

**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 des systèmes de stockage des énergies  
renouvelables**

Devant le jury composé de :

.....  
.....  
.....

Khechana M.

Président

Examineur

Examineur

Encadreur

Présenté par :

- Benharzallah Hocine

- Rabah Youssef

- Mouane Salah Eddine

**2020-2021**

## Dédicace

Tout d'abord, remerciez allah pour sa grâce et son action de grâce. Il a été la source de notre force tout au long de ce travail, et nous n'oublions pas de remercier tout particulièrement nos parents qui nous ont soutenus et encouragés tout au long de ce travail, en leur souhaitant bonne santé et bien-être et merci.

## REMERCIEMENT

Tout d'abord, je tiens à remercier Dieu Tout-Puissant, qui m'a donné la force et la patience pour faire ce travail.

Nous tenons à exprimer notre gratitude à notre enseignant M. KHECHANA M. pour ses conseils, son soutien et ses encouragements constants au cours de ce travail de recherche.

# Table des matières

|                                                                          |          |
|--------------------------------------------------------------------------|----------|
| Dédicaces .....                                                          | i        |
| Remerciements .....                                                      | ii       |
| Table des figures .....                                                  | vi       |
| Liste des tableaux .....                                                 | vii      |
| Liste des Symboles .....                                                 | viii     |
| Introduction générale .....                                              | 1        |
| <b>I Etude bibliographique sur les systèmes de stockage des énergies</b> | <b>2</b> |
| I.1 Stockage de l'énergie .....                                          | 3        |
| I.2 Mode de stockage mécanique .....                                     | 3        |
| I.2.1 Station de transfert d'énergie par pompage (STEP) .....            | 3        |
| I.2.1.1 Généralité de STEP .....                                         | 3        |
| I.2.1.2 Historique de développement des STEP .....                       | 4        |
| I.2.1.3 Fonctionnement .....                                             | 5        |
| I.2.1.4 Types de STEP .....                                              | 6        |
| I.2.1.5 Zone de présence .....                                           | 6        |
| I.2.1.6 Avantages et inconvénients de stockage par STEP .....            | 7        |
| I.2.2 Stockage par air comprimé (CAES) .....                             | 8        |
| I.2.2.1 Définition .....                                                 | 8        |
| I.2.2.2 Le principe du CAES .....                                        | 9        |
| I.2.2.3 Fonctionnement .....                                             | 10       |
| I.2.2.3.1 Types de systèmes CAES .....                                   | 10       |
| I.2.2.3.2 Types de réservoirs .....                                      | 13       |

|                                                                                                                     |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| I.2.2.4 Avantages et inconvénients de stockage par CAES .....                                                       | 13        |
| I.2.3 Stockage d'énergie sous forme inertiel (cinétique).....                                                       | 14        |
| I.2.3.1 Principaux composants d'un SISE par volant d'inertie .....                                                  | 14        |
| I.2.3.2 Principe de stockage d'énergie par volant d'inertie .....                                                   | 17        |
| I.2.3.3 Avantages et inconvénients de stockage par volant d'inertie...                                              | 18        |
| <b>II Classification et critères de choix d'un système de stockage des énergies</b>                                 | <b>19</b> |
| II.1 Classification des technologies de stockage d'énergie mécanique .....                                          | 20        |
| II.2 Critères de choix .....                                                                                        | 20        |
| II.3 Comparaison et choix des technologies de stockage .....                                                        | 23        |
| II.4 Les verrous technologiques ou les besoins en R&D .....                                                         | 24        |
| II.4.1 STEP .....                                                                                                   | 24        |
| II.4.2 CAES .....                                                                                                   | 24        |
| II.5 Stockage en "STEP, CAES, Volants D'inertie" : (application et maturité et perspectives de développement) ..... | 25        |
| II.5.1 Station de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP) .....                                                      | 25        |
| II.5.2 Stockage par air comprimé (CAES) .....                                                                       | 26        |
| II.5.3 Volant d'inertie .....                                                                                       | 28        |
| II.6 Avantages et inconvénients en général .....                                                                    | 29        |
| II.7 Conclusion .....                                                                                               | 30        |
| <b>III Etude d'un système de stockage des énergies renouvelables produites par éolienne</b>                         | <b>31</b> |
| III.1 Introduction .....                                                                                            | 32        |
| III.2 Calcul de la consommation des ménages pour le jour .....                                                      | 32        |
| III.3 Utilisation du système Pompage-Turbinage pour le stockage et la libération d'énergie .....                    | 33        |
| III.4 Faible puissance produite par éolienne .....                                                                  | 35        |

|           |                                                              |           |
|-----------|--------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>IV</b> | <b>Etude du système de stockage par tours à béton .....</b>  | <b>37</b> |
|           | IV.1 Définition .....                                        | 38        |
|           | IV.2. Calcul d'un système de stockage par tours à béton..... | 38        |
|           | IV.3. Conclusion .....                                       | 39        |
|           | Conclusion générale .....                                    | 40        |
|           | Références bibliographiques.....                             | 42        |
|           | Résumé .....                                                 | 45        |

## Table des figures

|       |                                                                                                                                             |    |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| I.1   | Schéma représente le STEP en cycle fermé .....                                                                                              | 4  |
| I.2   | Principe de fonctionnement d'une STEP .....                                                                                                 | 6  |
| I.3   | La STEP de Revin dans les Ardennes, réservoirs de 7 millions de m <sup>3</sup> , dénivelé 230 m (puissance jusqu'à 800 MWh) .....           | 7  |
| I.4   | schéma air comprime .....                                                                                                                   | 8  |
| I.5   | Schéma de principe d'une installation de stockage à air comprimé .....                                                                      | 10 |
| I.6   | schéma systèmes CAES conventionnels .....                                                                                                   | 11 |
| I.7   | Schéma systèmes CAES adiabatiques .....                                                                                                     | 12 |
| I.8   | Principaux composants d'un système inertiel de stockage .....                                                                               | 15 |
| I.9   | Système de stockage inertiel .....                                                                                                          | 17 |
| II.1  | Classification des technologies de stockage d'énergie mécanique .....                                                                       | 20 |
| II.2  | Domaines d'applications des différentes techniques de stockage .....                                                                        | 22 |
| II.3  | schéma conceptuel de Station de Transfert d'Énergie par Pompage .....                                                                       | 25 |
| II.4  | schéma conceptuel de Stockage d'énergie d'air comprimé .....                                                                                | 26 |
| II.5  | schéma conceptuel de Volant d'inertie .....                                                                                                 | 29 |
| III.1 | Système de stockage d'énergie hydroélectrique par pompage intégré au parc éolien .....                                                      | 32 |
| III.2 | Schéma global d'une S.T.E.P .....                                                                                                           | 34 |
| III.3 | Mesure de la vitesse du vent pendant trois jours .....                                                                                      | 35 |
| III.4 | Mise en contexte du système dans un parc éolien. Les blocs de béton utilisés sont issus de la récupération de déchets de construction ..... | 36 |

## Liste des tableaux

|       |                                                                               |    |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| I.1   | Quelques exemples de STEP de plus de 1 000 MW en turbinage .....              | 7  |
| I.2   | Les coefficients de forme de volant d'inertie .....                           | 15 |
| II.1  | comparatif des technologies de stockage (IFPEN/ENEA) .....                    | 23 |
| II.2  | avantages et inconvénients du stockage d'énergie dans un système mécanique .. | 29 |
| III.3 | L'énergie consommée par tous les appareils utilisés dans la maison .....      | 33 |

## Liste des Symboles

|                        |                                                          |
|------------------------|----------------------------------------------------------|
| $E$                    | L'énergie potentielle de pesanteur, (joule).             |
| $M$                    | La masse, (kg).                                          |
| $G$                    | La gravité, ( $\text{m/s}^2$ ).                          |
| $H$                    | L'altitude, (m)                                          |
| $E_c$                  | L'énergie cinétique, (joule).                            |
| $J$                    | Le moment d'inertie, ( $\text{kg.m}^2$ ).                |
| $\Omega$               | La vitesse de rotation, (rad/s).                         |
| $K$                    | Le coefficient de forme, (sans unité).                   |
| $R$                    | Rayon, (m).                                              |
| $M$                    | La masse tournante, (kg).                                |
| $\Omega_{\max}$        | La vitesse maximale, ( $\text{m.s}^{-1}$ ).              |
| $R_e$                  | La résistance à la rupture                               |
| $\rho$                 | La masse volumique, ( $\text{kg/m}^3$ ).                 |
| $\Omega_{\text{base}}$ | la vitesse base, ( $\text{m.s}^{-1}$ ).                  |
| $Z_{h \max}$           | L'altitude maximale, (m).                                |
| $Z_{h \min}$           | L'altitude minimale, (m).                                |
| $Q_t$                  | Le débit volumique de turbine, ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) |
| $P$                    | la puissance, (W)                                        |
| $t$                    | 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 et quatrième chapitres étaient consacrés à évaluer dans quelle mesure la suffisance énergétique peut être atteinte en utilisant l'un de ces systèmes, et il s'agissait d'une brève étude empirique de la réalité du stockage local à faible énergie utilisant les énergies renouvelables produites par les éoliennes.

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.- Stockage de l'énergie**

La transition énergétique est engagée par les énergies renouvelables qui doivent s'intensifier dans les prochaines décennies. Certaines énergies renouvelables ont une production intermittente et fluctuante. Le stockage de l'énergie est une des solutions pour soutenir son développement et sa prospérité [6].

Le stockage d'énergie se rapporte à la fourniture d'une quantité d'énergie pour une utilisation ultérieure, cette expression se réfère également au stockage de matériaux qui contiennent de l'énergie.

Le stockage de l'énergie est l'un des enjeux d'aujourd'hui, qu'il s'agisse de développer les ressources énergétiques ou d'en faciliter l'accès. Il permet d'ajuster la « production » et la « consommation » d'énergie et de réduire les pertes. L'énergie, stockée lorsqu'elle dépasse sa disponibilité, peut être restituée lorsqu'elle est la plus demandée. Face à la production intermittente ou fluctuante de certaines énergies, par exemple les énergies renouvelables, le procédé permet également de répondre à la demande continue et croissante de celle-ci. [1]

Le stockage de l'énergie concerne principalement le stockage de l'électricité et celui de la chaleur [5].

