrement, suite à la pollution atmosphérique, le réchauffement climatique dû à l'effet de serre, les risques du nucléaire et les limites des ressources (pétrole, gaz, charbon et uranium) qu'il y a eu prise de conscience qu'un développement économique respectueux de l'environnement est absolument nécessaire.

Les énergies dites renouvelables et propres constituent une alternative aux énergies fossiles sur plusieurs points :

- ❖ Elles respectent l'environnement (sont propres) ne dégagent pas de gaz à effet de serre, ni de déchets toxiques.
- ❖ Elles sont comme leurs noms l'indiquent « inépuisables ».
- ❖ Elles permettent une production décentralisée adaptée aux besoins locaux. Parmi les énergies renouvelables nous citons :

L'éolien, le solaire thermique et photovoltaïque, la biomasse, la géothermie, l'hydraulique.

I.2.1 Le solaire thermique et photovoltaïque

L'énergie solaire est l'une des ressources renouvelables les plus abondantes sur terre, le flux d'énergie solaire reçu annuellement sur la surface de la terre représente environ 15000 fois la consommation d'énergie [2].

L'énergie solaire est actuellement exploitée selon deux techniques :

- ❖ La conversion du rayonnement solaire en chaleur par des capteurs thermiques c'est le solaire thermique

Il est utilisé dans les chauffe-eau solaires qui sont très répandus en Europe, plus de 600.00 familles ont en équipé leurs habitations. Il est aussi utilisé dans les planchers Thermiques.

- ❖ La conversion directe du rayonnement lumineux en électricité par des capteurs (cellule photovoltaïque) c'est le solaire photovoltaïque.

Les panneaux photovoltaïques composés de cellules à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons.

La technique photovoltaïque est en très forte croissance, en 2001 on comptait en Europe environ 250 MW installés et en 2003 ce chiffre est monté à 560 MW.

La production d'électricité par générateur photovoltaïque est liée à l'intensité, la durée de l'ensoleillement et à l'orientation du panneau par rapport au soleil.

I.2.2 La géothermie

La géothermie consiste à capter la chaleur de la croûte terrestre pour produire du chauffage ou de l'électricité.

Le sous-sol est naturellement chaud surtout à grande profondeur, plus on s'enfonce dans les entrailles de la terre, plus les températures augmentent, 3à4°C tous les 100m, cette eau chaude est utilisée pour le chauffage des maisons et autres immeubles [2].

L'exploitation des eaux souterraines et le développement des pompes à chaleurs pourraient faire de la géothermie une des grandes énergies durables de demain.

Le principe de la pompe à chaleur est le suivant un capteur prélève de la chaleur du sol à l'extérieur par exemple sous une pelouse, son origine se trouve d'ailleurs dans le rayonnement solaire, cette chaleur est transmise dans la maison via un plancher chauffant, dans tous les cas le transfert de la chaleur nécessite un fluide caloporteur.

La géothermie s'est développée au 20ème siècle dans de nombreux pays pour la production d'électricité, avec des eaux de très hautes températures transformées en Vapeur à

titre d'exemple citons la centrale bouillante en GUADLOUPE Française.

Situation actuelle : une vingtaine de pays produisent de l'électricité à partir de la géothermie.

Dans le monde entier, la capacité de production des installations géothermiques dans 18 pays était d'environ 5800 MW en 1990, elle atteint aujourd'hui les 8700 MW. La géothermie joue un rôle essentiel pour les pays en développement : 22% de l'électricité produite aux philippines, 12% au Salvador 15% en Islande.

Le Japon est le premier producteur mondial d'équipement géothermique.

I.2.3 La biomasse

Le terme biomasse désigne au sens large l'ensemble de la matière vivante.

Depuis le premier choc pétrolier, ce concept s'applique aux produits organiques végétaux utilisés à des fins énergétiques.

La biomasse désigne donc l'ensemble des végétaux capables par le biais de diverses transformations, de restituer l'énergie solaire qu'ils ont stockés, cette énergie solaire est convertie en différentes sources énergétiques tel que :

❖ Chaleur et électricité

Cette énergie est produite par le bois et déchets agricoles (paille), déchets urbains ordures ménagères et déchet industriels du secteur agroalimentaire.

Ces déchets subissent des transformations thermochimiques (combustion, pyrolyse, gazéification) permettant principalement de créer de la chaleur et de l'électricité.

❖ Biocarburant

Carburant bioéthanol : l'amidon et le glucose extraits des cultures sucrières (betterave, canne à sucre) et céréalières (blé, maïs) produisent de l'éthanol par procédé de fermentation alcooliques.

Carburants bio gazole : il comprend les végétaux riches en huile (colza, tournesol et soja) l'huile extraite de leurs graines permet de produire du bio gazole qui peut remplacer le gazole actuel pour moteur diesel.

I.2.4 L'hydraulique

L'hydraulique première des énergies renouvelables au monde, se distingue par sa souplesse d'utilisation, ses atouts écologiques et économiques.

Comme les ancestrales roues entraînées par le débit d'un cours d'eau, les turbines des centrales hydrauliques sont activées par la force de l'eau passant d'un niveau supérieur à un niveau inférieur. Plus la hauteur de la chute d'eau et le débit sont importants plus la puissance électrique développée sera élevée.

Chaque ouvrage hydraulique est donc adapté à la typologie des lieux pour atteindre un rendement optimal. [1].

Notons aussi dans le domaine de l'énergie hydraulique, les ressources marémotrices de la houle et celles des courants marins qui sont très importants, de nombreux travaux dans le monde ont montré la faisabilité de l'exploitation des ressources de la houle. La plus grande usine marémotrice au monde se trouve en France (la Rance) avec une puissance de 240 MW

Le développement attendu de l'énergie éolienne offshore pourrait être avantageusement couplé à une production par les vagues où l'on pourrait mettre en commun les coûteuses infrastructures de génie civil.

I.2.5 L'éolien

Parmi toutes les énergies renouvelables l'éolien est l'une des plus prometteuses, l'évolution technologique (augmentation de la taille et de la puissance des installations, optimisation des matériaux) alliée à la baisse continue des coûts de production (effet de série) font actuellement de l'éolien l'une des énergies renouvelables les plus compétitives.

Pour toutes ces raisons l'énergie issue du vent fait déjà partie intégrante du paysage et la tendance s'annonce irréversible.

I.3 Définitions de Stockage de l'énergie

Pour la production d'énergie, le stockage est essentiel : en réalité, ce qu'on appelle couramment et économiquement « production d'énergie » est :

soit la transformation d'un stock d'énergie potentielle (combustible fossile, eau stockée en hauteur, matière fissile...) en une énergie directement utilisable pour un travail (électricité, travail mécanique) ou un usage thermique ;

soit la transformation directe de flux d'énergie naturels, sur lesquels l'humain n'a aucun contrôle. Ainsi des énergies renouvelables, issues pour la plupart, directement ou indirectement (vent, hydraulique, biomasse, etc.), du rayonnement solaire. Leur production irrégulière rend souvent nécessaire un stockage permettant de pallier les irrégularités de production.

La nature stocke naturellement de l'énergie, par exemple avec la biomasse « neuve » (non fossile), le cycle climatique de la Terre (pluie, neige...), les marées... Certains stockages naturels n'ont lieu qu'à l'échelle des temps géologiques (formation du charbon, du pétrole et du gaz) ou résultent de phénomènes stellaires (nucléosynthèse des éléments radioactifs). Aujourd'hui, les stocks de combustibles fossiles s'épuisent, leur renouvellement étant infinitésimal à l'échelle de temps de la vie humaine, raison pour laquelle ces ressources sont considérées comme non renouvelables.

Les méthodes de stockage dépendent du type d'énergie. Les énergies fossiles (charbon, gaz, pétrole), sous forme de réservoirs à l'état naturel, ces derniers remplissent naturellement la fonction de réservoirs. Une fois extrait, il peut être facilement isolé, hébergé et techniquement transporté [3].

I.4 Technologies des systèmes de stockage de l'énergie électrique

L'énergie électrique permet une conversion [4] de toutes les ressources primaires fossiles et renouvelables, et l'accès à tous les services, en premier lieu les plus indispensables, c'est la raison pour laquelle son taux de pénétration progresse et que l'on évoque de plus en plus fréquemment une généralisation de l'électrification à l'ensemble du secteur énergétique. La nécessité de baisse des émissions de gaz à effet de serre, et donc de diminution de la consommation de ressources fossiles, requiert une augmentation drastique de l'utilisation des ressources primaires renouvelables, comme le photovoltaïque ou l'éolien, sources variables et incertaines, mais de très loin les plus disponibles. Dans ce contexte, le stockage de l'énergie électrique apparaît donc indispensable pour obtenir une alimentation en électricité plus sûre et plus robuste.

L'énergie électrique se stocke rarement directement [5], mais se convertit aisément en d'autres formes (potentielle gravitaire, cinétique, chimique...) elles-mêmes parfaitement stockables. Les excellents rendements de conversion dans les deux sens de transformation, aussi bien lors de la charge que de la décharge, permettent de la restituer, dans la plupart des cas, sans limite thermodynamique majeure. En effet si les transformations ne sont pas trop rapides ni excessivement lentes, les pertes énergétiques peuvent être suffisamment faibles pour considérer un stockage à haut niveau de réversibilité.

I .4.1 Stockage hydraulique gravitaire (STEP1)

Les Stations de Transfert d'Énergie par Pompage [6] sont des installations constituées de réservoirs d'eau positionnés à des altitudes différentes et d'un dispositif de pompage réversible permettant le transfert de masses d'eau entre ces réservoirs, et ainsi d'exploiter de façon réversible leur énergie potentielle (figure 1). L'énergie stockée s'exprime par :

$$E = MgH$$

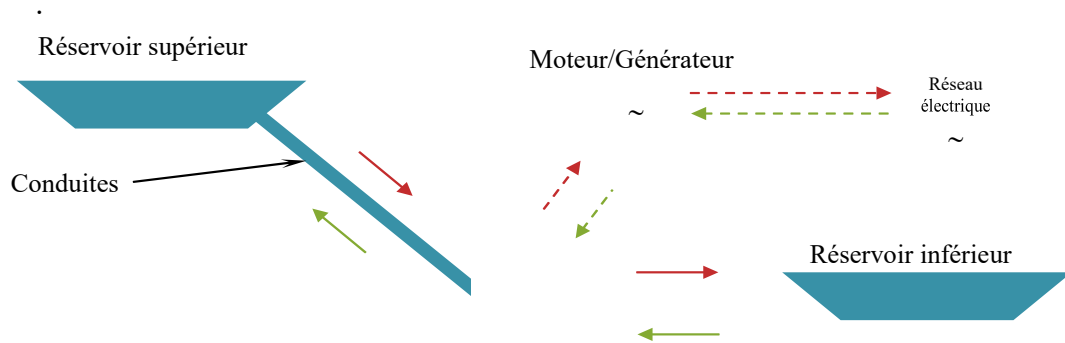


Figure 01 : Schéma du principe d'une STEP en cycle fermé, source B. Multon d'après [7]

Le schéma figure 1 correspond à une STEP en cycle fermé, or dans de nombreux cas des apports naturels d'eau entraînent des architectures en cycle semi-ouverts (apports dans un des réservoirs) ou en cycle ouvert (apports dans les deux réservoirs).

