

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA

RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة عمار ثاويجي بالأغواط

UNIVERSITÉ AMAR TELIDJI-LAGHOAT

كلية التكنولوجيا

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

قسم الهندسة الميكانيكية

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Support de cours pour les étudiants

1^{ère} année master énergétique, énergie renouvelable
–Semestre 2–

Stockage d'énergie

Préparé par:

Dr. REGUE Hanane Maria

AVANT-PROPOS

Ce polycopié est destiné à être utilisé comme un manuel par les étudiants en première année master énergétique et énergie renouvelable dans le domaine de stockage d'énergie. Il a été rédigé dans le but d'avoir un outil de travail et de référence recouvrant les connaissances qui leur sont demandées. Pour répondre aux besoins en énergie, le stockage de l'énergie est nécessaire. Les énergies thermique et électrique sont difficilement stockables. L'énergie chimique est plus facilement stockable, sous forme de combustible ou de réactifs. Lors d'une conversion d'énergie, une forme d'énergie est transformée en une autre forme, ce qui peut être illustré par une chaîne énergétique. Avec l'augmentation de la consommation de l'énergie et la diminution des réserves d'énergies fossiles, des économies d'énergie sont indispensables.

Le manuscrit est constitué de cours, il est conforme aux programmes agréés par le ministère. Son contenu résulte de la lecture de nombreux ouvrages et documents dont les plus importants sont cités dans les références bibliographiques. En tenant compte de la nature de cette matière, de l'aspect pédagogique et du programme officiel, j'ai pensé qu'il est utile d'organiser ce polycopié en un chapitre Stockage d'énergie.

Table des matières

Liste des figures	5
Liste des tableaux.....	6
Chapitre I : Stockage de l'énergie	7
I.1 Introduction :	7
I.2 Intérêt :	7
I.3 Efficacité énergétique d'un stockage d'énergie :	8
I.4 Stockage des produits pétroliers :	9
I.4.2 Présentation des réservoirs de stockage :	10
I.4.2.1 Equipements et accessoire des bacs :	10
I.4.2.2 1.2.2. Equipements et accessoire des sphères :	11
I.4.3 Classification des réservoirs :	12
I.4.4 Classification des réservoirs selon le critère de pression :	12
I.4.5 1.3.2. Classification des réservoirs selon la nature des toits :	13
I.4.6 Classification selon la capacité des réservoirs :	13
I.5 Formes de stockage d'énergie :	13
I.5.1 Stockage mécanique :	14
I.5.1.1 Stockage gravitaire :	14
I.5.1.2 Stockage inertiel (volant d'inertie) :	16
I.5.1.3 Air comprimé	18
I.5.2 Stockage électrochimique et électrostatique (batteries).....	22
I.5.2.1 Définition.....	22
I.5.2.2 Principe de fonctionnement :	22
I.5.3 Technologies :	23
I.5.4 Stockage chimique (hydrogène où pile à combustible).....	29
I.5.4.1 Electrolyseur :	29
I.5.4.2 Moyen de stockage de l'hydrogène.....	30
I.5.4.3 Pile à combustibles	32
I.5.5 Stockage thermique et thermochimique : (chaleur sensible, chaleur latente).....	35
I.5.5.1 Stockage par chaleur sensible :	35
I.5.5.2 Stockage par chaleur latente.....	39
I.5.6 Nouvelles technologies de stockage d'énergie	41

I.5.6.1	Stockage de la chaleur par un fluide artificiel.....	41
I.5.6.2	Stockage de l'électricité par batterie Lithium-Ion	42
I.5.6.2.1	Domaine d'utilisations des batteries Lithium-Ion.....	43
I.5.6.3	Hydrogène	44
I.5.7	Coût du stockage d'énergie	45
Référence.....	Référence.....	47

Liste des figures

Figure I. 1 : Les différents types de réservoirs	10
Figure I. 2 : Principe de fonctionnement d'un stockage gravitaire [18]	14
Figure I. 3 : Le fonctionnement des STEP	15
Figure I. 4 : principe de fonctionnement de Volant d'inertie [18]	16
Figure I. 5 : Volant d'inertie	18
Figure I. 6 : Centrale électrique couplée avec une cavité géologique d'air comprimé [20].....	18
Figure I. 7 : Compresseurs avec un petit réservoir utilisé dans la menuiserie, ..., etc. [21].	19
Figure I. 8 : Schéma représentative un accumulateur électrochimique [23]	23
Figure I. 9 :	31
Figure I. 10 : Principe de fonctionnement d'une pile à combustible. [24].....	33
Figure I. 11 : Chaleur sensible et latente en fonction de la température	35
Figure I. 12 : Comparaison des volumes nécessaires au stockage d'une même quantité d'énergie thermique pour différents matériaux.	37
Figure I. 13 :(a) Four de verre à régénérateurs, (b) Briques réfractaires	38
Figure I. 14 : Mur de TROMBE [27].....	39
Figure I. 15 : Cycle énergétique du stockage de la chaleur par un fluide artificiel [29].	42
Figure I. 16 : Quantité du stockage d'électricité dans différentes technologies des batteries [30].....	43
Figure I. 17 : Les modes de production de l'hydrogène.....	44
Figure I. 18 : Caractéristiques des technologies de stockage, (coût, capacité et réactivité) [31].....	46