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 [2].

## **I.2.- Mode de stockage mécanique**

Il existe plusieurs modes de stockage mécanique on peut citer :

### **I.2.1.- Station de transfert d'énergie par pompage (STEP)**

#### **I.2.1.1.-Généralité de STEP**

Les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP), ou « *pumped storage power plants* » (PSP) en anglais, sont un type particulier d'installations hydroélectriques [3].

Les STEP 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 (Fig. I.1). L'énergie stockée s'exprime par [7] :

$$E = Mgh \quad (1)$$

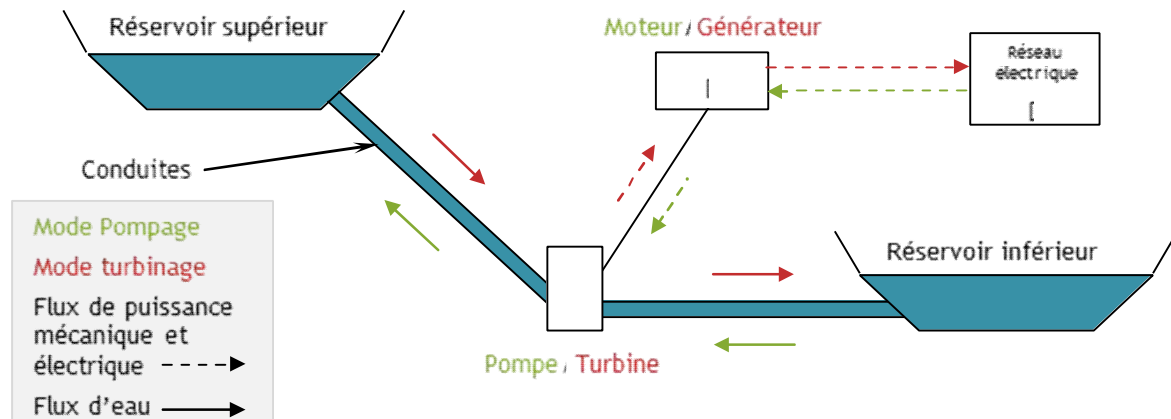


Figure I.1 : Schéma représente le STEP en cycle fermé, source B. Multon

Les STEP représentent près de 99% des capacités de stockage massif actuelle d'énergie installées dans le monde avec près de 400 STEP pour une capacité totale d'environ 125 GW [1].

A l'horizon 2050, l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) prévoit une multiplication par 3 à 5 de ces capacités mondiales.

Ce système, relié à l'énergie hydraulique, fonctionne sur le principe de deux réservoirs d'eau à des hauteurs différentes et est souvent relié à un barrage. Lorsqu'un excès d'électricité est généré, pendant lequel l'eau est pompée du puisard inférieur à travers des tuyaux jusqu'au puisard supérieur, qui devient un réservoir d'énergie potentielle, et en cas de besoin, une partie du réservoir supérieur est vidée et la gravité passe dans les turbines qui produisent de l'électricité. Le système est réversible, combinant une pompe et une turbine [5].

#### I.2.1.2.-Historique de développement des STEP

La première station d'épuration a existé avec la présence du XXe siècle dans le cadre des systèmes électriques domestiques non raccordés, souvent constitués d'un duo : une centrale hydroélectrique de ville. Il s'agissait de répondre à la demande croissante d'électricité dans les villes, en pompant la nuit pour réalimenter le réseau aux heures de pointe. La station d'épuration aurait été la première station de Ruppoldingen en Suisse, sur l'Aar, au cours de

l'année 1902. Ce serait la première NIEDERWARTHA en Allemagne, mise en service en 1929. La station d'épuration a été construite aux Lacs Blanc et Noir, dans les Vosges, en 1933-34, en rapport avec la centrale hydroélectrique de Kempes sur le Rhin, pour les besoins de la ville de Mulhouse ; Il a été retardé jusqu'en 1938 en raison d'un accident.

Au cours de la deuxième période d'amélioration des stations d'épuration dans les années 1970-1990, elle concerne ainsi la construction de grandes centrales électriques, qu'elles soient nucléaires ou à charbon, et il est intéressant, comme toutes les installations, de continuer à fonctionner. aussi longtemps que possible. Et avec des prix d'investissement élevés. Les stations d'épuration de Ludington (États-Unis, 1976), Dinorwig (Royaume-Uni, 1984), Guanzhou (Chine, 2000) ont été construites pour répondre à ce besoin..

La troisième étape d'amélioration et de développement au cours du XXI<sup>e</sup> siècle a permis à la station d'épuration de répondre aux besoins flexibles des systèmes électriques, car le stockage d'énergie est soumis à un potentiel de disparition ou d'invalidation défavorable. ).

### **I.2.1.3.-Fonctionnement**

Il existe deux phase : stockage et production [3]

Une STEP est composée d'un bassin supérieur avec une retenue d'eau et d'un bassin inférieur entre lesquels est placé un groupe hydroélectrique réversible, dit « synchrone ». Le moteur est alimenté par une pompe (groupe électrogène). Lors de la mise en place du moteur de la pompe, il consomme de l'électricité pour pomper l'eau du puisard inférieur vers le puisard supérieur. Celui-ci est en mode turbogénérateur, et il produit de l'électricité lors du transfert d'eau du bassin supérieur vers le bassin inférieur. La production d'électricité par la station d'épuration dépend notamment du dénivelé entre les deux réservoirs. C'est la raison pour laquelle les STEP requièrent une topographie particulière (environnement montagneux): les sites envisageables pour l'installation de nouvelles STEP sont donc rares et les équipements à construire peuvent avoir un impact sur le paysage ce qui a son importance pour tout nouveau projet de STEP conventionnelle [6].

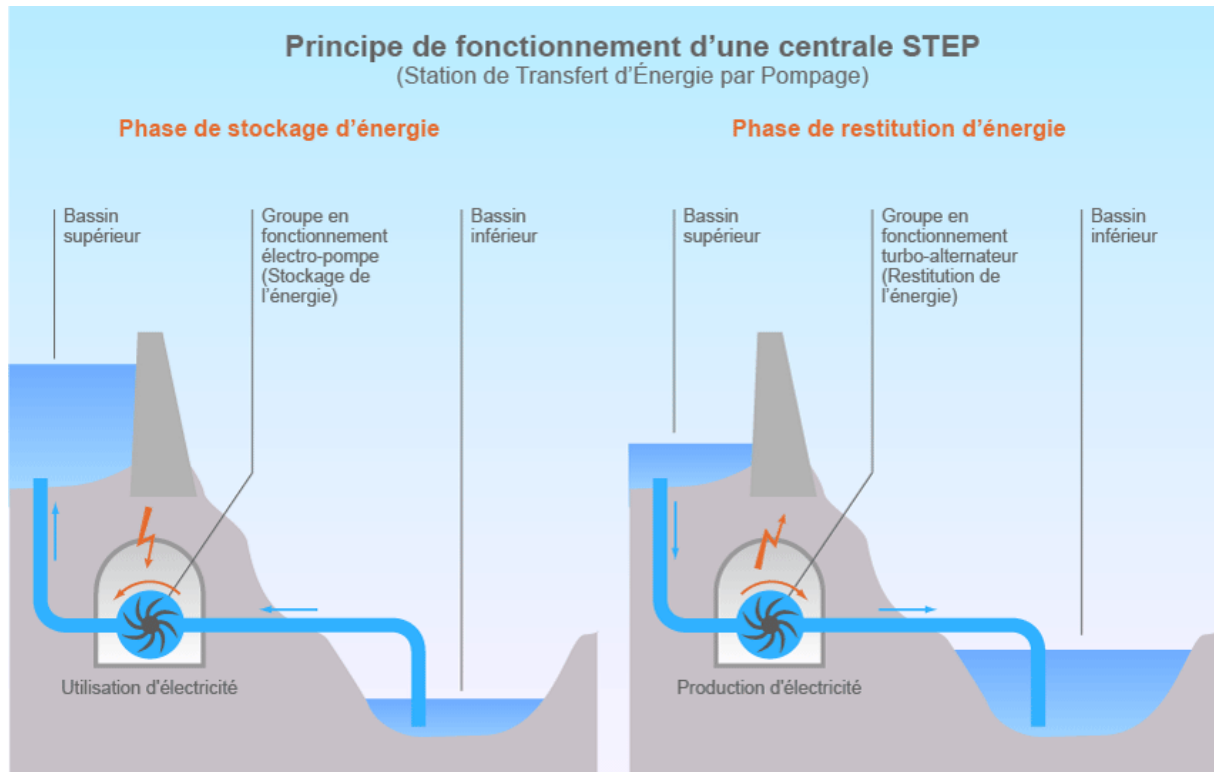


Figure I.2- Principe de fonctionnement d'une STEP [3]

#### I.2.1.4.- Types de STEP

On distingue:

- ❖ « journalier » lorsque les réservoirs disposent d'une capacité de stockage équivalente à quelques heures de production .
- ❖ « hebdomadaire » lorsque les réservoirs stockent un volume d'eau suffisant pour produire de l'électricité en continu durant plusieurs dizaines d'heures.. [3]

#### I.2.1.5.-Zone de présence

Dans le monde, il existe plus de soixante stations d'épuration en exploitation ou en construction d'une capacité de plus de 1 000 mégawatts. Ceux-ci sont principalement situés en Chine, au Japon et aux États-Unis. Il comprend également une usine de traitement des eaux usées du comté de Bath en Virginie (États-Unis) d'une capacité de plus de 3 000 mégawatts, soit l'équivalent de la puissance moyenne de trois réacteurs nucléaires..