Il s'agit de la technologie de stockage de masse de l'énergie électrique, de très loin, la plus répandue dans le monde (plus de 150 GW de puissance installée). Son coût d'investissement, ramené à la capacité, est parmi les plus bas et sa durée de vie très longue. Cependant, les contraintes environnementales et sociales entravent souvent les nouvelles constructions, ce qui limite leur développement. Mais il reste envisageable de transformer des usines hydroélectriques existantes, équipées de barrage (réservoir haut) et auxquelles il resterait à adjoindre un réservoir de plus faible capacité au niveau inférieur (on disposerait alors d'une puissance élevée et la seule restriction serait une asymétrie de capacité énergétique lors de la recharge). Compte tenu de cette possibilité d'aménagement de barrages existants, le potentiel technique européen, de la capacité de stockage permise par les STEP, a été évalué à plus de 80 TWh [8].



Figure 02 : La STEP de Revin dans les Ardennes, réservoirs de 7 millions de m³, dénivelé 230 m (puissance jusqu'à 800 MWh), source [11]

Parmi les STEP modernes en cours de construction, on peut citer celle de Nant de Drance [12] en Suisse (conçue et réalisée par Alstom, devenu GE entre temps) qui devrait être mise très prochainement en service. Elle comporte 6 pompes-turbines de type Francis de 150 MW à vitesse variable (machines asynchrones à double alimentation avec une plage de +/- 7% autour de la vitesse de synchronisme) et totalise donc une puissance symétrique en pompage et turbinage de 900 MW pour un rendement sur cycle attendu de plus de 80%.

Tableau 01 : Quelques exemples de STEP de plus de 1 000 MW en turbinage, source [6]

Centrales	Pays	Hauteur chute d'eau [m]	Puissance de pompage [MW]	Puissance de turbinage [MW]	Année de mise en service
Ludington	États-Unis	113		1 872	1973
Vianden	Luxembourg	266 à 291	850	1 096	1976
Dinorwig	Royaume-Uni	?	1 650	1 728	1984
Grand Maison	France	822 à 955	1 160	1 790	1987
Guangzhou	Chine	? à 535	?	2 400	2000
Goldisthal	Allemagne	302	≈ 1 000	1 060	2003
Bath County	États-Unis	353 à 403	2 876	3 000	2004

Tableau 02 : Quelques exemples de STEP en cours de construction, source [13]

Centrales	Pays	hauteur chute d'eau [m]	Puissance [MW]	Achèvement prévu
Houanggou	Chine	434	1 800	2019
Upper Cisokan	Indonésie	276	1 040	2019
Fengning	Chine		3 600	2019-2021
Dniester	Ukraine	135	2 268	2019-?
Kaniv	Ukraine		1 000	2020
Tehri	Inde		1 000	2020

I.4.1.1 Avantages et inconvénients de stockage par STEP : [7]

Avantages :

- ❖ Sécurisation du réseau électrique
- ❖ Technologie simple et éprouvée (turbine / pompe / barrage hydroélectrique)
- ❖ Optimisation de la production d'énergie : stockage de l'énergie produite en surplus

Inconvénients :

- ❖ Impact possible sur le paysage et l'hydrologie
- ❖ Le cycle de pompage / turbinage engendre des pertes d'énergie allant de 15% à 30%.

I.4.2 Stockage hydropneumatique

Le stockage hydropneumatique consiste à mettre sous pression un gaz (air ou azote) dans un réservoir par l'intermédiaire d'un compresseur électrique [14], mais si de nombreuses réalisations, proches de la maturité industrielle, ont été testées, force est de constater que cette famille technologique n'a pas encore émergé. La compression d'un gaz (ici, durant la charge) a tendance à produire beaucoup de chaleur, et sa détente (en phase de décharge) du froid. Pour obtenir un rendement élevé, un fluide intermédiaire (huile ou eau) est préférable (système hydro-pneumatique), les phases de compression et détente peuvent être alors quasi isothermes. Les accumulateurs à haute pression et les motopompes sont des technologies matures dans les utilisations directes de l'énergie hydraulique. Leur transposition à des applications électriques est plus récente. Une solution pour obtenir un bon rendement sur toute la plage de pression de fonctionnement est étudiée et consiste à hybrider ces systèmes avec des super-condensateurs

ou un volant d'inertie pour assurer les variations rapides de puissance.

Pour les systèmes à cycle fermé, la masse d'air est constante, et l'énergie volumique relativement faible, environ 300 kWh/m³ avec des réservoirs sous 300 bars. Les rendements sur cycle peuvent atteindre 75%, les puissances envisagées, pour des constantes de temps de l'ordre de l'heure à quelques heures, sont comprises entre 100 kW et 1MW (figure 3).

Pour les systèmes à cycle d'air ouvert, la masse d'air varie, les transformations isothermes sont réalisées par des échangeurs de chaleur intégrés. Les pressions de travail vont de 100 à 300 bars, l'énergie volumique des réservoirs varie de 40 à 60 kWh/m³ pour des pressions maximales de 250 à 350 bars. Les rendements sur cycle sont alors de l'ordre de 60%, et les valeurs de puissance envisagées, pour des constantes de temps plus flexibles de quelques minutes à quelques jours, sont comprises entre 5 et 500 kW.

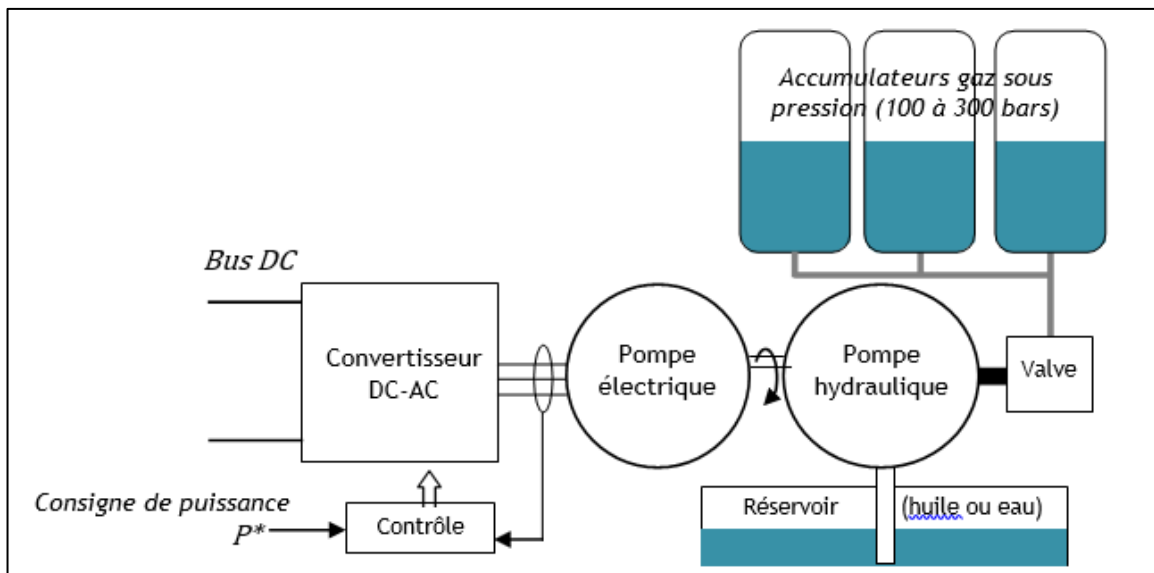


Figure 03 : Schéma du principe d'un système de stockage hydropneumatique à circuit d'air fermé, source B. Multon

Dans les applications stationnaires, cette technologie semble constituer une solution intéressante au regard de son coût d'investissement relativement bas et son potentiel de bonne tenue à la fatigue en cyclage. Elle présente également l'avantage de composants plus aisément recyclables que dans le cas des technologies électrochimiques. Mais il lui reste à faire ses preuves avec des produits industrialisés et au niveau de performances annoncé.

I.4.3 Stockage par air comprimé en caverne hybridé par turbine à gaz (CAES)

Dans cette technologie de stockage de masse, peu répandue (deux grandes installations au monde : en Allemagne et aux USA), le cycle de fonctionnement consiste à utiliser de l'énergie électrique bon marché (disponible en heures creuses) pour comprimer de l'air, via un compresseur électrique de grande puissance, au sein de cavernes profondes (anciennes mines de sel). Lors de la décharge (déstockage), la détente de l'air vient alimenter le compresseur d'une turbine à gaz dans laquelle du gaz naturel est brûlé au moment où la demande électrique est forte (heures de pointe). En réalité, il s'agit donc plutôt d'une turbine à gaz (TAG) hybridée par un stockage pneumatique. L'utilisation d'air comprimé lors de la détente permet en effet d'améliorer le rendement de la turbine qui habituellement consomme une partie importante de sa puissance mécanique pour entraîner son compresseur. Ce système, loin d'être un dispositif de stockage réversible, permettait de trouver une place dans un modèle économique particulier. Mais il n'y a eu aucune nouvelle réalisation depuis le début du siècle en cours et il est peu probable que cela change.

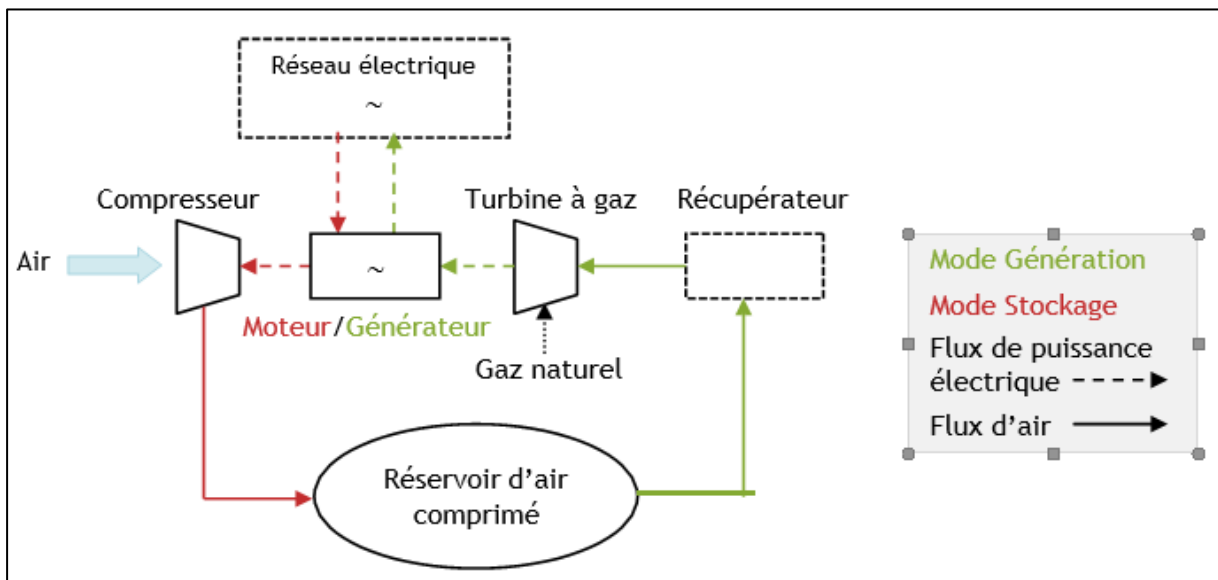


Figure 04 : Schéma du principe d'un CAES, source B. Multon d'après [7]

Compte tenu de ce fonctionnement très particulier, le rendement est très médiocre. Pour produire 1 kWh_e il faut un apport de 1,6 kWh_{th} de gaz et 0,7 kWh_e (alimentation du compresseur en phase de stockage). Le rendement global est de 43% (1/2,3) en incluant la

consommation de gaz (sans air comprimé, le rendement de la TAG vaut environ 27%). On a donc juste amélioré le rendement de la turbine à gaz de 27 à 43% tout en exploitant les écarts tarifaires de l'électricité en fonction du temps.