Liste des tableaux

Tableau I. 1 : Classification des réservoirs selon le critère de pression.....	12
Tableau I. 2 : Différentes technologies de stockage	14
Tableau I. 3 : Matériaux utilisés pour fabriquer un volant d'inertie [19]	17
Tableau I. 4 : Caractéristiques d'un accumulateur plomb acide [24]	24
Tableau I. 5 : Caractéristiques d'un accumulateur Nickel-Cadmium [24]	25
Tableau I. 6 : Caractéristiques d'un accumulateur Nickel-Zinc [24]	26
Tableau I. 7 : Technologies d'accumulateur au lithium	26
Tableau I. 8 : Caractéristiques de différents accumulateurs [24]	29
Tableau I. 9 : Caractéristiques des piles à combustibles [23].....	34
Tableau I. 10 : Caractéristiques des matériaux à changement de phase [28]	41

Chapitre I : Stockage de l'énergie

I.1 Introduction :

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, flux sur lesquels l'humain n'a aucun contrôle. Ce sont les énergies renouvelables, souvent issues du rayonnement solaire. Du point de vue physique, il n'y a jamais "production d'énergie", mais transformation d'une énergie disponible dans la nature.

Le stockage est la constitution d'un stock d'énergie potentielle à partir de flux d'énergie dont on n'a pas l'usage immédiat, pour en disposer plus tard, quand la demande sera plus importante.

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 eu lieu qu'à l'échelle de temps géologique (création du charbon, du pétrole et du gaz, formation des étoiles et des éléments radioactifs dans les noyaux des planètes...). Aujourd'hui, les stocks d'énergies fossiles s'épuisent, leur renouvellement étant infinitésimal à l'échelle de temps de la vie humaine, raison pour laquelle ces ressources sont appelées non-renouvelables et fossiles.[1]

I.2 Intérêt :

Le stockage d'énergie est un enjeu vital pour les sociétés humaines et l'industrie. Pour les États, l'indépendance énergétique est stratégique et économiquement essentielle. Pour les individus et les entreprises, l'énergie doit impérativement être disponible à la demande, sans coupure inopinée. Toute rupture d'approvisionnement a un coût économique et social élevé et en termes de santé et de sécurité, etc ; par exemple, une coupure de courant dans un hôpital peut avoir des conséquences désastreuses, ce pourquoi il est muni de plusieurs groupes électrogènes de secours et de stocks de carburant.

Le stockage d'énergie répond à trois motivations principales :

- sécurisation de l'approvisionnement en énergie d'un pays ou d'un groupe de pays ;
- ajustement de la production d'énergie en fonction de la demande ;
- compensation de l'irrégularité de la production des énergies dites intermittentes.

Le stockage de l'énergie consiste à préserver une quantité d'énergie (mécanique, thermique, électrique...) en cas de la suffisance pour une utilisation en cas de besoin. Le stockage d'énergie joue un rôle capital sur les plans économique, environnemental, géopolitique et technologique

I.3 Efficacité énergétique d'un stockage d'énergie :

Le stockage d'énergie est toujours suivi par l'opération inverse afin de récupérer l'énergie stockée (le déstockage) ; ces deux opérations de stockage/déstockage constituent un cycle de stockage. A la fin de chaque cycle de stockage le système retrouve son état initial (idéalement vide). Donc le rendement d'un cycle de stockage correspond au rapport entre la quantité d'énergie récupérée sur la quantité d'énergie stockée initialement.

Sauf pour les moyens naturels de stockage d'énergie ambiante, comme la lumière solaire dans la biomasse, le vent ou la pluie, le stockage d'énergie est associé à l'opération inverse : l'opération consistant à récupérer l'énergie stockée (le déstockage d'énergie). Ces deux opérations de stockage/déstockage constituent un cycle de stockage. À la fin d'un cycle, le système de stockage retrouve son état initial (idéalement "vide") ; on a alors régénéré le stockage.

L'efficacité énergétique d'un cycle correspond au rapport entre la quantité d'énergie récupérée sur la quantité d'énergie que l'on a cherché initialement à stocker. Ce rapport est généralement inférieur à 1, sauf pour les moyens naturels de stockage d'énergie ambiante où il peut être considéré comme infini (division par zéro), puisque personne ne fournit l'énergie à stocker, qui est de fait gratuite.

L'efficacité énergétique d'un cycle de stockage d'énergie dépend énormément de la nature du stockage et des systèmes physiques mis en oeuvre pour assurer les opérations de stockage et de déstockage.

Dans tous les cas, chacune des deux opérations de stockage et de déstockage induit invariablement des pertes d'énergie ou de matière : une partie de l'énergie initiale n'est pas réellement stockée et une partie de l'énergie stockée n'est pas réellement récupérée. Mais pour

de l'énergie ambiante naturelle, ces pertes influent surtout sur l'amortissement économique des investissements éventuellement nécessaires : la lumière du soleil arrive même si l'humain ne la capte pas.