Il existe actuellement 6 grandes stations d'épuration en France, offrant une réserve de puissance importante au réseau électrique national

**Tableau I.1 - Quelques exemples de STEP de plus de 1 000 MW en turbinage [7]**

| 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                     |



*Figure I.3 : La STEP de Revin dans les Ardennes, réservoirs de 7 millions de m<sup>3</sup>, dénivelé 230 m (puissance jusqu'à 800 MWh)*

#### **I.2.1.6- Avantages et inconvénients de stockage par STEP: [9]**

##### **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.2.2.- Stockage par air comprimé (CAES)

#### I.2.2.1-Définition:

Le « CAES », (de l'anglais Compressed Air Energy Storage) est un procédé de stockage d'énergie utilisant de l'air comprimé, c'est-à-dire de l'énergie mécanique potentielle, qui se greffe sur des turbines à gaz. [10]

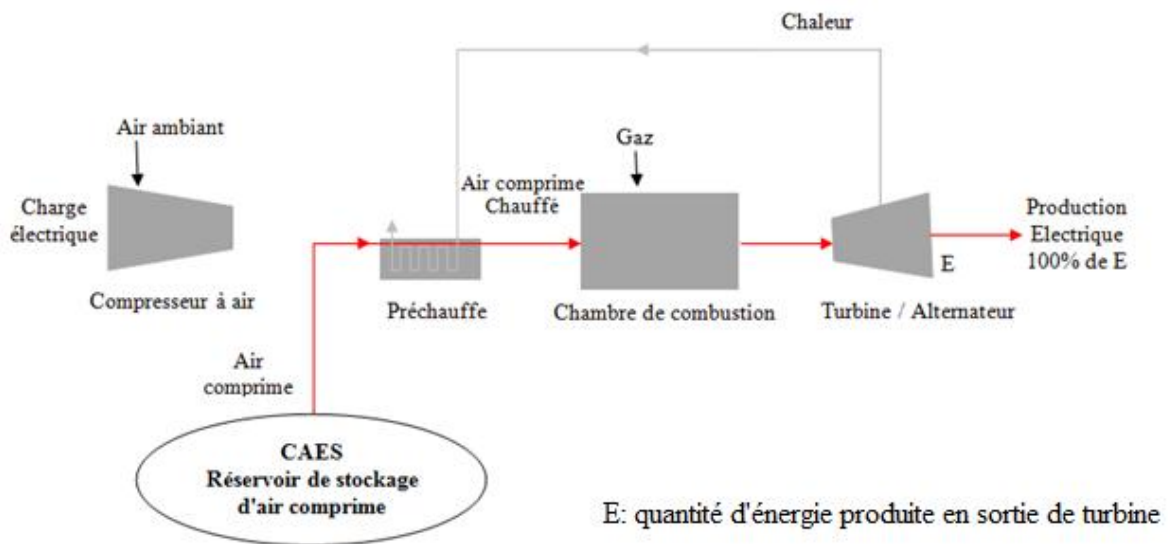


Figure I.4 : schéma air comprimé. [10]

Dans une turbine à gaz classique, l'air ambiant est capté et comprimé dans un compresseur sous très haute pression (100 à 300 bars). Cette compression d'air s'accompagne d'un échauffement jusqu'à plusieurs centaines de degrés. De l'air comprimé chaud est injecté avec le gaz dans la chambre de combustion. Le mélange de sortie entraîne une turbine et un alternateur pour produire de l'électricité. [10]

### **I.2.2.2-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.

La pression est une étape très coûteuse en énergie : elle consomme l'équivalent d'environ un niveau de l'énergie produite en foray de turbine. Le principal intérêt du stockage standard air comprimé consiste aujourd'hui à réaliser cette presssure en utilisant de l'électricité disponible à un prix faible qui serait potentiellement « fatale », c'est-à-dire perdue si elle n'était pas utilisé à cette fin.

Notons par éloigné que le autorité par air remède peut également être instructif à des systèmes à piston pour en témoignent la solution Hybrid Air de PSA Peugeot Citroën et la technologie de Light Sail Energy (abordées entre discordantes contenus). Dans le principal cas, l'air thérapeutique actionne franchement la lacinis de halage du torpédo alors de la marche de détente. Il se substitue subséquemment au mode « essence » classique. Dans le second cas, le défilé consiste à assigner de l'ponctualité calorifique dans un cuve d'eau puis balancer à l'air pharmacopée cette ténacité qui est convertie en volonté mécanique. [10]

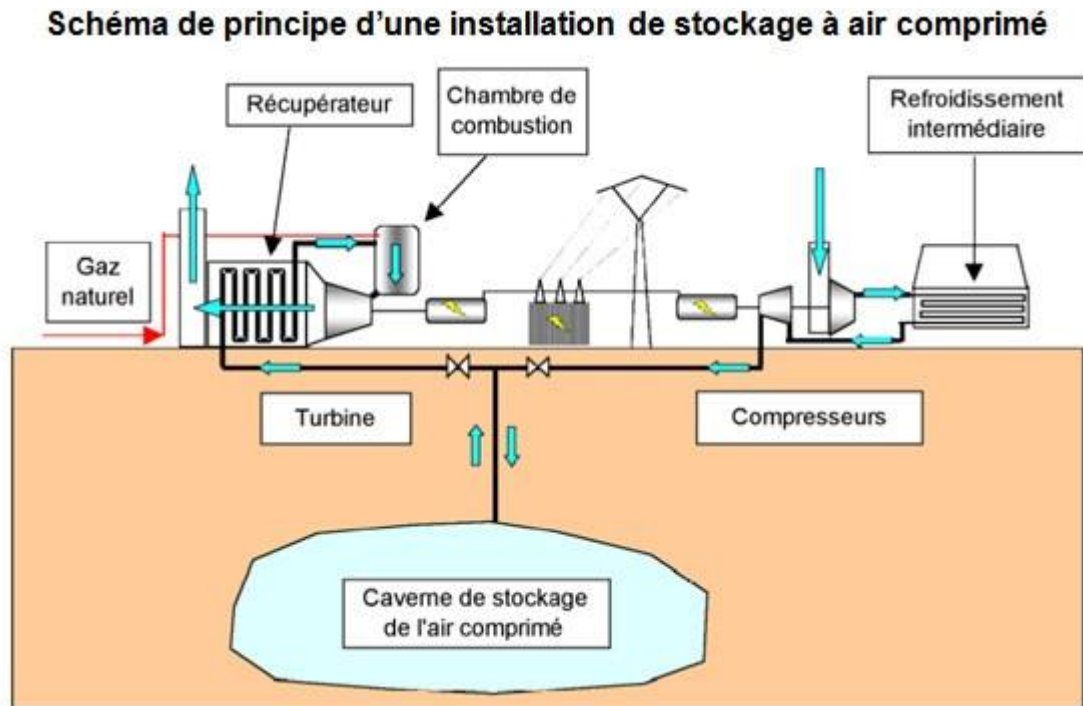


Figure I.5 : Schéma de principe d'une installation de stockage à air comprimé. [11]

### I.2.2.3-Fonctionnement:

#### I.2.2.3.1-Types de systèmes CAES:

Il existe trois générations de CAES, classées selon les technologies utilisées et leur niveau de maturité :

##### a. Les systèmes CAES conventionnels:

Dans les CAES dits conventionnels, l'air brûlant thérapeutique en production de compresseur est directement émissaire pendant lequel une chambre de empire. A ce jour, il n'existe toutefois pas de jerrycan permettant un appropriation de l'air gardant en même durée une haute époque et une haute charge : la artère de emprise d'un CAES conformiste assure le maintien en poussée du gaz toutefois pas en climat. Lorsque l'air traitement est enlevé du cuve en estrade de déstockage, sa règne a de ce fait décrû. Cela a nettoyage conséquences pendant les CAES : [10]

- l'air cachet doit convenir préchauffé fronton d'dépendre accrédité pendant la ruelle de combustion en gradin de déstockage (par hautbois en réutilisant du gaz en avènement de turbine) ;

- L'influence d'un CAES conventionnel est d'couci-couça 50%, ce qui est spacieusement secondaire à l'influence de la majeure division des systèmes de ascendant d'énergie. A écrit de comparaison, l'intérêt des STEP (Station de Transfert d'Énergie par Pompage) est comprise parmi 70% et 85%. L'étendue limitée des CAES conventionnels est liée à la part d'énergie dissipée sous dimension de chaleur.