La plus ancienne installation (Huntorf en Allemagne, figure 7) stocke de l'air à 70 bars dans deux cavernes, creusées dans des couches salines, de 310 000 m³. La puissance électrique vaut 290 MW sur une durée de fonctionnement de 2 à 3 heures. La compression est réalisée avec une puissance de 60 MW en 12 h maximum [15].



Figure 05 : CAES de Huntorf (Allemagne), source [16]

I.4.3.1 Le principe du CAES:

Le principe du CAES est de stocker l'air comprimé et ainsi de séparer la phase de compression de l'air du reste du processus. A cet effet, un système de stockage de ce type est intercalé entre le compresseur et la chambre de combustion. En phase de stockage, le compresseur utilise l'énergie disponible sur le réseau électrique pour comprimer l'air. Cet air comprimé est ensuite transporté puis stocké dans un récipient adapté. En phase de déchargement, l'air comprimé est prélevé de son réservoir et envoyé dans la chambre de combustion précédant la turbine. L'énergie produite est finalement restituée ou vendue au réseau.

I.4.4 Stockage par air comprimé en caverne adiabatique (ACAES)

Cette technologie est une amélioration de la technologie CAES dont l'objectif est d'améliorer la réversibilité du système de stockage, cette fois sans apport de gaz naturel. En effet la chaleur due à la compression de l'air est stockée lors de la phase de charge. À la détente (phase de détente), l'air est réchauffé permettant d'utiliser une turbine à air pour restituer l'électricité avec un rendement correct et sans émissions directes. La majeure partie de l'énergie dissipée cependant la compression est ainsi préservée. Le projet européen ADELE (porté par RWE) consistait à réaliser un démonstrateur dont les caractéristiques, prévues à terme, étaient de 1000 MWh et 200 MW. Le rendement sur cycle attendu était de 70% grâce au stockage thermique dans des matériaux solides. La mise en service était prévue pour 2016, mais le projet a été abandonné pour des raisons économiques. Parallèlement, un autre projet, aux caractéristiques proches, est porté par le développeur éolien Gaelectric pour une installation en Irlande du Nord, mais il semble que cette technologie de stockage à grande échelle peine à émerger.

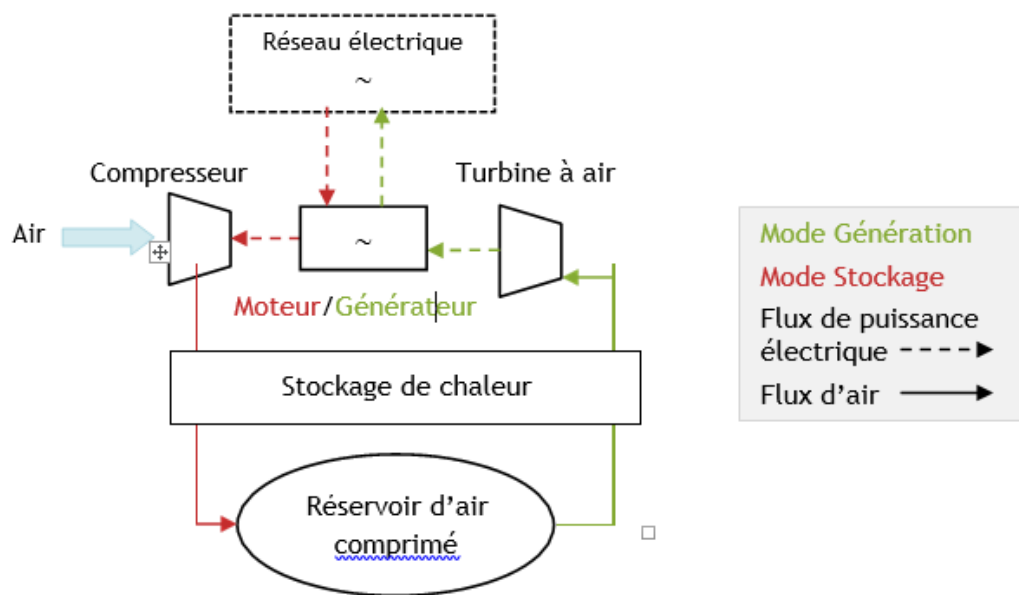


Figure 06 : Schéma du principe d'un CAES, source B. Multon d'après [7]

I.4.5 Stockage via l'hydrogène

Le stockage d'électricité via l'hydrogène consiste à associer un électrolyseur pour convertir l'électricité en hydrogène, un dispositif de stockage d'hydrogène et une pile à combustible pour la conversion en électricité de l'hydrogène et de l'oxygène récupéré lors de

l'électrolyse ou pris dans l'air (figure 7). Les tensions appliquées par cellule de l'électrolyseur sont de l'ordre de 2 V, ce qui est supérieur à la tension théorique réversible de 1,23 V, le rendement théorique d'électrolyse est donc de l'ordre de 62%. Le procédé alcalin est le plus mature, cependant le procédé PEM8, bien que plus coûteux (catalyseurs en platinoïdes), tend à se généraliser. En effet, aucun électrolyte circulant n'est nécessaire, le système en est simplifié, l'hydrogène est directement produit à haute pression (plusieurs centaines de bar). Le rendement s'élève alors de 70 à 80% pour une densité de 1 A/cm².

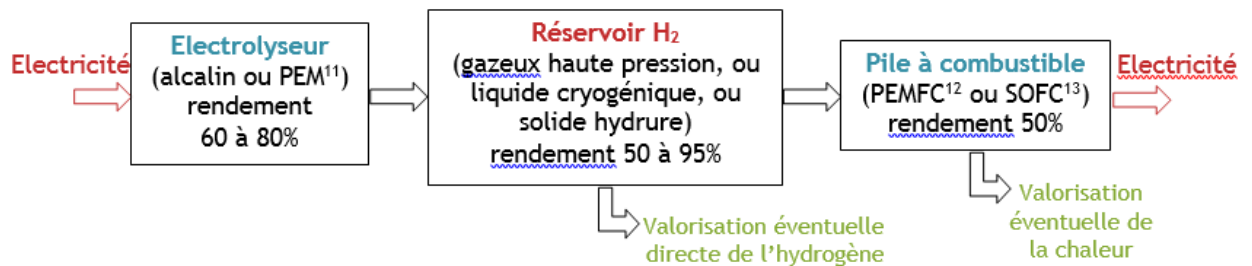


Figure 07 : Schéma de principe du stockage par hydrogène avec valorisations éventuelles directes de l'hydrogène et des pertes de chaleur, source B. Multon

Le stockage de l'hydrogène peut s'effectuer sous formes :

- gazeuse sous pression (jusqu'à 700 bars selon les contraintes d'encombrement), la compression consomme alors environ 15% de la valeur énergétique de l'hydrogène et défavorise le rendement global ;
- liquide cryogénique (20 K), la liquéfaction consomme 20% de la valeur énergétique de l'hydrogène, impacte également le rendement global et une partie de l'hydrogène s'évapore naturellement compte tenu de l'impossibilité d'isoler parfaitement du point de vue thermique ;
- solide dans les hydrures métalliques, peut se faire aux conditions normales de température et de pression. Les performances massiques permettent des applications stationnaires. La chaleur générée au stockage, environ 20% de la valeur énergétique, peut être restituée lors de la phase de déstockage par couplage du réservoir à hydrures avec des matériaux aptes à stocker la chaleur.

I.4.5.1 Avantages du stockage d'hydrogène solide :

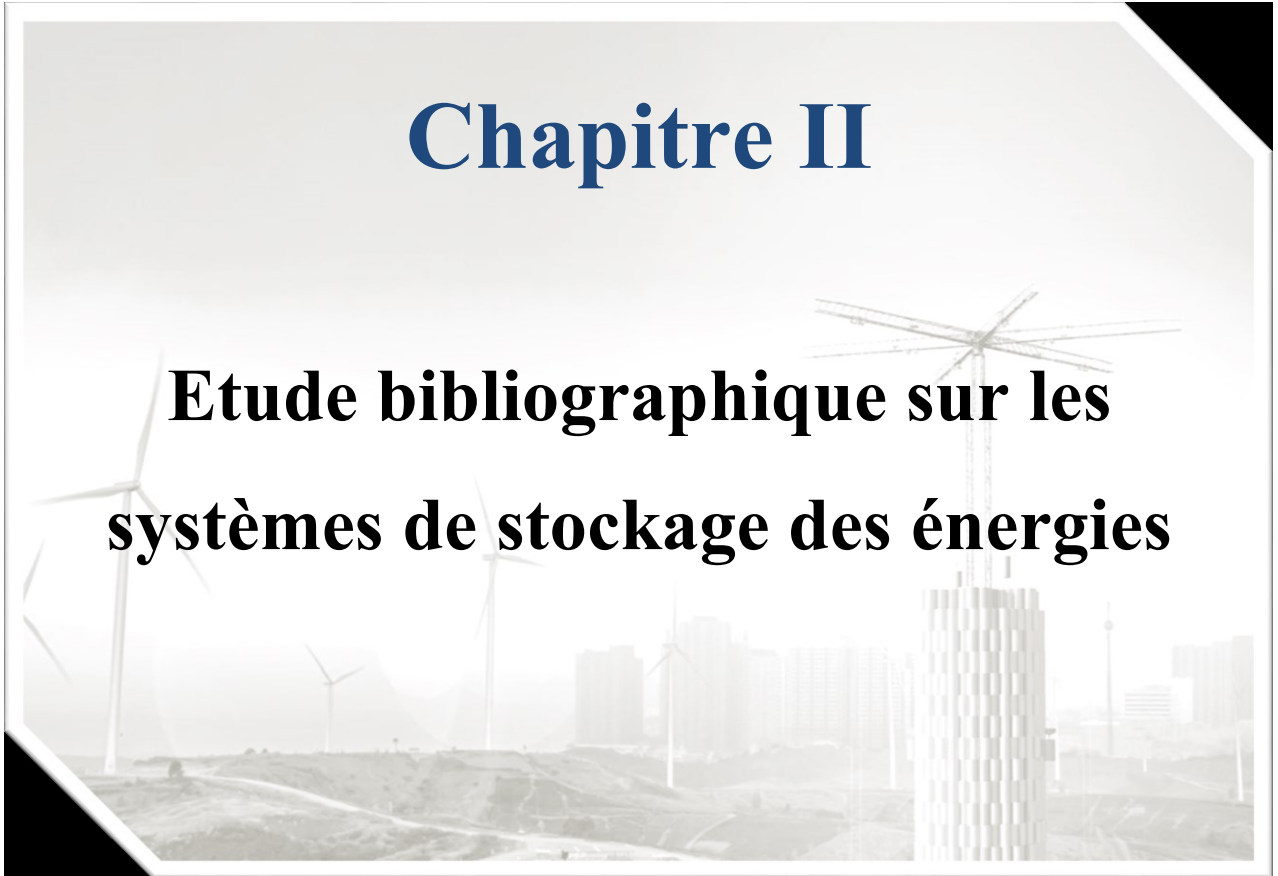
- Réduction drastique des risques par rapport à des solutions haute pression ou cryogénique
- Un système complètement réversible (stockage/déstockage)
- Sans effet mémoire, déchargeable à 100 % où puissance et énergie sont découplées Souple d'utilisation (absorbe les variations de production d'hydrogène de l'électrolyseur, idéal lorsqu'il s'agit de stockage d'énergie renouvelable intermittente) et réactif.

I.5 Conclusion

En 2016, 75,3% de l'électricité produite était encore d'origine non renouvelable [17] accélérant ainsi et de façon significative à la raréfaction des ressources fossiles et fissiles non renouvelables ainsi qu'à la dégradation de l'environnement aussi bien lors de l'extraction minière que leur de leur combustion. Cependant la proportion d'énergie électrique d'origine renouvelable croît rapidement (5,5 %/an sur la décennie 2006-2016) grâce à la conversion de l'énergie du vent (éoliennes) et du soleil (systèmes photovoltaïques) avec un potentiel colossal. L'électricité pourrait ainsi se placer au premier rang des vecteurs énergétiques qui permettraient de contribuer au développement soutenable de l'humanité [18]. Mais si la disponibilité des ressources est très élevée et le coût des installations éoliennes et photovoltaïques désormais compétitif, il subsiste l'inconvénient de leur forte variabilité. Le traitement de cette variabilité va inévitablement faire appel à plus de stockage au sein des systèmes électriques, même si le stockage n'est pas l'unique solution de flexibilité. En outre, l'électrification des transports terrestres requiert également des moyens de stockage de l'énergie électrique. Ce sont ces deux secteurs (systèmes électriques stationnaires et transports) qui constituent désormais le gros du marché des systèmes de stockage d'énergie électrique.

Chapitre II

Etude bibliographique sur les systèmes de stockage des énergies



II-1-Introduction

La question du stockage est très importante et c'est pourquoi nous l'avons abordée dans ce chapitre car il existe de nombreuses technologies qui passent par différentes étapes. La difficulté de cette dernière tient aux nombreuses caractéristiques associées à chaque technologie : puissance, capacité du modèle, rendement, coût, etc.

II-2-Stocker les énergies renouvelables à l'aide de blocs de béton.

La société suisse Energy Vault propose un moyen original pour stocker les énergies renouvelables issues de l'éolien ou du solaire. Au lieu d'utiliser des systèmes de pompage-turbinage ou des batteries, le dispositif repose sur la simple conversion d'énergie cinétique en énergie potentielle de blocs de bétons manipulés par des grues.



Figure 08: Mise en contexte du système dans un parc éolien. Les blocs de béton utilisés sont issus de la récupération de déchets de construction. Crédits : Energy Vault.

Une grue à 6 bras de 120 m de haut est placée au centre d'un empilement de blocs de béton de 35 tonnes chacun. En cas d'excédent d'énergie solaire ou éolienne, la grue soulève un ou plusieurs blocs pour les placer sur un support en hauteur.

L'énergie totale pouvant être stockée dans ce dispositif est de 20 MWh soit suffisamment

pour alimenter 2000 foyers pendant une journée.

Lors d'une demande en énergie électrique, la grue fait descendre les blocs à la base et son moteur fonctionne alors en alternateur qui envoie de l'énergie électrique sur le réseau. La société Energy Vault table sur un rendement de 85% pour ce stockage d'énergie.

II.3- Une tour de blocs de béton pour stocker l'électricité

Une « batterie mécanique » de 120 m de hauteur.

À l'heure actuelle, il existe principalement une solution de stockage d'électricité à très grande échelle sur des périodes longues : les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP). Or, ces installations hydroélectriques nécessitent des différences de dénivelés importantes, ce qui limite les lieux potentiels d'implantation.

La start-up Energy Vault s'est inspirée du principe des STEP en remplaçant la chute d'eau par des blocs de béton déplacés par une grue à six branches de 120 mètres de hauteur.

Ces blocs de béton de 8m³ pesant près de 35 tonnes sont hissés par la grue à son sommet (les blocs sont empilés les uns sur les autres) lorsque de l'électricité – excédentaire sur le réseau – doit être stockée et sont redescendus pour restituer de l'électricité lors des périodes de forte demande.

Les manœuvres des blocs de béton permettraient un stockage d'énergie de longue durée, en restituant de l'électricité « en moins de 3 secondes » selon les concepteurs de ce système présenté comme une « batterie, non pas chimique mais mécanique ». Un logiciel développé par la start-up calcule l'emplacement exact où doivent être positionnés les blocs de béton en fonction des évolutions de la demande sur le réseau, des prix de marché de l'électricité ainsi que des prévisions météorologiques qui conditionnent la production des installations éoliennes et solaires photovoltaïques.

Le rendement des tours de béton (part d'électricité restituée après stockage) avoisinerait « 85% à 90% », soit légèrement plus que les STEP selon Energy Vault. L'énergie cinétique des blocs de béton est exploitée pour faire tourner un alternateur et « aucun composant ou convertisseur supplémentaire n'est nécessaire, ce qui explique la grande efficacité de ce système », précise la start-up suisse.

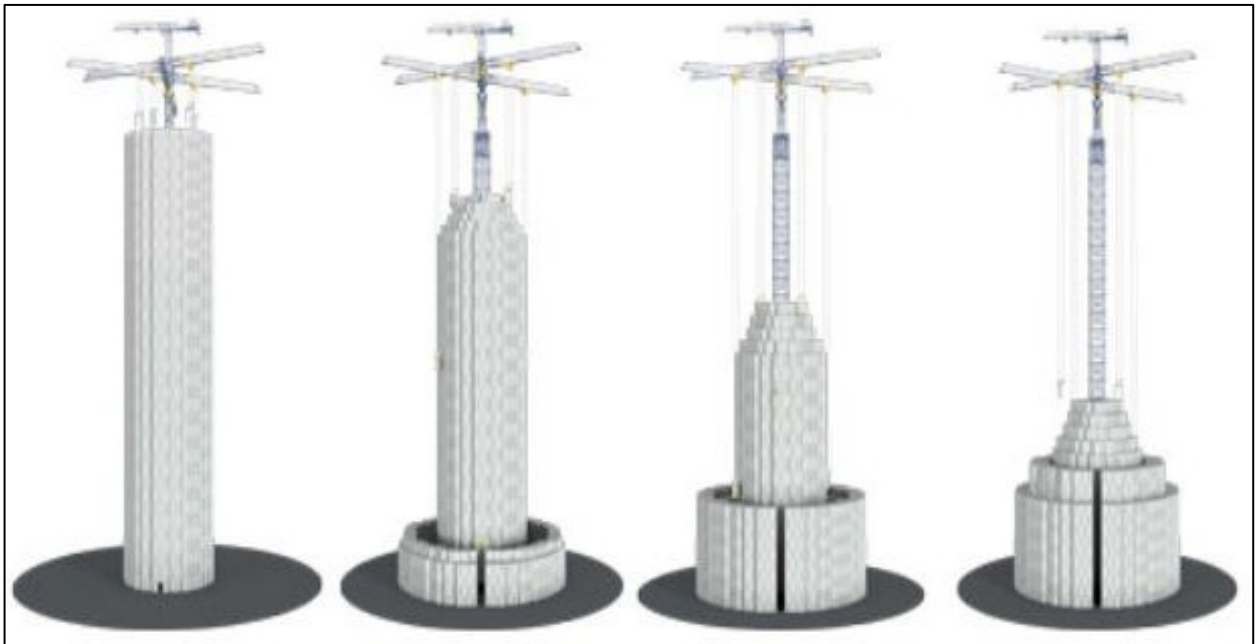


Figure 09: Lorsque de l'électricité doit être injectée sur le réseau, la grue redescend des blocs de béton à une vitesse d'environ 2,9 m/s.

II.4-Des tours pouvant stocker jusqu'à 35 MWh

Les tours envisagées par Energy Vault auraient une capacité de stockage pouvant atteindre 35 MWh (dans le cas d'une grue de 120 m de hauteur). Lors des périodes de forte demande sur le réseau, elles seraient capables de délivrer, selon la start-up, une puissance crête de 4 MW, soit approximativement l'équivalent de la capacité d'une éolienne de grande puissance (durant une durée d'environ 8h30).

Cette capacité n'est pas flatteuse en comparaison avec les STEP dont la puissance se compte en centaines de mégawatts. Ces installations présentent toutefois l'avantage de pouvoir être déployées sans contrainte de relief, au plus près de parcs à production intermittente, souligne Energy Vault. Sous réserve toutefois de disposer d'un espace circulaire de 100 m de diamètre aux alentours de la tour de béton.

Moins imposantes que les barrages hydroélectriques, les tours de béton devraient dans les faits souvent se cantonner à des espaces isolés pour éviter des oppositions de type « Nimby » (Not in my garden).

II-5-Un coût du stockage réduit de moitié selon Energy Vault

Selon Energy Vault, le principal intérêt de leur système de stockage résiderait dans son coût par rapport aux solutions de stockage existantes (STEP mais aussi batteries géantes comme celle développée en Australie par Tesla) : le LCOS (Levelized Cost of Storage) incluant les coûts d'exploitation et de maintenance est évalué par la start-up « à près de 0,05 \$/kWh contre 0,17 \$/kWh pour les STEP ».

Les blocs de béton seront en outre conçus à partir de matériaux recyclés, Energy Vault considérant ainsi sa solution de stockage comme plus respectueuse de l'environnement que des batteries nécessitant des matériaux et minerais dits « critiques ».

Un prototype de 20 m de hauteur a confirmé les attentes d'Energy Vault qui a signé un premier contrat avec l'électricien Tata Power pour l'installation en 2019 d'une tour en Inde. Les caractéristiques de l'installation ne sont pas communiquées à ce stade mais d'autres projets seraient également à l'étude dans d'autres régions du monde.