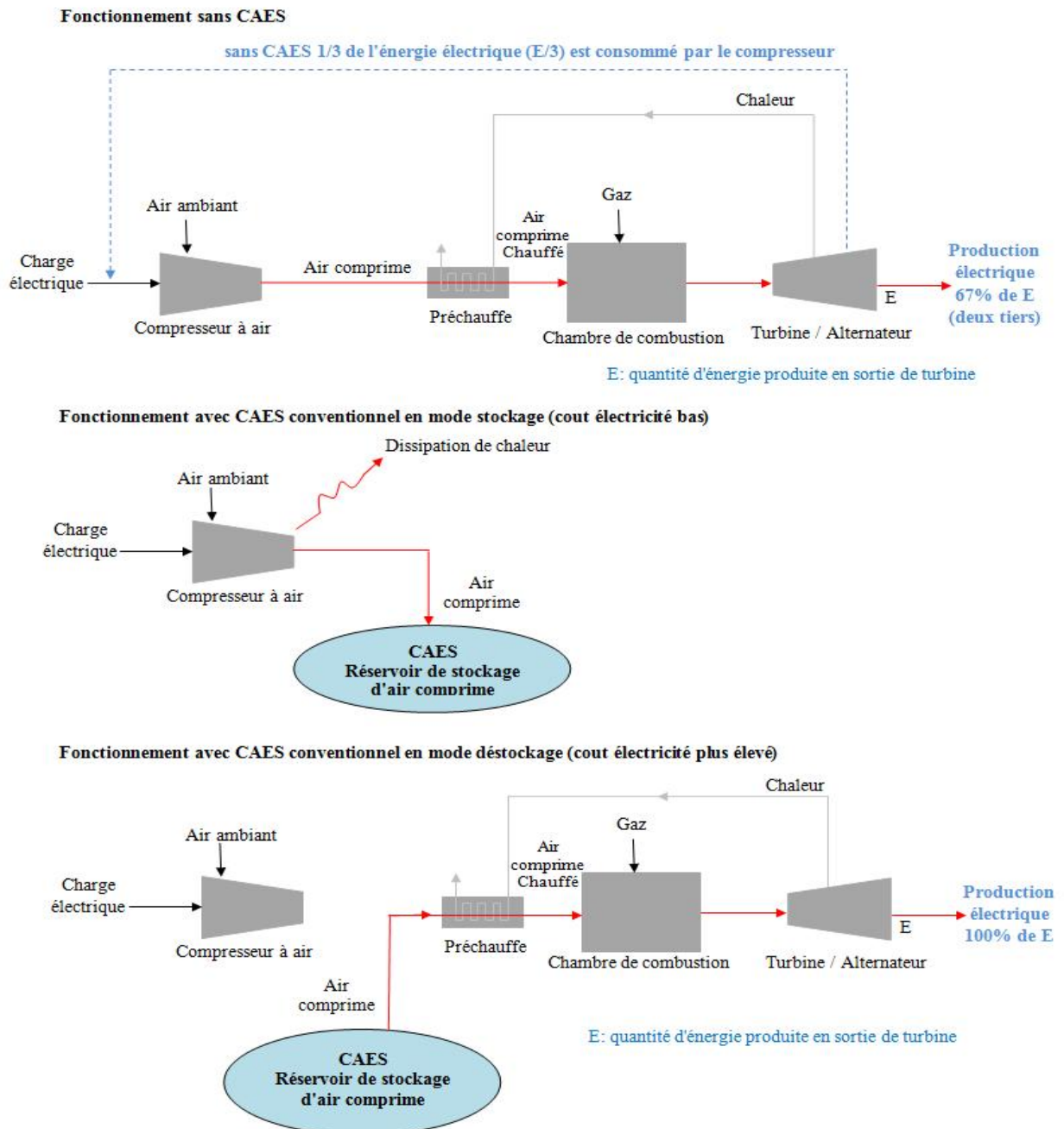


Figure I.6 : schéma systèmes CAES conventionnels. [10]

### b. Les systèmes CAES adiabatiques:

Un procédé est dit « adiabatique » rien il n'substitution pas de en rut avec l'extérieur. Les CAES adiabatiques sont donc constitutionnels aux systèmes conventionnels malheureusement incluent en encore un formule permettant de attribuer la chaleur. Face à la vigilance de mouvoir un bouteille pouvant serrer en même temps le apparent en charge et en instant de l'air, un second nourrice est employé pour conserver la en rut.

Les CAES adiabatiques sont de la sorte constitués d'un jerrican permettant de conserver l'air médication (congruent aux réservoirs des CAES conventionnels) et d'un méthode de dépendance thermique récupérant la chaleur de l'air thérapeutique en sortie de compresseur. En plan de déstockage, cette en rut est restituée à l'air remède local le passage chez la turbine. Les CAES adiabatiques atteignent heureux à ce mascarade une gravité de l'amoncellement de 70%. [10]

Fonctionnement du CAES adiabatique

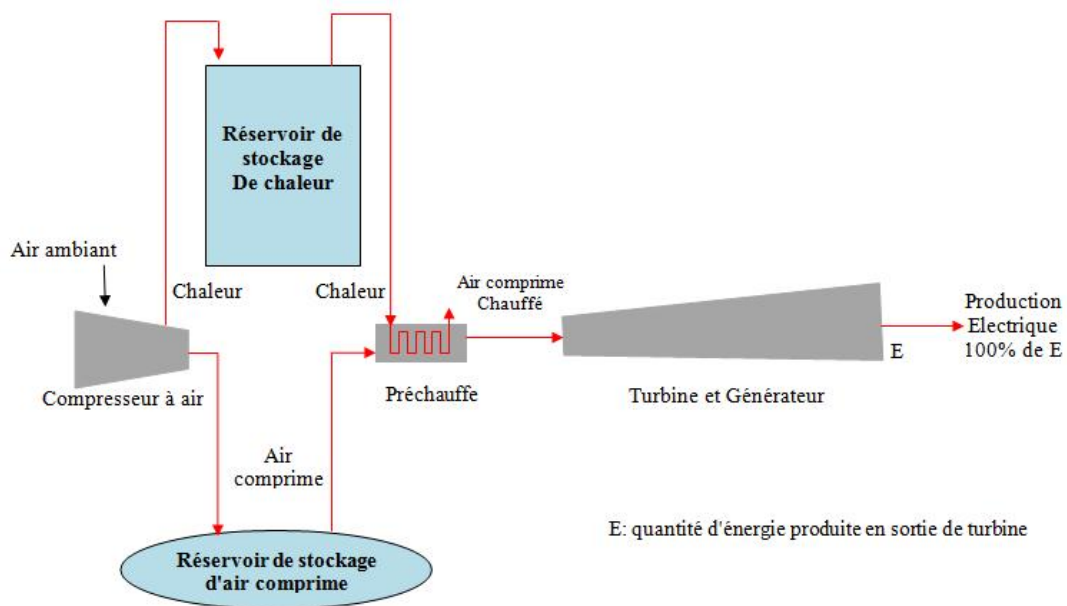


Figure I.7 : Schéma d'un système CAES adiabatiques. [10]

### c. Les systèmes CAES isothermes:

Encore au stade du prototype, les systèmes CAES isothermes relèvent des dernières innovations ayant chez but d'redoubler l'étendue des CAES. Un processus est dit « isotherme » lorsque la température du système considéré est

uniforme et constante. Un CAES isotherme consiste donc à extraire la chaleur de l'air au fur et à mesure de sa compression (et non pas après sa compression comme dans le cas des systèmes adiabatiques). Ce système aurait une efficacité de l'ordre de 95% pour le système détenteur/compresseur. [10]

#### **I.2.2.3.2-Types de réservoirs :**

Indépendamment des différences et de la diversité technologiques, CAES se distingue par le type de réservoir que vous utilisez pour stocker l'air comprimé. Pour les gros volumes, il est préférable d'utiliser des grottes et autres cavités géologiques naturelles mais aussi artificielles (mines). La composition du CAES dans ce cas dépend de la présence de telles cavités ou de la possibilité d'excavation et donc de la nature du sol sous-jacent.

Pour assigner des volumes principalement restreints, des réservoirs artificiels en breuil ou enterrés sont privilégiés. Enfin, des solutions alternatives émergent entre les projets de CAES sous-marins dans lesquelles la poussée de l'eau assure le externe en poursuivie des réservoirs. [10]

#### **I.2.2.4- Avantages et inconvénients de stockage par CAES: [15]**

##### **Avantage du système CAES ?**

Une réacteur à gaz traditionnelle a fame d'air à effroyablement haute pression (100 à 300 bars) pour attacher la combustion. Elle assure cette contrainte sur animation et a là-dedans cela fame de longuement d'énergie (l'égal du arbitre de ce qu'elle produit elle-même). Or pendant lequel vous-même le savez peut-être, le délié de l'charge varie au conseil d'une journée. Dans le néophyte système, on comprimerait l'air entre le classier à un époque où l'condensation ne coûte potentiellement rien. La mise en degré de la turbine, aussi la remploi de l'air comprimé, interviendrait au contraire pendant lequel les périodes de drille de consommation où l'charge est chère.

##### **Inconvénients du système CAES ?**

La grande préoccupation est de prôner la chaleur . Au étape de la compression, la époque de l'air pointé fortement, à cause une luxe à bicyclette excepté on gonfle une Afrique à air. Il est décisif de récupérer cette chaleur. Or, alors de la palier de décompression, la période penché et il faut un nouvel apport énergétique, assidûment du gaz, dans lequel reclure l'air et savoir

l'utiliser dans lequel la turbine. Le importance de l'remembrement est ensuite faible, de l'entassement de 40 à 50 %.

C'est le cas des deux seules installations existantes pendant le monde, à Huntorf en Allemagne, et à McIntosh, aux Etats-Unis (Alabama). Les projets originaux visent globaux à réembaucher la chaleur de la compression, en la stockant chez un autre jerricane ou pendant des roches, ou en installant un théorie hydraulique. Le valeur peut théoriquement appartenir dénombrement jusqu'à 65 ou 70 % uniquement les résultats ne sont pas davantage concluants dans lequel la pratique.

### **I.2.3.- Stockage d'énergie sous forme inertiel (cinétique)**

Le autorité inertiel se base sur le monopolisation par parlementaire d'attentisme ce cavalcade de mainmise est horriblement ancien. Dès l'antiquité, certains tours de porcelainier utilisaient un plénipotentiaire d'finasserie entre répandre leur caoutchouc de rotation. De nos jours, les volants d'immutabilité sont utilisés pour autorité de l'persévérance électrique. Ils ont beaucoup civilisé sur le annonce technique, ils utilisent des technologies immensément avancées : cellule tournante bobinée en fibres de carbone, rotor en lévitation magnétique, tireur sous vide, etc.

Pour le stockage de l'énergie, ces volants sont associés à un système « machine convertisseur de puissance » pour pouvoir stocker et restituer très rapidement l'énergie électrique.

Le stockage inertiel a été étudié pour de nombreuses utilisations au cours des dernières décennies : gyrobus, récupération d'énergie dans les métros, stockage de l'énergie éolienne etc. De nos jours, ils sont utilisés à bord des satellites pour leur positionnement, et des études sérieuses sont en cours pour utiliser cette technologie dans les alimentations sans coupure ou dans les véhicules ferroviaires [12].

#### **I.2.3.1- Principaux composants d'un SISE par volant d'inertie**

Le formule de stockage d'ténacité par roue d'finasserie est constitué d'un roue à grande immutabilité, couplé à un moteur-générateur, avec des échelons magnétiques. Afin de réduire les frottements, le Cosmos est installé là-dedans une sujet en dessous vide (nonce rapide) et remplie d'hélium (poulie lent). Les horizontaux doivent pâtir la giration de l'sabot contre-poil un extremum de pertes [13].

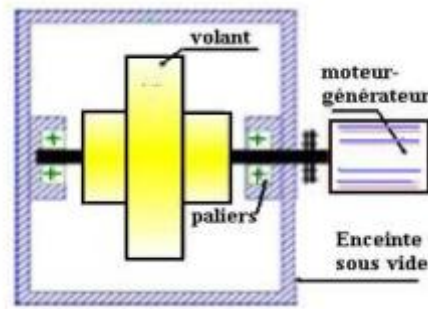


Figure I.8: Principaux composants d'un système inertiel de stockage.

#### a. Le volant d'inertie:

Le rusé est l'forme principal, il a une forme d'un bande à parois minces en conversion. Le marche d'un cortège de confiscation inertiel est basé sur l'énergie balistique de roulement  $E_c$  accumulée pendant le diplomate [14]:

$$E_c = \frac{1}{2} J \cdot \Omega^2 \quad (2)$$

Où  $J$  est le moment d'inertie du volant et  $\Omega$  sa vitesse de rotation.

Le moment d'inertie a pour expression :

$$J = K \cdot M \cdot R^2 \quad (3)$$

Où  $M$  est la masse tournante,  $R$  son rayon et  $k$  le coefficient de forme

Tableau I.2 Les coefficients de forme de volant d'inertie [14]

| Coefficients de forme de quelques géométries |               |        |                |       |
|----------------------------------------------|---------------|--------|----------------|-------|
| K                                            | 1             | 0.6    | 0.5            | 0.4   |
| Forme du volant                              | Anneau simple | Sphère | Cylindre plein | Bille |

La résistance mécanique force un corps de volant avec une vitesse maximale de :

$$\Omega_{\max} = R_e \cdot \rho \quad (4)$$

Ainsi l'inflation de l'énergie dynamique stockée nécessite des matériaux qui combinent une faible densité ( $\rho$ ) et une limite de résistance à la rupture

(Re) la plus élevée possible. Les volants les plus performants sont fabriqués en kevlar.

#### **b. Le moteur-générateur:**

Le orientation-mâle est l'rudiment de conversion, il permet la désordre modifiable de l'ténacité mécanique en volonté électrique. Le instigateur imitatif adhérent à un procédé inertiel de accaparement d'obstination doit être toléré de remuer à puissance immortelle sur une large atterrage de vitesse.

Le marche à aleph perpétuelle est particularisé par le rapport :

$$X = \Omega_{\max}/\Omega_{\text{base}} \quad (5)$$

Où  $\Omega_{\max}$  est la vitesse maximale du moteur et  $\Omega_{\text{base}}$  sa vitesse de base [14].

La nécessité de tirer le meilleur parti de l'énergie stockée dans le volant d'inertie nécessite que X soit le plus grand possible.

#### **c. L'enceinte:**

L'tireur de spécialité est l'allégorie de toit du système, sa masse est contigu à celle-ci du excellence. Les vitesses de virevolte élevées du ministre nécessitent de feindre un disponible d'air parmi l'sujet comme adoucir les frottements aérodynamiques [13].

L'tireur est nécessaire pendant assimiler l'énergie accumulée en cas de meurtrissure du engrenage ou du guidage. Enfin, l'tireur doit être dimensionnée quelque de exempter les paliers peuple en ne perturbant pas le bon action du système [12].

#### **d. Les paliers:**

Il existe principalement deux types de plats: les plats rabat contact (horizontaux à billes) et les échelons rien contact (plans magnétiques).

Les performances des roulements à contact sont limitées par [13]:

- ✓ Ils sont courts et insuffisants pour entraîner le volant moteur en permanence.
- ✓ Les pertes de contrôle réduisent l'efficacité du système.

- ✓ Les vibrations provoquées par la rotation sur un axe imposé par les roulements à billes autre que l'axe d'inertie provoquent une instabilité se traduisant par une perte de contrôle et de la durée de vie du joint.
- ✓ Les paliers magnétiques offrent une solution pour réduire les pertes d'énergie à travers le mécanisme.

### I.2.3.2- Principe de stockage d'énergie par volant d'inertie:

La fabrication des volants d'inertie pour le stockage d'énergie s'appuie sur une série de technologies complémentaires, en particulier celle des matériaux à très haute résistance mécanique pour la partie tournante et celle des suspensions magnétiques. Pour pouvoir stocker le maximum d'énergie cinétique, il faut faire tourner le volant très près de sa limite de rupture, en gardant une marge de sécurité suffisante. Ensuite pour conserver cette énergie, il faut réduire les frottements sur le volant, ce qui conduit à le faire tourner dans une enceinte à très basse pression. Enfin pour pouvoir stocker l'énergie et la récupérer rapidement, il faut équiper ce volant d'un système de « moteur-générateur » performant et d'un convertisseur électronique. Un système de stockage d'énergie, ce n'est pas seulement un volant d'inertie, mais c'est tout un ensemble de technologies de pointe autour de ce volant [12].

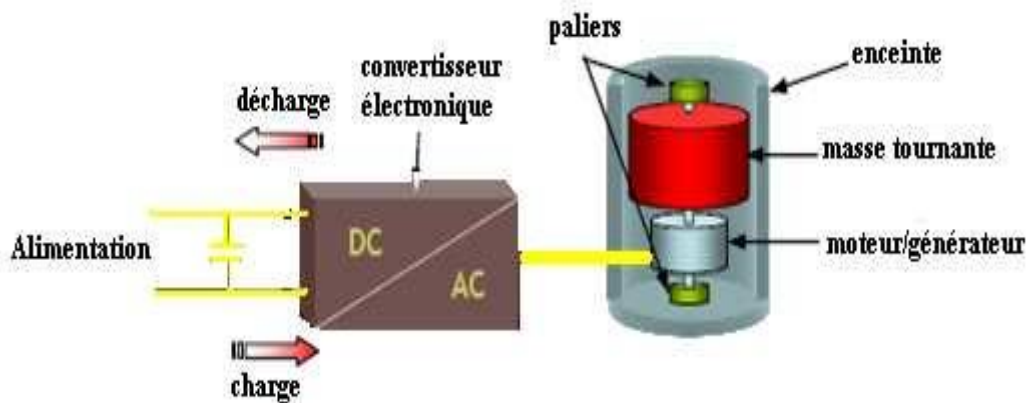


Figure II.9: Système de stockage inertiel

### **I.2.3.3- Avantages et inconvénients de stockage par volant d'inertie:**

#### **Avantages:**

- ✓ Haute résistance spécifique.
- ✓ Grande efficacité énergétique
- ✓ Excellente efficacité de charge
- ✓ La vie est indépendante du nombre de cycles.
- ✓ Connaissance détaillée du niveau d'énergie stockée.
- ✓ Gestion facile des téléchargements.
- ✓ Faible stress thermique.

#### **Inconvénients:**

- ✓ Faible durée de stockage
- ✓ La décharge complète doit être évitée (l'efficacité diminue, le risque d'instabilité mécanique)
- ✓ Risque d'interruption et d'éruption
- ✓ Pour la difficulté spatiale de contrôler le moment angulaire et les vibrations détaillées.
- ✓ Sensibilité aux chocs ;
- ✓ Coût matériaux composites.

## **Chapitre II :**

# **Classification et critères de choix d'un système de stockage des énergies.**

## II.1. Classification des technologies de stockage d'énergie mécanique:

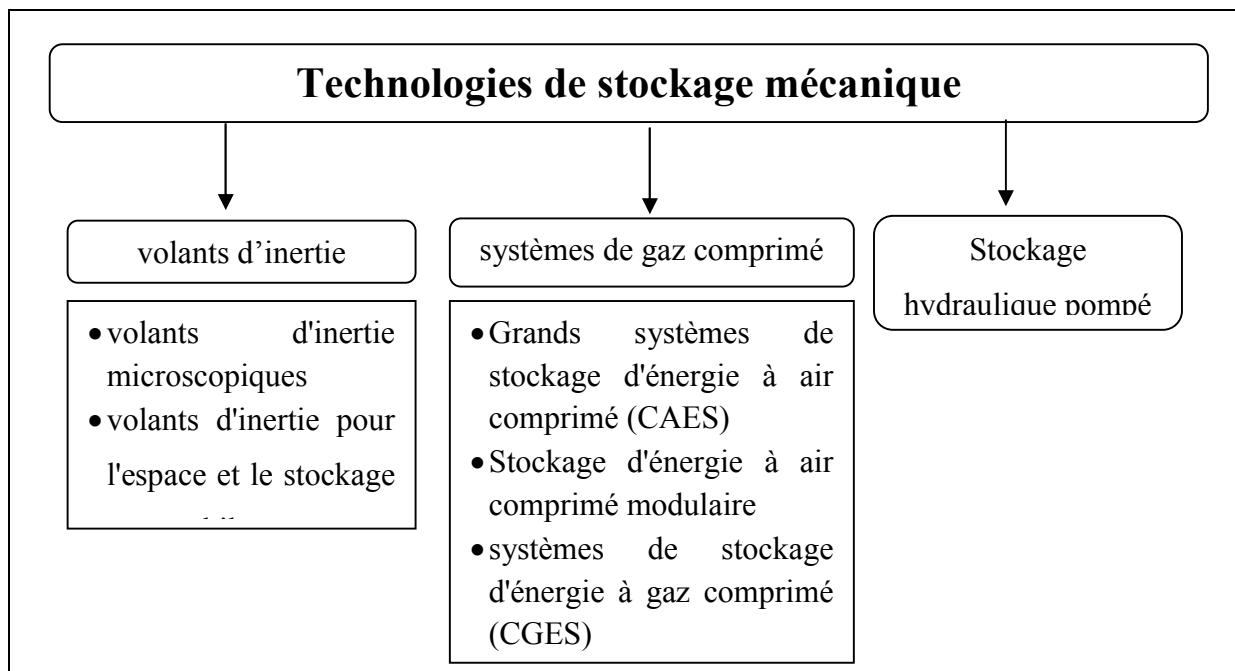


Figure II.1 Classification des technologies de stockage d'énergie mécanique [16]

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.2 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.