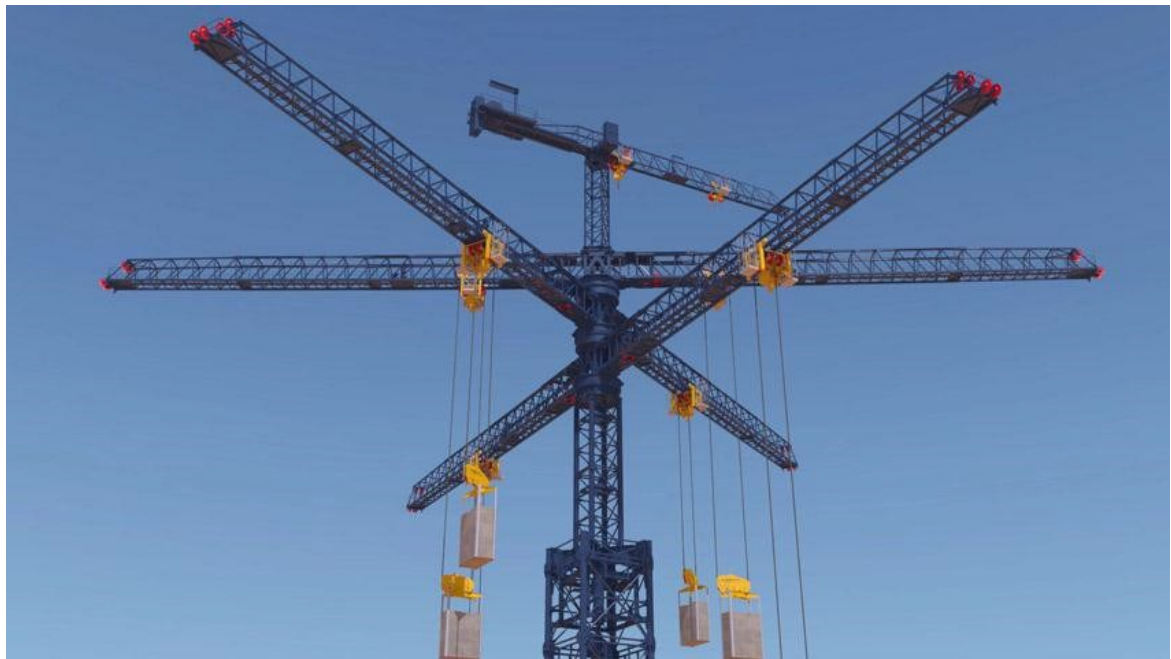


Figure 10: Energy Vault a signé un contrat avec le cimentier Cemex pour mettre au point des types de béton à empreinte carbone réduite.

II.6. Classification des technologies de stockage d'énergie mécanique:

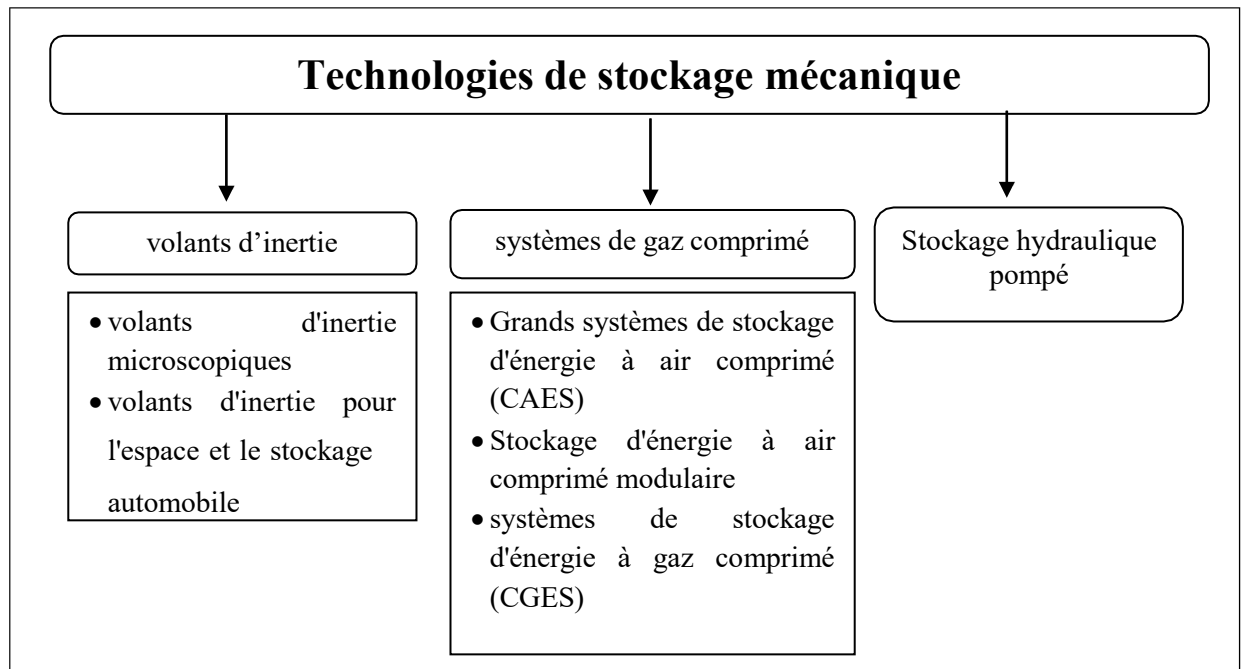


Figure 11: Classification des technologies de stockage d'énergie mécanique [16]

Notez que puisque le stockage d'énergie dans les batteries ne peut se produire qu'après le générateur électrique et avant la connexion au réseau, des pertes de conversion excessives seront encourues en raison de la tentative d'attendre la production d'électricité pour stocker l'énergie. Il est donc avantageux de concevoir et d'exploiter des technologies de stockage capables d'absorber l'énergie cinétique puis de la restituer aux générateurs en cas de besoin. La plupart des technologies présentées dans la figure II.1 sont à un niveau de maturité et de disponibilité commerciale qui présentent une alternative viable au stockage sur batterie.

II.7. Critères de choix :

Les différentes technologies de stockage répondant aux critères techniques et économiques varient considérablement selon la nature d'applications et des besoins. La comparaison pour ces nombreuses techniques est rendue difficile, là-dedans dissemblables raisons, par la variété de leur degré de maturité. Il est nécessaire, donc, d'analyser de façon critique les caractéristiques fondamentales des systèmes de stockage. Ceci permet d'établir des comparaisons pendant lequel les différentes technologies afin d'en choisir la meilleure et la plus adaptable à un JEDHP destiné à l'électrification des sites isolés, en tenant en considération leurs

gestions, dimensionnements, coûts et impacts sur

l'environnement. Les caractéristiques principales des moyens de stockage (systèmes et convertisseurs de puissance), sur leptocéphale se ammoniac le choix, sont [17]:

1.Capacité de stockage : définie comme la quantité d'énergie disponible pour le dispositif de stockage à la fin de la charge.

2. Énergie disponible : généralement exprimée à l'aide d'une valeur moyenne plus une valeur de crête souvent utilisée pour représenter l'énergie maximale de charge ou de décharge.

3.Profondeur de décharge : définie par la limite du périphérique de stockage pour connecter toute l'énergie stockée. Ce débit détermine le temps nécessaire pour extraire l'énergie stockée.

4.Temps de décharge : C'est le temps pendant lequel l'énergie stockée est déchargée. Il caractérise l'adéquation du système à des applications spécifiques.

5.Efficacité : représente le rapport entre l'énergie restituée et l'énergie stockée. Où cette définition est basée sur un ou plusieurs cycles réels liés à l'application. La puissance instantanée est l'un des facteurs qui régissent l'efficacité.

6.Durée de vie (recyclabilité) : nombre de fois qu'un dispositif de stockage peut récupérer le même niveau d'énergie après une période définie par chaque nouvelle recharge pour laquelle il a été conçu. Il est exprimé en nombre maximum de cycles.

7.Autonomie : définie comme le temps maximum pendant lequel un appareil peut récupérer en continu l'énergie stockée. Elle est calculée par le rapport entre la capacité de puissance et la capacité de décharge maximale car elle varie selon le type de stockage et la nature de l'application.

8.Coûts : C'est le capital placé car c'est la couplet la principalement importante pendant lequel l'acquéreur et les coûts d'exploitation (maintenance, opiniâtreté perdue au pension des cycles, obsolescence), sur toute la étape de vie. Les systèmes qui dégradent le cycle le principalement rapide, sont les moins performants et sont ordinairement les moins chers à investir.

9.Les domaines de faisabilité et adaptation à la pluie de production :Le type de spoliation

maximal est fortement lié à la nature de l'application (application de faible et moyenne puissance en sites isolés, application pour la connexion au réseau,...) et au idéale de production (stationnaire, embarquée, etc.).

10.L'autodécharge : est la partie de l'énergie initialement contenue dans l'unité de stockage et qui s'est dissipée en un temps avocot autrement aucune utilisation.

11.Densité énergétique massique et volumique : C'est la quantité maximale d'énergie accumulée par unité de masse ou de volume de stockage. Il montre l'importance de la masse et de la taille des périphériques de stockage pour des applications spécifiques.

12.Les équipements de contrôle et de guet des moyens de stockage tant sur le plan de la quantité que de la sûreté du stockage ont des répercussions sur l'accessibilité et la goût de l'énergie.

13.Les contraintes opérationnelles :singulièrement les aspects liés à la sécurité (explosion, rejets, éclatement comme parmi le cas du appropriation à nonce d'inertie, etc.) ou aux conditions de fonctionnement (température, pression, etc.), pouvant influencer sur le choix d'une technologie de empire en fonction des types de besoins énergétiques.

14.La fiabilité: La fiabilité d'un défilé de ascendant importe toujours, étant donné qu'elle constitue la certification du servie sur demande.

15.Autres caractéristiques importantes : impact environnemental comme des matériaux facilement recyclables, facilité d'entretien, simplicité de conception, sans oublier la souplesse de fonctionnement et d'utilisation, ainsi que la rapidité du système à rendre disponible l'énergie stockée (temps de réponse de l'appareil), etc..

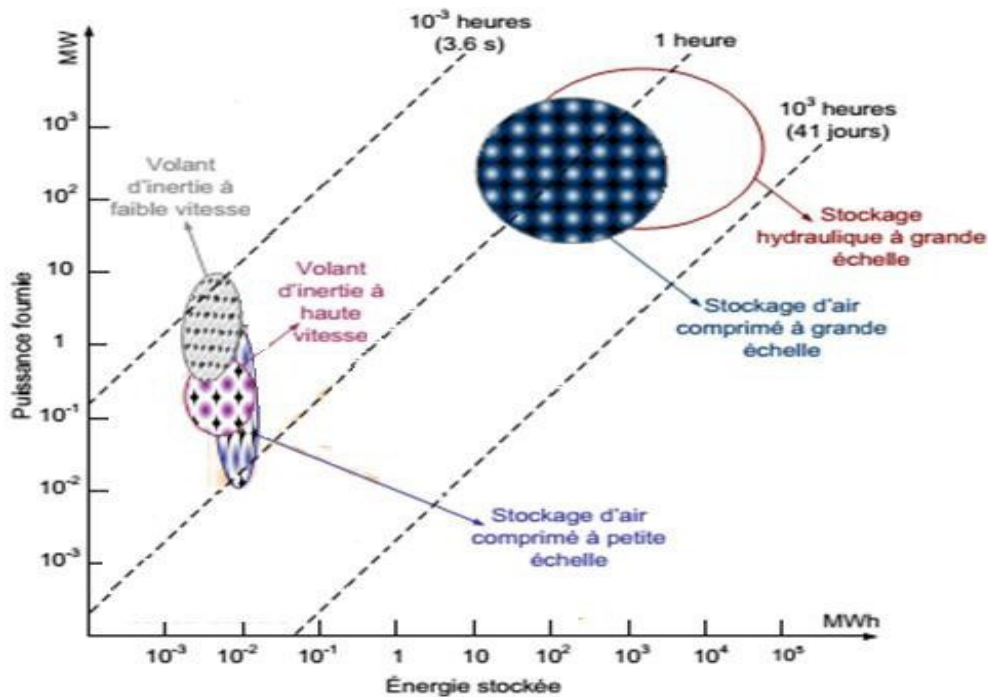


Figure 12.: Domaines d'applications des différentes techniques de stockage [18]

II-8- Comparaison et choix des technologies de stockage

Le sujet du stockage est très important et très riche. Il a été présenté dans ce chapitre, car il existe de nombreuses technologies avec différents stades de maturité dans leur développement. La difficulté du sujet se résume aux nombreuses caractéristiques associées à chaque technologie : puissance typique, capacité typique, rendement, temps de réponse, coût, etc. Le tableau ci-dessous résume ces caractéristiques.