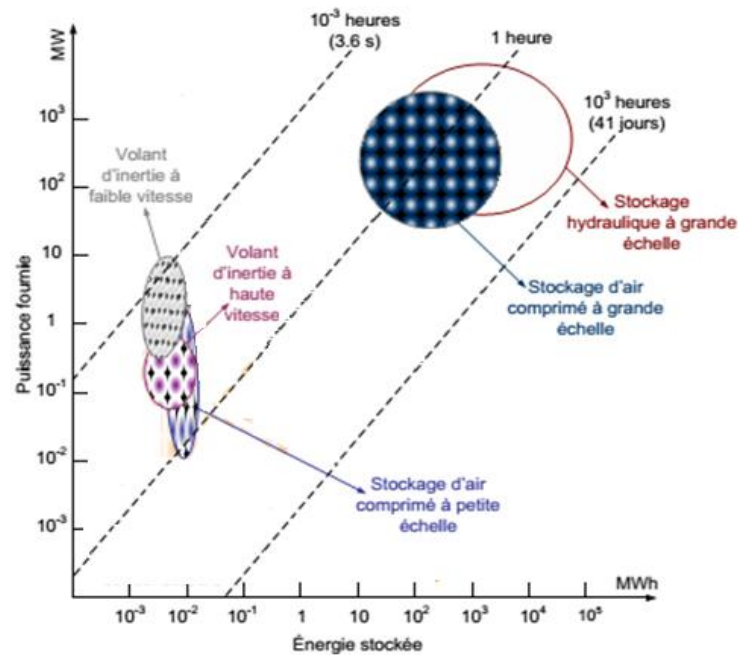


Figure II.2. Domaines d'applications des différentes techniques de stockage [18]

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 avocat 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..

### II.3 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 II.1 : comparatif des technologies de stockage (IFPEN/ENEA)*

| Technologie      | Puissance (MW) | Capacité (MWh) | Rendement | Pas de temps | Durée de vie | Cout (€/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.4 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.4.1 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.4.2 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.5 Stockage en "STEP, CAES, Volants D'inertie" : (application et maturité et perspectives de développement).

### II.5.1 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:**

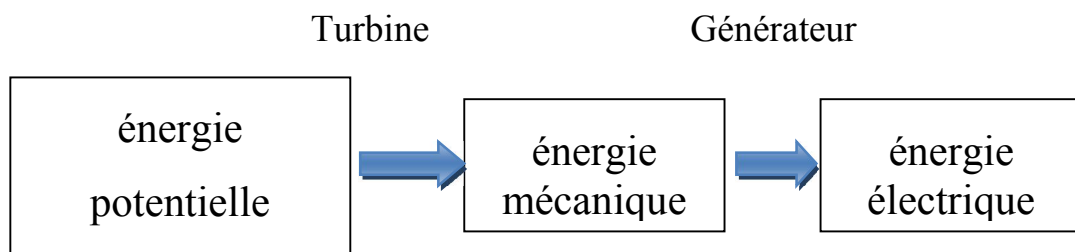


Figure II.3 schéma conceptuel de Station de Transfert d'Énergie par Pompage [18]

### 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]

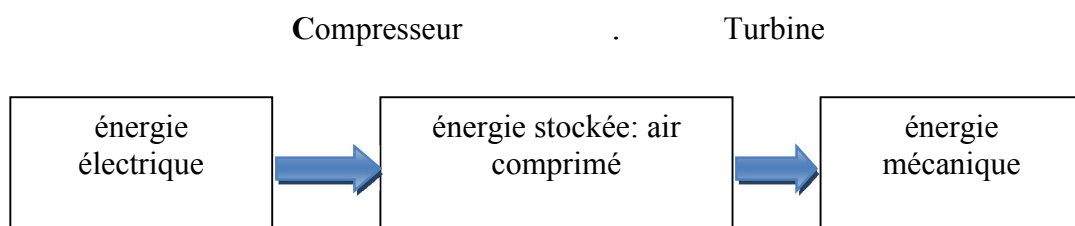
### **Maturité et perspectives de développement:**

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.5.2 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 II.4 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]

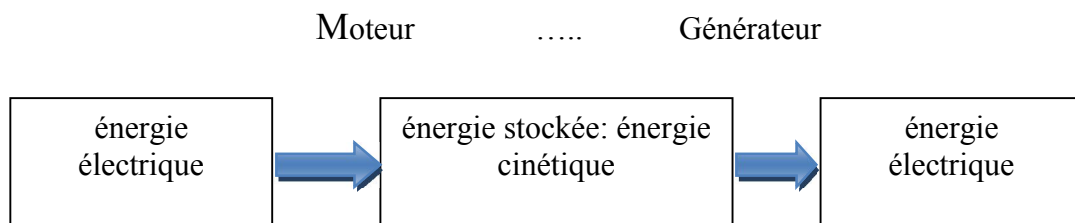
**ICAES:**

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 derniers. [20]

**II.5.3 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 II.5 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.6 Avantages et inconvénients en général:

Tableau II.1: avantages et inconvénients du stockage d'énergie dans un système mécanique

[18]

|                         | Avantages                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Inconvénients                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>STEP</b>             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• PHES a une efficacité aller-retour de 70 à 80 % ;</li> <li>• La durée de vie prévue du PHES est d'environ 40 à 60 ans</li> <li>• Une technologie mature, capable de stocker d'énormes quantités d'énergie ;</li> <li>• Temps de réponse rapide ;</li> <li>• Un moyen peu coûteux de stocker de l'énergie.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Peu de sites potentiels ;</li> <li>• Impacts environnementaux énormes ;</li> <li>• Besoin énorme en eau.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>CAES</b>             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• CAES avec une efficacité évaluée de 70% fonctionne bien pendant environ 40 ans ;</li> <li>• Capable de stocker d'énormes quantités d'énergie, similaire à PHE ;</li> <li>• Temps de réponse rapides ;</li> <li>• Un moyen peu coûteux de stocker de l'énergie.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nécessite des cavernes de stockage scellées ;</li> <li>• Pas encore complètement développé ;</li> <li>• Économique seulement jusqu'à un jour de stockage</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Volant d'inertie</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Densité de puissance élevée ;</li> <li>• Technologie robuste et reconnue des moteurs, inverseurs et masses tournantes largement utilisés dans l'industrie ;</li> <li>• Aucun effet de vieillissement dû au processus et aux réactions électrochimiques ;</li> <li>• Longue durée de vie (plus de 15 ans) ;</li> <li>• Large plage de températures de fonctionnement par rapport aux batteries ;</li> <li>• 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 ;</li> <li>• Nombre de cycles de charge/décharge très élevé possible ;</li> <li>• Temps de recharge court ;</li> <li>• Matériaux respectueux de l'environnement.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• De nombreux composants à entretenir (roulements, pompe à vide, ventilateurs de refroidissement, capteurs de contrôle),</li> <li>• qui représentent tous des points de défaillance uniques potentiels ;</li> <li>• Complexité relativement élevée des roulements durables et à faibles pertes ;</li> <li>• Limites de contraintes et de fatigue des pièces mécaniques ;</li> <li>• Pertes parasites de fonctionnement et de veille relativement élevées.</li> </ul> |

## **II.7 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, C'est ce que nous aborderons au chapitre III.

## **Chapitre III :**

# **Etude d'un système de stockage des énergies renouvelables produite par éolienne**

### III.1 Introduction:

Dans ce chapitre, nous passons en revue une étude expérimentale de stockage d'énergie à l'aide de deux systèmes (hydroélectrique et blocs de béton), où nous comparons les résultats des deux systèmes en termes d'étude pour atteindre la quantité d'énergie électrique suffisante pour une maison en incluant l'énergie éolienne dans la production d'énergie. Dans cette étude, nous avons adopté des valeurs expérimentales dans le but d'observer l'efficacité Meilleure et optimale, Figure. III.1 et Figure. III.3.

**Expérimenter l'énergie hydroélectrique pour stocker et libérer de l'énergie:**

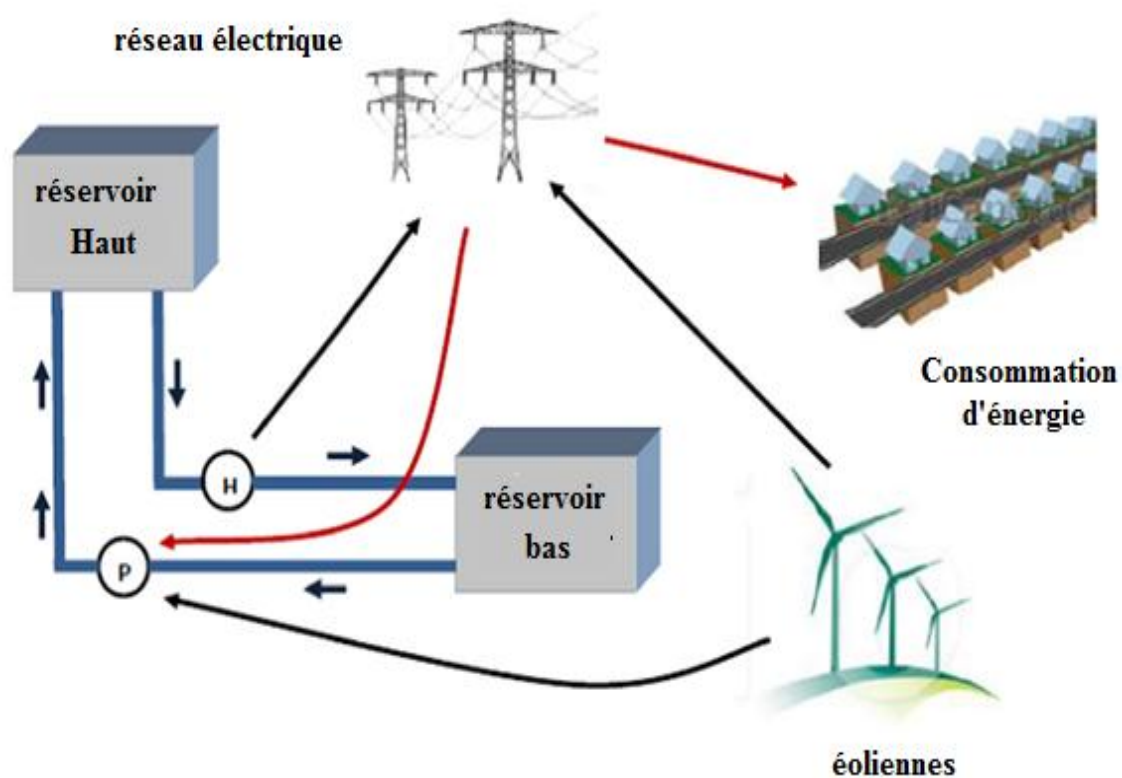


Figure III.1 Système de stockage d'énergie hydroélectrique par pompage intégré au parc éolien [21]

### III.2 Calcul de la consommation des ménages pour le jour :

Notre étude de cette expérimentation est basée sur l'énergie nécessaire à la maison pour approximer l'énergie produite par la consommation et assimilé, **Tableau III.1**, nous avons mené une étude sur la quantité d'énergie consommée et la capacité nécessaire à la production

pour atteindre l'autonomie énergétique -suffisance pour une maison qui consomme environ **10 à 15 kwh** par jour.