Tableau 03.: comparatif des technologies de stockage (IFPEN/ENEA)

Technologie	Puissance (MW)	Capacité (MWh)	Rendement	Pas de temps	Durée de vie	Coût (€/kWh)
STEP	100-000	1k-100k	70-85%	min/h	40 ans	70-150
CAES	100-300	100-10k	50-70%	min/h	30 ans	50-150
Volant d'inertie	1-20	0,005-0,01	90%	Ms	100k cycles	2k-8k

Chacune des techniques présente des avantages et des inconvénients, le choix de son application n'est pas moins important que son action individuelle. Par exemple, certaines applications nécessitent des temps de réponse très courts, tandis que d'autres nécessitent des capacités très importantes. Ainsi, le choix de la technologie la plus appropriée sera affecté. Il en va de même pour les critères de coût. L'approche coût-bénéfice ne peut pas être séparée des applications cibles, car une caractéristique particulière est évaluée différemment. Ce n'est pas un marché unique, mais au contraire, il est très hétérogène dans sa présentation et son application.

Les efforts publics actuels de recherche et développement jouent régulièrement leur part d'avancées pour chacune des technologies. De nouveaux matériaux et de nouveaux procédés sont autant de moyens d'améliorer les performances de stockage. Seule l'analyse multicritères, tenant compte des derniers développements, permet de distinguer différentes techniques dans le but d'une application très précise.

II.9- Les verrous technologiques ou les besoins en R&D:

En général, toutes les technologies existantes ont besoin d'améliorations majeures pour développer un marché avec un taux de rendement compétitif. Les principaux thèmes de recherche concernent les processus de réalisation et de mise en œuvre, les matériaux (conteneur et contenu), l'efficacité générale, les décharges et pertes automatisées, la durée de vie et le vieillissement, la sécurité, la localisation et la connectivité réseau (approche système)..

II.9.1 STEP

Si les stations d'épuration des zones montagneuses peuvent être envisagées à un niveau mature, des recherches sont encore nécessaires en vue d'améliorer les turbines de pompage ainsi que de réduire les pertes, la vitesse variable et les infrastructures.

La recherche sur l'utilisation de cette technologie sur la mer, et pour réduire l'érosion par l'eau salée entre autres, n'a pas encore eu lieu. De plus, des études devraient être menées afin d'identifier les meilleurs sites potentiels ainsi que d'évaluer les besoins en génie civil et les impacts environnementaux.

II.9.2 CAES

Des recherches sont actuellement en cours pour améliorer le fonctionnement du système de pression sous haute pression et haute température. Comme pour le ballon de stockage de chaleur, la nature et les caractéristiques du récipient en tant que fluide caloporteur sont très importantes, notamment pour réduire les pertes. Or, la résistance mécanique et la conductivité des matériaux des échangeurs doivent être améliorées..

Les turbines de détente doivent, dans leur aspect, s'accommoder de manière caractéristique des contraintes de changement de pression, par exemple avec des températures élevées.

Une amélioration de l'étanchéité et de la stabilité de l'alésage est également possible dans les systèmes AA-CAES. Les possibilités de stockage souterrain restent également à explorer. [19]

II.10- Stockage en "STEP, CAES, Volants D'inertie" : (application et maturité et perspectives de développement).

II.10.1 Station de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP) :

Une station d'épuration est un système de stockage d'énergie qui utilise de l'énergie potentielle. Les usines de traitement de l'eau stockent l'énergie en pompant l'eau d'un réservoir en aval vers un super réservoir situé à une altitude plus élevée. Le système de pompe amène l'eau au réservoir supérieur et stocke ainsi l'énergie dans une sorte de réserve d'eau. Pour accéder à cette énergie, une partie du réservoir source est évacuée par gravité à travers une turbine qui produira de l'électricité. [20]

Schéma conceptuel:

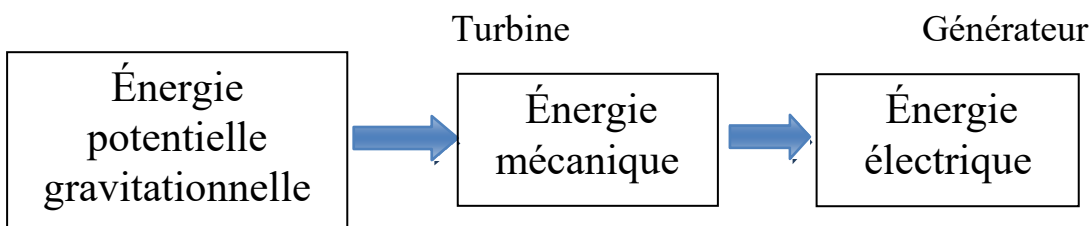


Figure 13: schéma conceptuel de Station de Transfert d'Énergie par Pompage [18]

- **Applications:**

Stockage d'énergie issue des épisodes de surproduction

Les stations de transport d'énergie par pompage représentent aujourd'hui la technologie de base pour stocker l'énergie en très grande quantité. Les stations d'épuration permettent de répondre à un certain nombre d'exigences pour stabiliser les réseaux électriques en vue de leur grande capacité de stockage. En France, les stations d'épuration servent également à stocker la production nucléaire la nuit, lorsque la consommation d'énergie est faible. Les stations d'épuration peuvent stocker jusqu'à plusieurs jours de production selon la taille de leur cuve. Aussi, ils peuvent mobiliser de grandes capacités énergétiques en quelques minutes. [20]

- **Maturité et perspectives de développement:**

Les stations d'épuration sont basées sur une technologie de stockage bien connue et utilisée depuis longtemps. Comme l'histoire des premiers systèmes au XIXe siècle en Europe. Ainsi que le système le plus utilisé au monde en raison de sa facilité d'utilisation et de sa grande capacité de stockage. Il est considéré comme près de 99% des caractéristiques de stockage d'énergie massive éprouvées dans le monde. Le nombre d'écueils majeurs au développement des stations d'épuration aujourd'hui était l'acceptation de nouveaux projets de barrages par les riverains. Des recherches sont en cours pour développer des "STEP Marines". Situé près de la mer, avec un réservoir plus important situé au-dessus d'une pente, il stockera un important surplus de production éolienne offshore. Mais la technologie doit encore être recherchée, notamment pour réduire l'érosion de l'eau de mer. [20]

II.10.2 Stockage d'énergie par air comprimé (CAES) :

La technique CAES est représentée par un certain nombre de propriétés physiques d'un fluide : son élasticité. Les systèmes CAES ont la capacité de stocker de l'énergie en comprimant de l'air. Le compresseur est électrifié par la pression d'air, qui est envoyé là où il se trouve dans le réservoir. L'énergie est stockée sous forme d'air comprimé. [20]

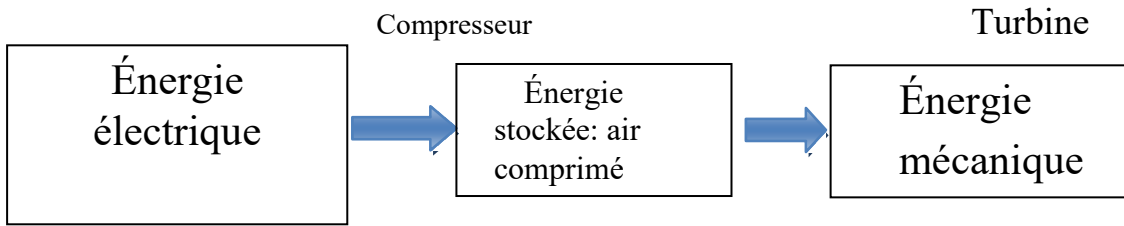
Schéma conceptuel:

Figure 14: schéma conceptuel de Stockage d'énergie d'air comprimé [18]

- **Applications:**

Stockage d'énergie issue des épisodes de surproduction

Le CAES permet de stocker l'abondante énergie générée lors des périodes de surproduction d'électricité. D'autre part, l'utilisation de cette énergie est liée aux turbines à gaz. En effet, l'énergie stockée dans l'air comprimé est utilisée pour améliorer la qualité énergétique des centrales électriques au gaz. Les turbines à gaz utilisent un mélange d'air comprimé et de gaz pour fonctionner. Ainsi, l'utilisation de l'électricité issue du cycle de surproduction de pression atmosphérique permet d'économiser de l'argent et de restituer de l'énergie qui serait autrement gaspillée. On estime qu'un tiers de l'énergie de la turbine est utilisé pour comprimer et chauffer l'air entrant dans la chambre de combustion. Actuellement, la technologie CAES est l'alternative la plus efficace aux usines de traitement des eaux usées à grande échelle avec stockage d'énergie. C'est l'une des seules technologies pouvant techniquement répondre à la limitation d'atténuation des pics de consommation électrique de l'ordre de plusieurs dizaines de mégawatts. De plus, ce système peut être adapté à de nombreuses échelles pouvant également répondre aux besoins d'applications tertiaires ou industrielles. [20]

- **Maturité et perspectives de développement:**

La technologie CAES est une technologie de pointe qui est populaire depuis de nombreuses années. Le constructeur Huntorf en Allemagne, l'un des premiers en Europe, a été construit en 1979. Jusqu'à présent, de nombreuses études sont en cours afin d'améliorer les systèmes modernes basés sur les principes fondamentaux de la technologie CAES, mais avec une haute efficacité énergétique. [20]

Deux nouveaux types de CAES ont ainsi été développés :

- **AA CAES:**

Dans le CAES dit traditionnel, l'air comprimé est envoyé directement dans la salle de stockage. Les systèmes CAES permettent de maintenir la pression du gaz, mais pas la température. Ce phénomène entraîne la perte d'énergie associée à la perte de chaleur produite lorsque l'air est comprimé. Parce que l'air doit alors atteindre une température minimale avant d'être injecté dans la chambre de combustion d'une turbine à gaz, les systèmes AA-CAES (Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage) permettent de récupérer la chaleur de l'air comprimé et de la réutiliser pour chauffer l'air. avant qu'il ne soit envoyé à la turbine. . Ce système atteint une efficacité énergétique de 70%, soit 20% de plus que le système CAES conventionnel, qui a une efficacité énergétique globale d'environ 50%. [20]

- **ICAES:**

On dit que la procédure est « isotherme » lorsque la température du système considéré est uniforme et stable. Le stockage isotherme d'énergie par air comprimé (ICAES) consiste à extraire la chaleur de l'air tel qu'il est comprimé, et non après compression comme dans les systèmes thermiques. Car ce système permettra d'atteindre un rendement en valeur d'environ 95%, soit 45% de plus que ce système CAES traditionnel.

Ces deux technologies sont actuellement en phase de développement et d'amélioration, car les deux technologies nécessitent des efforts supplémentaires de R&D et d'amélioration. Les systèmes électriques combinant gaz et centrales électriques AA-CAES sont déjà plus compétitifs que les centrales à gaz et à cycle combiné avec une production totale d'énergie estimée à environ 70 % pour les premiers contre 60 % pour les premiers. [20]

II.10.3 Volant d'inertie:

Ces volants d'inertie utilisent un principe de fonctionnement de stockage d'énergie cinétique. Il se compose d'un bloc cylindrique qui tourne autour d'un axe stable et est entraîné par un moteur électrique. Il fait tourner l'alimentation électrique du bloc à très grande vitesse en quelques minutes. Une fois démarrée, la masse continue de tourner, même si le système s'arrête. L'énergie peut alors être récupérée immédiatement en utilisant le moteur comme générateur. En conséquence, la vitesse de rotation du volant moteur diminue. Le système est monté sur un palier magnétique où il est confiné au vide dans une enceinte de protection. Afin d'améliorer les performances de l'appareil, de réduire les frottements et de prolonger sa durée

de vie. Les systèmes de stockage à volant d'inertie sont très efficaces, jusqu'à une fraction de milliseconde, et peuvent absorber de très grandes différences d'énergie sur un très grand nombre de cycles. [20]

Schéma conceptuel:

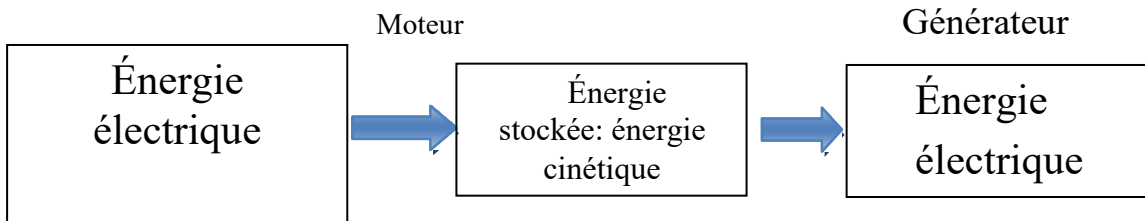


Figure 15: Schéma conceptuel de Volant d'inertie [18]

- **Applications:**

Faciliter la production et organiser le réseau électrique, Ces volants d'inertie peuvent être utilisés pour réguler et gérer le réseau électrique ainsi que pour améliorer la qualité de l'alimentation électrique en réduisant les petites coupures. Le régulateur de Stephentown (NY) aux États-Unis est équipé de 200 volants d'inertie de 20 MW, permettant de couvrir plus de 10 % des besoins réglementaires de la ville de New York. [20]

II.11- Avantages et inconvénients en général:

Tableau 4: avantages et inconvénients du stockage d'énergie dans un système mécanique [18]

	Avantages	Inconvénients
STEP	<ul style="list-style-type: none"> • PHES a une efficacité aller-retour de 70 à 80 % ; • La durée de vie prévue du PHES est d'environ 40 à 60 ans • Une technologie mature, capable de stocker d'énormes quantités d'énergie ; • Temps de réponse rapide ; • Un moyen peu coûteux de stocker de l'énergie. 	<ul style="list-style-type: none"> • Peu de sites potentiels ; • Impacts environnementaux énormes ; • Besoin énorme en eau.
CAES	<ul style="list-style-type: none"> • CAES avec une efficacité évaluée de 70% fonctionne bien pendant environ 40 ans ; • Capable de stocker d'énormes quantités d'énergie, similaire à PHE ; • Temps de réponse rapides ; 	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessite des cavernes de stockage scellées ; • Pas encore complètement développé ; • Économique seulement jusqu'à un jour de stockage

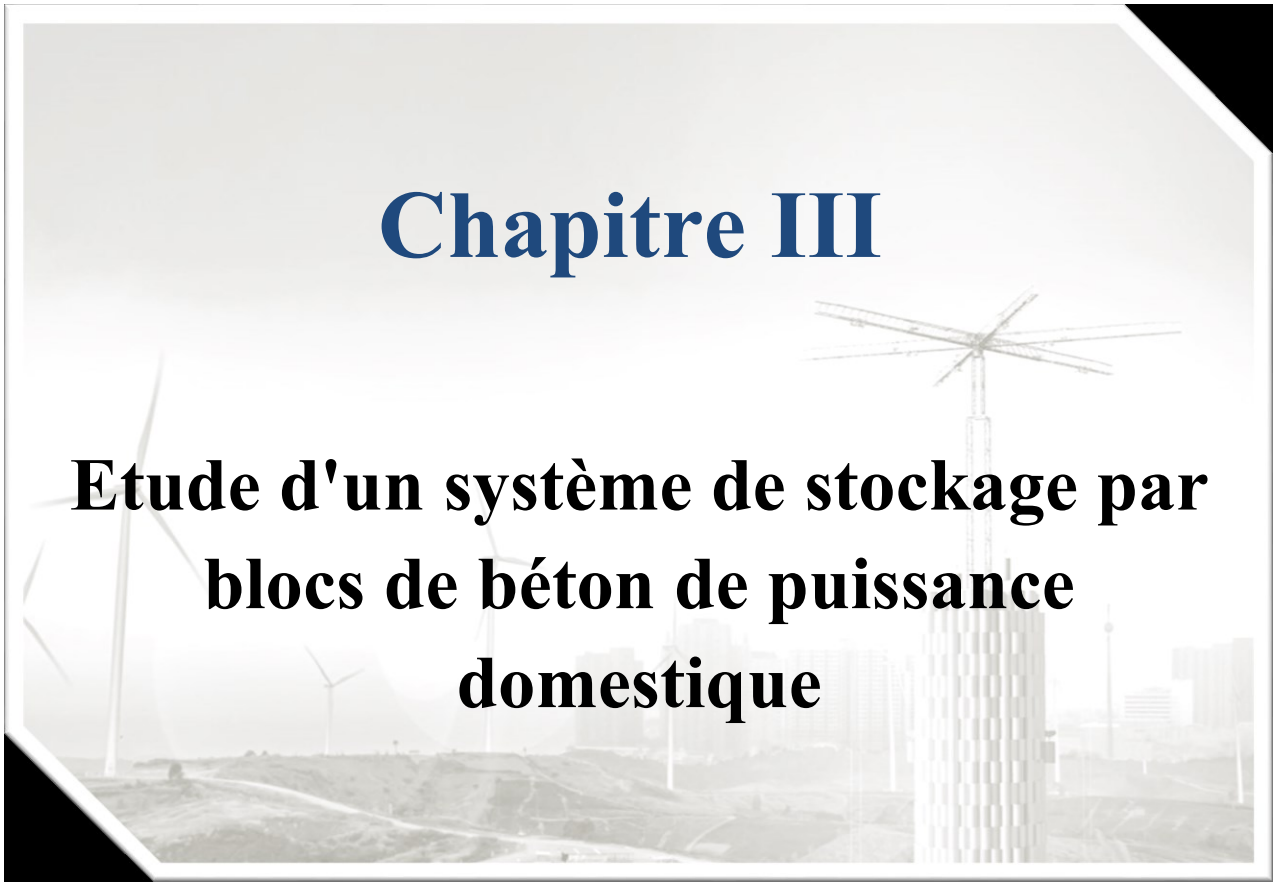
	<ul style="list-style-type: none"> • Un moyen peu coûteux de stocker de l'énergie. 	
Volant d'inertie	<ul style="list-style-type: none"> • Densité de puissance élevée ; • Technologie robuste et reconnue des moteurs, • inverseurs et masses tournantes largement utilisés dans l'industrie ; • Aucun effet de vieillissement dû au processus et aux réactions électrochimiques ; • Longue durée de vie (plus de 15 ans) ; • Large plage de températures de fonctionnement par rapport aux batteries ; • Pas de dégradation de capacité, la durée de vie du • le volant est presque indépendant du nombre et de la profondeur des cycles de charge/décharge ; • Nombre de cycles de charge/décharge très élevé possible ; • Temps de recharge court ; • Matériaux respectueux de l'environnement. 	<ul style="list-style-type: none"> • De nombreux composants à entretenir (roulements, pompe à vide, ventilateurs de refroidissement, capteurs de contrôle), • qui représentent tous des points de défaillance uniques potentiels ; • Complexité relativement élevée des roulements durables et à faibles pertes ; • Limites de contraintes et de fatigue des pièces mécaniques ; • Pertes parasites de fonctionnement et de veille relativement élevées.

II.12- Conclusion:

Grâce à ce que nous avons remarqué sur les avantages et les inconvénients des systèmes de stockage mentionnés (Station de Transfert d'Énergie par Pompage, Compressed Air Energy Storage, Volants D'inertie), nous avons décidé de choisir (Station de Transfert d'Énergie par Pompage) et d'en faire une application numérique à titre d'exemple.

Chapitre III

**Etude d'un système de stockage par
blocs de béton de puissance
domestique**



III.1 Introduction

Une fois que le bras de la grue a repéré et accroché un bloc de béton, un moteur démarre, alimenté par le surplus d'électricité du réseau, et soulève le bloc du sol. Le chariot de la grue est spécifiquement programmé pour contrer le mouvement des oscillations du vent. En conséquence, il peut soulever le bloc en douceur, puis le placer sur une autre pile de blocs, plus haut sur le sol.

III.2 Définition

Le système de stockage d'énergie des blocs de béton est basé sur la simple conversion de l'énergie cinétique en énergie potentielle des blocs de béton qui sont manipulés par des grues.



Fig 16 : Energy Vault a signé un contrat avec le cimentier Cemex pour mettre au point des types de béton à empreinte carbone réduite.

III.3. Calcul d'un système de stockage par tours à béton

Dans nos études, nous avons imposé des valeurs empiriques dans le but d'atteindre la suffisance énergétique d'une maison.

Une grue 6 potences de 40 m de haut est placée au centre d'un tas de blocs de béton pesant 105 kg chacun, s'il y a un excès d'énergie éolienne, la grue soulève un ou plusieurs blocs pour être placés dessus.

L'énergie totale qui peut être stockée dans cet appareil est de 60 kWh, ce qui est suffisant pour alimenter 6 maisons pendant une journée.

- ❖ Lorsqu'il y a une demande d'énergie électrique, le palan abaisse les blocs jusqu'à la base, puis son moteur agit comme un alternateur qui envoie l'énergie électrique au réseau.