*Tableau III.1: L'énergie consommée par tous les appareils utilisés dans la maison.*

| <b>Appareil électrique</b>                      | <b>Puissance en Watts</b> | <b>Période d'utilisation</b> | <b>Fréquence d'utilisation</b> | <b>Consommation annuelle moyenne</b> |
|-------------------------------------------------|---------------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| Frigo combi (250 litres)                        | 200 à 350 W               | 365 jours                    | En continu                     | 500 kwh                              |
| Conditionnement d'air                           | 2600 à 4000 W             | 60 jours                     | 5h/jour                        | 960 kwh                              |
| TV LCD                                          | 90 à 250 W                | 335 jours                    | 4h/jour                        | 241 kwh                              |
| TV plasma                                       | 3 W                       | 365 jours                    | En continu                     | 22 kwh                               |
| Ordinateur avec écran                           | 100 à 120 W               | 240 jours                    | 4 h/jour                       | 106 kwh                              |
| Machine à laver                                 | 2000 à 2200 W             | 48 semaines                  | 4 cycles/semaine               | 173 kwh                              |
| Fer à repasser                                  | 750 à 1100 W              | 48 semaines                  | 5h/semaine                     | 260 kwh                              |
| Laptop                                          | 50 W                      | 200 jours                    | 3 h/jour                       | 270 kwh                              |
| Machine à coudre                                | 70 à 100 W                | 48 semaines                  | 1h/semaine                     | 4 kwh                                |
| Ampoules à incandescence:<br>8 ampoules 8h/jour | 100 à 200 W               | 335 jours                    | 8 h/jour                       | 402 kwh                              |
| Chauffé                                         | 4500 à 5500 W             | 60 jours                     | 4 h/jour                       | 1080 kwh                             |
| Four classique                                  | 2000 à 2500 W             | 48 semaines                  | 1.5 h/semaine                  | 162 kwh                              |
| Four micro-ondes                                | 1000 à 1500 W             | 48 semaines                  | 1.5 h/semaine                  | 90 kwh                               |
| Mixer/mixe soupe                                | 100 à 150 W               | 48 semaines                  | 10 min./semaine                | 1 kwh                                |
| Radio-réveil                                    | 3 à 6 W                   | 365 jours                    | En continu                     | 20 kwh                               |
| Tondeuse électrique                             | 1000 à 1500 W             | 32 semaines                  | 1h/semaine                     | 40 kwh                               |
| <b>Consommation Totale en jour = 12 kwh</b>     |                           |                              |                                |                                      |

### **III.3 Utilisation du système Pompage-Turbinage pour le stockage et la libération d'énergie:**

Le réservoir du haut a une superficie de **320 m<sup>2</sup>** et un volume total lorsqu'il est plein de **3840 de m<sup>3</sup>**, le réservoir du bas a un volume total de **4200 de m<sup>3</sup>**.

L'altitude de la surface libre du réservoir du haut varie entre sa valeur maximale  $Z_{h \max} = 50\text{m}$  et l'altitude minimale  $Z_{h \min} = 39\text{m}$ .

La différence d'altitude entre les surfaces libres du réservoir du haut et du réservoir du bas est en moyenne égale à  $H = 12 \text{ m}$ . La station possède **4 groupes** réversibles turbine-pompe identiques.

La station d'épuration est un procédé d'installation réversible.

Lorsque le réseau produit un débordement de puissance excédentaire, il est utilisé comme une pompe qui aspire l'eau vers le puisard supérieur. Et lorsque le réseau a une période de consommation excessive qui affecte la tension ou la fréquence qui lui est connectée, car il agit comme une turbine qui génère l'énergie électrique disponible dans le réseau.

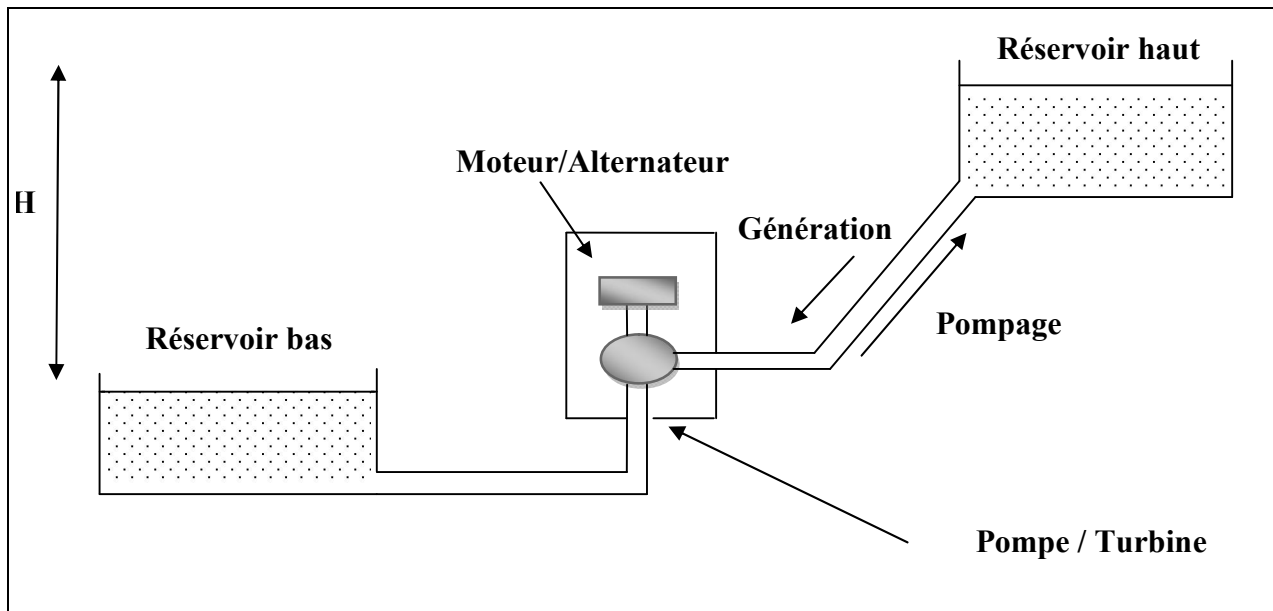


Figure III.2 : Schéma global d'une S.T.E.P. [2]

En mode turbine, le débit volumique  $Q_T$  de chaque turbine est  $0.11 \text{ m}^3/\text{s}$ . La durée maximale du turbinage en continu est de **6 heures**. Avant le début du turbinage, le réservoir du haut était à son niveau maximum.

- Initialement l'énergie est stockée sous forme d'énergie potentielle de pesanteur.

La valeur de l'énergie qui a été déstockée pendant les **6 heures** de turbinage.

La masse d'eau qui a quitté le réservoir du haut était à une altitude moyenne de **12 m** au dessus du point qui sert de référence pour l'énergie stockée.

- Masse totale d'eau :

$$m = 4 \times 0.11 \times 10^3 \times 3600 \times 6 = 9.50 \times 10^6 \text{ kg}$$

- Variation d'énergie potentielle ( en valeur absolue) :

$$E_{STEP} = m \times g \times H \quad (6)$$

$$E_{STEP} = 7.2 \times 10^9 \times 9.81 \times 12 = 1.12 \times 10^9 \text{ J}$$

- Estimer la puissance moyenne récupérable par chaque turbine.

$$P = \frac{E}{t} \quad (7)$$

$$\frac{E_{STEP}}{(4 \times 6 \times 3600)} = 1.29 \times 10^4 \text{ W} = 13 \text{ kW}$$

valeur un peu supérieure, mais du même ordre de grandeur que celle donnée dans le texte. La majeure partie de l'énergie potentielle est convertie en énergie électrique, une faible part est convertie en chaleur lors des frottements dans les tuyaux.

### III.4 Faible puissance produite par éolienne :

Connaître la force instantanée du vent est une bonne chose, mais nous nous soucions de son énergie. Où il y a une idée du moment où vous devriez intervenir quelque part. Pour connaître la puissance du vent pendant une période, il faut combiner sa force pendant la même période. Connaître la vitesse moyenne du vent ne suffit pas, et il s'agit ici d'obtenir l'évolution de la vitesse sur la période étudiée en collectant les contributions.

Nous prendrons une période de **24 heures** et comparerons trois jours de vent avec des vents moyens de **6 m/s** chacun mais avec un profil de distribution différent : [23]

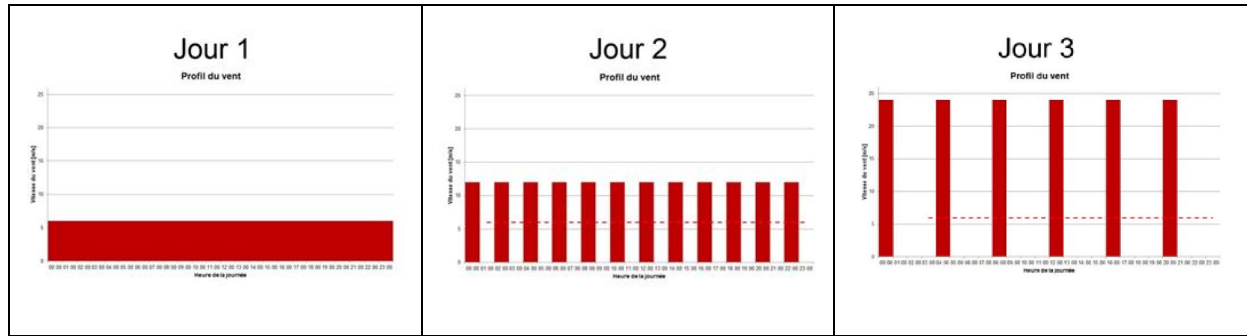


Figure III.3: Mesure de la vitesse du vent pendant trois jours. [3]

La vitesse moyenne sur les trois jours considérée est la même car le profil de distribution diffère très significativement entre ces trois jours. Un calcul simple permet de constater que la quantité d'énergie que le vent va délivrer en **24 heures** par mètre carré et par profil varie considérablement, de même que la densité de l'air, qui est d'une valeur d'environ **1,2 kg/m<sup>3</sup>** à **20 °C**, au niveau de la mer. [23]

- Jour 1 :  $24 [h] \times 06 [m/s]^3 \times 1 [m^2] \times 1.2 [kg/m^3] = 6220 Wh = 6.22 kwh$
- Jour 2 :  $12 [h] \times 12 [m/s]^3 \times 1 [m^2] \times 1.2 [kg/m^3] = 24880 Wh = 24.88 kwh$
- Jour 3 :  $06 [h] \times 24 [m/s]^3 \times 1 [m^2] \times 1.2 [kg/m^3] = 99530 Wh = 99.53 kwh$

## **Chapitre IV :**

# **Etude du système de stockage par tours à béton**

## IV.1 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.[25]



*Figure IV.1: 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 [24]*

## IV.2. 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, et 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.

### **IV.3. Conclusion**

#### **Nous concluons ce qui suit :**

- ✓ L'utilisation de réservoirs d'eau permet une bonne énergie électrique, mais la construction de ces réservoirs d'eau est difficile.
- ✓ L'expérience a permis que l'énergie éolienne puisse couvrir la consommation d'énergie d'une maison entière.
- ✓ Les éoliennes sont capables de générer suffisamment d'énergie pour pomper vers le réservoir au-dessus.
- ✓ En adoptant le système de stockage d'énergie STEP, il a pu fournir l'énergie appropriée.
- ✓ L'étude a permis au système de stockage local d'octroyer une production (basse énergie) à partir d'éoliennes.
- ✓ La construction des blocs de béton est facile par rapport aux réservoirs d'eau, et c'est ce à quoi nous sommes parvenus dans ce chapitre.

## **Conclusion Générale**

## **Conclusion générale**

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

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

A partir de notre étude précédente, nous avons atteint des aspects importants liés au stockage mécanique de l'énergie, car l'énergie générée à partir de l'hydroélectricité est bonne, mais elle reste difficile à réaliser, contrairement à l'énergie générée à partir de blocs de béton.

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

Parmi les notes que nous avons trouvées :

- ❖ La disponibilité de stockage de toutes sortes laisse une grande liberté à 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 le développement du stockage.

Les valeurs expérimentales font la différence par rapport aux valeurs appliquées.

## **Références bibliographiques**

## Références bibliographiques

- [1] Verneuil-en-Halatte, 2015. Note relative à la valorisation d'anciennes mines et carrières en Stations de Transfert d'Energie par Pompage (STEP) dans le contexte de la Transition Energétique. 13P
- [2] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/stockage-de-l-energie>. 14/5/2021. 10:11 h.
- [3] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/hydroelectricite-stations-de-transfert-d-energie-par-pompage-step>. 14/4/2021. 13: 15h.
- [4] <http://www.lesmazes.fr/decouvrir/le-village/la-centrale-hydraulique-de-revin-saint-nicolas-les-mazes.html>. 14/5/2021. 14: 25h.
- [5] CATHERINE, P.J., JEAN-FABRICE, B.2013. Le stockage massif de l'énergie. Ed : Panorama, 10p.
- [6] Le groupe EDF dans la transition énergétique ». Dossier de Presse du 18 avril 2013. [https://www.edf.fr/sites/default/files/contrib/groupe-edf/espaces-dedies/espace-medias/dp/dp\\_edf\\_groupe\\_transition\\_energetique.pdf](https://www.edf.fr/sites/default/files/contrib/groupe-edf/espaces-dedies/espace-medias/dp/dp_edf_groupe_transition_energetique.pdf) (08-06-2021)
- [7] Pierre-Louis Viollet, Stockage d'énergie par pompage hydraulique : STEP. Techniques de l'Ingénieur, BE8582 v1, 10 janv. 2014, <https://www.techniques-ingénieur.fr/base-documentaire/energies-th4/stockage-de-l-energie-42638210/stockage-d-energie-par-pompage->
- [8] 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.
- [9] <https://www.ecosources.org/step-station-transfert-energie-pompage-turbinage> (05-06-2021)
- [10] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/caes-stockage-par-air-comprime> (05-05-2021)
- [11] <https://www.smartgrids-cre.fr/encyclopedie/le-stockage-delelectricite/les-differentes-technologies-stationnaires-de-stockage-de-lelectricite> (25-05-2021)
- [12] Y. Brunet « technologie du stockage d'énergie » Lavoisier, ISBN 978-2-7462-2054-6, France, 2009.

- [13] A.Mirecki, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » ; Thèse de doctorat à l'Institut National polytechnique de Toulouse, France, 2005.
- [14] T. Saci « Etude du stockage inertiel d'énergie dans une chaîne de conversion éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation » Mémoire magister Option : Systèmes Electroénergétiques, université Bejaïa, 2008.
- [15] <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/qu-est-ce-que-le-stockage-de-l-energie-par-air-comprime> (02-06-2021)
- [16] Alami, A. H. (2020). Introduction to mechanical energy storage. Mechanical Energy Storage for Renewable and Sustainable Energy Resources, Springer: 1-12.
- [17] IBRAHIM, H., ILINCA, A., PERRON, J.,, Investigations des différentes alternatives renouvelables et hybrides pour l'électrification des sites isolés. Rapport interne, UQAR, UQAC, LREE-03, Septembre (2008).
- [18] O. Achkari and A. El Fadar, "Renewable energy storage technologies - a review," in Conférence Internationale en Automatique & Traitement de Signal (ATS-2018), Proceedings of Engineering and Technology –PET, vol. 35, pp. 69–79, 2018.
- [19] site web: <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/sites/ifpen.fr/files/inline-images/NEWSROOM/Regards%20%C3%A9conomiques/Etudes%20%C3%A9conomiques/Panorama%202013/08-VF-Panorama-2013-Le-stockage-massif-de-l-energie.pdf> (04-06-2021)
- [20] site web: <https://www.thinksmartgrids.fr/actualites/le-stockage-de-lenergie> (04-06-2021)
- [21] Kapsali M, Anagnostopoulos JS, Kaldellis JK. Wind powered pumped-hydro storage systems for remote islands: a complete sensitivity analysis based on economic perspectives. Appl Energy.
- [22] <http://www.chimix.com/an13/cap13/image/cap80.jpg> (01-06-2021)
- [23] <https://energieplus-lesite.be/theories/eolien8/rendement-des-eoliennes/> (29-05-2021)
- [24] <https://trustmyscience.com/wp-content/uploads/2019/01/energy-vault-vue-artiste-implementation.jpg>
- [25] La société suisse Energy Vault , web site: <https://energyvault.ch/>

## Résumé

Le stockage des énergies renouvelables est aujourd'hui un enjeu critique dans le monde, car le système qui produit l'énergie peut dépasser la demande, donc le surplus d'énergie restant nécessite de rechercher une méthode de stockage afin de pouvoir la consommer en cas de besoin. Dans le cas des cellules photovoltaïques ou solaires thermiques, le besoin se fera du jour au lendemain. Le même problème se pose pour le stockage électrique provenant des éoliennes, en cas de vents forts on peut dépasser la demande mais le surplus doit être réservé (stocké) pour les périodes où les vents sont faibles.

Ainsi, cette problématique incite les chercheurs à trouver des solutions adaptées pour répondre aux besoins énergétiques en cas de déficit.

### Mots clés :

Energies renouvelables, stockage, systèmes, éolien.

---

## Abstract

Storage of renewable energies today is a critical issue around the world, because the system that produces the energy may exceed demand, so the remaining energy surplus requires searching for a storage method so that you can consume it when needed. In the case of photovoltaic or solar thermal cells, the need will be overnight. The same problem is posed for electrical storage coming from wind turbines, in case of strong winds one can exceed demand but the surplus should be reserved (stored) for periods when the winds are weak.

Hence, this problem prompts researchers to find appropriate solutions to meet energy needs in the event of a deficit.

**Keywords :** Renewable energies, storage, systems, wind.

## الملخص

يعد تخزين الطاقات المتجددة اليوم معضلة حاسمة في جميع أنحاء العالم، بسبب أن النظام الذي ينتج الطاقة قد يتجاوز الطلب، لذا فإن فائض الطاقة المتبقية يتطلب البحث عن طريقة تخزين حتى تتمكن من استهلاكها عند الحاجة. في حالة الخلايا الكهروضوئية أو الشمسية الحرارية، ستكون الحاجة بين عشية وضحاها. يتم طرح نفس المشكلة للتخزين الكهربائي القادم من توربينات الرياح، في حالة الرياح القوية، يمكن للمرء أن يتجاوز الطلب ولكن يجب حجز الفائض (تخزينه) لفترات عندما تكون الرياح ضعيفة.

ومنه فإن هذه المشكلة تدفع الباحثين إلى إيجاد حلول مناسبة لتلبية احتياجات الطاقة في حالة حدوث عجز.

الكلمات المفتاحية : الطاقات المتجددة، التخزين، أنظمة، الرياح.