III.4. Calcul d'énergie (mgh/ en joule ou N.M ou W.S " (10KWh)

En termes :

- La masse
- La hauteur
- Nombre de masse

1- Solution

- m: la masse
- g : gravite : 9.81
- h: hauteur m
- Nm: nombre de masses

Ex 01: $N_m = 1$; $m = 100 \text{ Kg}$; $h = 50 \text{ m}$

$$E = N_m \cdot m \cdot g \cdot h \rightarrow E = 1 \cdot 100 \cdot 50 \cdot 9.81$$

$$E = 0.013625 \text{ Kwh}$$

Ex 02: $N_m = 75$; $g = 9.81$ $m = 2000 \text{ Kg}$; $h = 25 \text{ m}$

$$E = N_m \cdot m \cdot g \cdot h \rightarrow E = 75 \cdot 25 \cdot 2000 \cdot 9.81.$$

$$E = 10.21 \text{ Kwh}$$

Tableau 05 : les changements de stockage d'énergie en termes de masse, de hauteur et de nombre de blocs de béton.

nombre de masses	masse (kg)	hauteur (m)	Energie mgh en Joule ou N.m ou w.s	mgh en Kw.h
1	100	50	49050	0.013625
2	200	25	98100	0.02725
3	300	25	220725	0.0613125
4	400	25	392400	0.109
5	500	25	613125	0.1703125
10	1000	25	2452500	0.68125
30	1000	25	7357500	2.04375
35	1000	25	8583750	2.384375
50	1000	25	12262500	3.40625
75	2000	25	36787500	10.21875

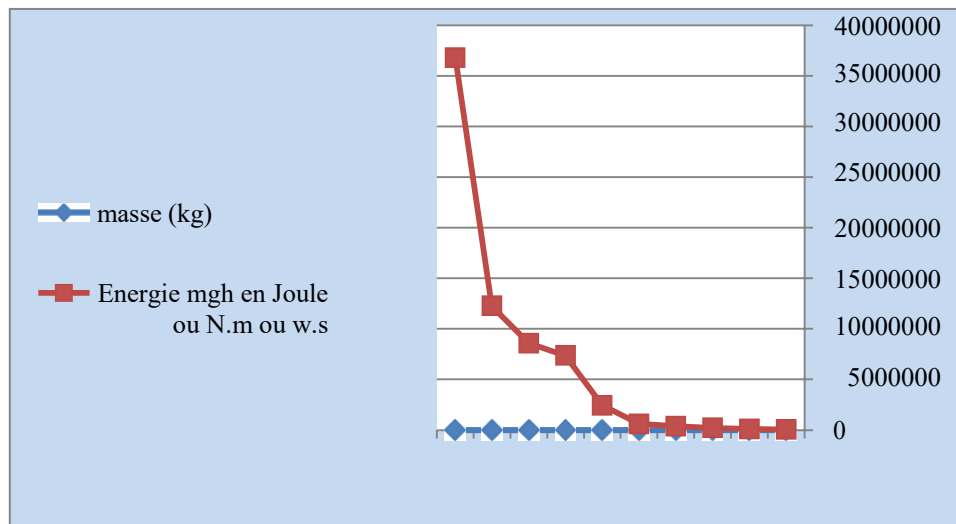


Fig 17: les changements masse (kg) sur le plan de Energie mgh en Joule ou N.m ou w.s

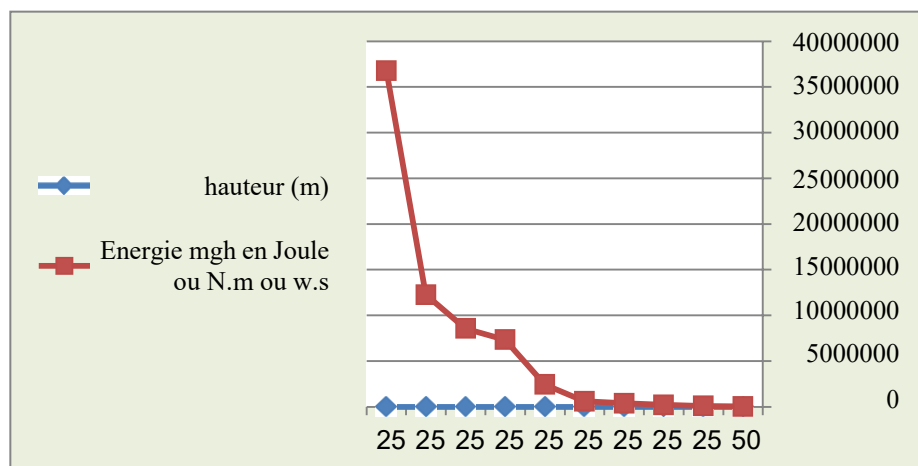


Fig 18: les changements hauteur (m) sur le plan de Energie mgh en Joule ou N.m ou w.s Conclusion

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons traité l'étude du système de stockage en blocs de béton pour l'énergie domestique, où l'utilisation de réservoirs d'eau nous permettait d'avoir une bonne énergie électrique, mais la création de réservoirs d'eau posait des difficultés.

- L'expérience a montré que l'énergie éolienne peut couvrir la consommation d'énergie de toute une maison.
- L'éolienne est capable de générer suffisamment de puissance pour pomper le réservoir ci-dessus, en adoptant le système de stockage d'énergie STEP, elle peut fournir la puissance appropriée.
- L'étude a permis au système de stockage local d'octroyer la production (basse énergie) d'éoliennes.
- La construction de blocs de béton est facile par rapport aux réservoirs d'eau, et c'est ce que nous avons réalisé dans ce chapitre

Conclusion Générale

Conclusion générale

L'utilisation des différents types de stockage d'énergie renouvelable existants reste conditionnée par l'efficacité de ce stockage, ainsi que sa capacité à transmettre l'énergie suffisante et nécessaire, cependant, cette dernière est sujette à développement et à amélioration.

Le stockage nécessite une grande quantité d'énergie pour montrer la qualité et l'efficacité de ce stockage, ce dont a besoin le stockage mécanique.

De notre étude précédente, nous sommes arrivés à des aspects importants liés au stockage d'énergie mécanique, car l'énergie générée à partir de l'énergie hydroélectrique est bonne, mais elle reste difficile à réaliser, contrairement à l'énergie générée à partir de blocs de béton.

Les différences dans les résultats obtenus dans le troisième chapitre ne restent qu'une expérience qui doit être appliquée sur le terrain pour obtenir un résultat plus précis.

Parmi les notes, nous avons trouvé :

- La disponibilité de stockages de toutes sortes laisse une grande liberté pour l'abondance des énergies renouvelables. L'utilisation du stockage via des blocs de béton est très efficace. La disponibilité de l'alimentation de secours accélère considérablement l'extension du stockage.
- Les valeurs expérimentales font la différence par rapport aux valeurs appliquées.
- Le stockage d'énergie est une chose très complexe.
- Il existe des technologies capables d'atteindre des rendements élevés, Mais il ne s'est pas encore développé à grande échelle.
- Chaque système a son propre contexte de fonctionnement.
- Nous sommes sûrs que nous obtiendrons 100 % de stockage d'énergie C'est un grand défi, mais pas impossible.
- Ce travail nous a permis d'élargir nos horizons en termes de diversité des technologies existantes.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] O. Gergaud, “Modélisation énergétique et optimisation économique d’un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau,” Thèse de Doctorat de l’Ecole Normale Supérieure de Cachan, France, Décembre 2002.
- [2] A. Mirecki, “Etude comparative des chaînes de conversion d’énergie dédiées à une éolienne de petite puissance,” Thèse de Doctorat de l’Institut National Polytechnique de Toulouse, France, Avril 2005.
- [3] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/stockage-de-l-energie>. 14/5/2021. 10:11 h.
- [4] Conversion d’énergie et efficacité énergétique, B. Multon, H. Horsin Molinaro, septembre 2018, http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/conversion-denergie-et-efficacite-energetique
- [5] Stocker l’électricité : oui, c’est indispensable et c’est possible. Pourquoi, où, comment ? B. Multon et J. Ruer, Publication ECRIN en contribution au débat national sur les énergies, avr. 2003, <http://ecrin.asso.free.fr/pdf/energies.pdf>
- [6] Pierre-Louis Viollet, Stockage d’énergie par pompage hydraulique : STEP. Techniques de l’Ingénieur, BE8582 v1, 10 janv. 2014, <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/stockage-de-l-energie-42638210/stockage-d-energie-par-pompage-hydraulique-step-be8582/>
- [7] K. Zach, H. Auer, G. et Lettner – D2.1 report summarizing the current status, role and costs of energy storage technologies. Facilitating energy storage to allow high penetration of intermittent renewable energy. stoRE Project, 49 p., mars 2012.
- [8] M. Gimeno-Gutiérrez et R. Lacal-Aránegui, Assessment of the European potential for pumped hydropower energy storage, JRC Scientific and Policy reports, 2013, https://setis.ec.europa.eu/sites/default/files/reports/Assessment_European_PHS_potential_pumped_hydropower_energy_storage.pdf
- [9] <http://www.lesmazes.fr/decouvrir/le-village/la-centrale-hydraulique-de-revin-saint-nicolas->

les-mazures.html

[10] <https://www.nant-de-drance.ch/>

[11] https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_pumped-storage_hydroelectric_power_stations

[12] S. Lemofouet et A. Rufer, Hydro-pneumatic Energy Storage Systems for Renewable Sources Support: Principle, Efficiency Optimisation, Possible topologies, IRES 2006 : First International Renewable Energy Storage Conference, Gelsenkirchen, Germany, 30-31 October 2006.

[13] F. CROTOGINO, K.U. MOHMEYER et R. SCHARF, Huntorf CAES : more than 20 years of successful operation. Spring 2001 Meeting, Orlando, Florida, USA (2001).

[14] Base de données mondiale sur le stockage d'énergie du DOE, <https://www.energystorageexchange.org>

[15] T. Desrues, J. Ruer, P. Marty, J.F. Fourmigue – A thermal energy storage process for large scale electric applications Elsevier, Applied Thermal Engineering, 30 , p. 425-432 (2010)

[16] AIE, Key world energy Statistics, 2018

[17] B. Multon et al. Ressources énergétiques et solutions pour l'alimentation en électricité des populations isolées. Électrotechnique du Futur 2011, Belfort, 12 p., 14-15 déc. 2011, <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00674833/>

Résumé

Le stockage des énergies renouvelables est aujourd'hui un enjeu critique dans le monde, car le système qui produit de l'énergie peut dépasser la demande, de sorte que le surplus d'énergie restant nécessite de rechercher une méthode de stockage afin qu'il puisse être consommé dans des cellules photovoltaïques ou des cellules solaires thermiques.

Le même problème se pose pour le stockage de l'électricité des éoliennes, en cas de vents forts la demande peut être dépassée mais le surplus doit être réservé (stocké) pour les périodes où les vents sont faibles.

Ainsi, ce problème incite les chercheurs à trouver des solutions appropriées pour répondre aux besoins énergétiques en cas de déficit.

Mots clés : Energies renouvelables, stockage, systèmes, éolien.

المخلص:

يعتبر تخزين الطاقات المتجددة اليوم قضية حاسمة في العالم، لأن النظام الذي ينتج الطاقة يمكن أن يتجاوز الطلب، لذلك فائض الطاقة المتبقية يتطلب البحث عن طريقة تخزين حتى تتمكن من استهلاكها في الخلايا الكهروضوئية أو الخلايا الحرارية الشمسية.

تنشأ نفس المشكلة بالنسبة لتخزين الكهرباء من توربينات الرياح، في حالة وجود رياح قوية يمكن تجاوز الطلب ولكن يجب حجز الفائض (تخزينه) لفترات عندما تكون الرياح ضعيفة.

وبالتالي فإن هذه المشكلة تشجع الباحثين على إيجاد الحلول المناسبة لتلبية احتياجات الطاقة في حالة حدوث عجز.

الكلمات المفتاحية: الطاقات المتجددة، التخزين، الأنظمة، طاقة الرياح.