I.4 Stockage des produits pétroliers :

I.4.1 Introduction :

L'industrie pétrolière a pour principale caractéristique la mise en œuvre de tonnages très importants d'hydrocarbure. Sous forme liquide ou gazeuse, elle se trouve dans l'obligation de prévoir d'énormes capacités de stockage. Cette tendance va s'accroître avec l'obligation faite par les nouvelles réglementations qui prévoient de constituer un stock équivalent à trois mois de consommation pour chaque pays en vue de se mettre à l'abri des pénuries éventuelles. À cet effet, on utilise des réservoirs de stockage de 30000 à 50000m³ voire même 100000m³. Compte-tenu du coût élevé de ces réservoirs, les activités de stockage sont considérées dans la plupart des cas comme des activités commerciales générant des ressources à travers des droits d'enlèvement pour rentabiliser les investisseurs de départ. Pour l'exploitation des réservoirs de stockage, il faut également prendre des précautions pour éviter l'évaporation des produits ou pour maintenir la fluidité de certains produits par réchauffage.

I.4.2 Présentation des réservoirs de stockage :

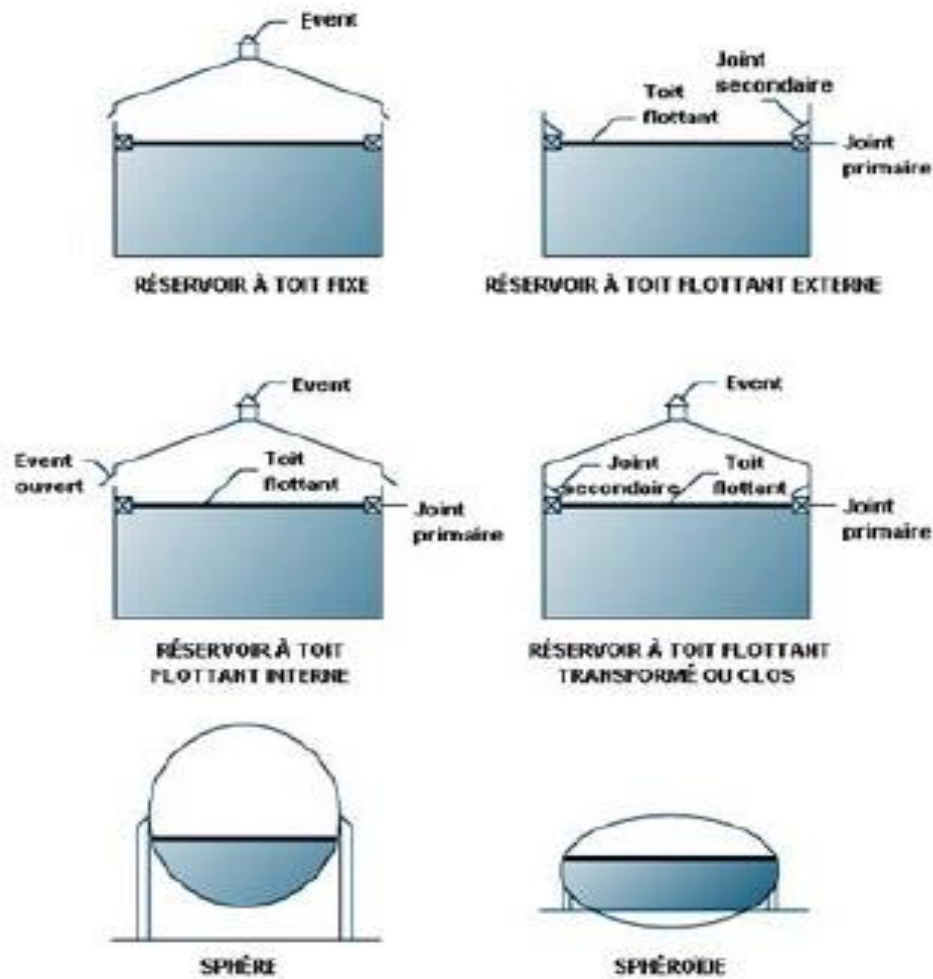


Figure I. 1 : Les différents types de réservoirs [2]

I.4.2.1 Equipements et accessoire des bacs :

- **Définition**

Un bac est un réservoir cylindrique et vertical destiné au stockage des hydrocarbures liquides.

- **Equipements des bacs**

- La lobe : C'est une paroi verticale constituée de tôles cintrées au diamètre du réservoir.
- La virole : C'est un anneau constitué de tôles dont la succession donne la lobe.
- La cuvette : C'est un compartiment construit autour d'un bac ou d'un ensemble de bacs destiné à recevoir le contenu du bac ou de l'ensemble de bacs en cas de tinte accidentelle.
- Le fond : C'est la base du réservoir et il est fait également d'un ensemble de tôles.
- L'assise : C'est la fondation sur laquelle repose le réservoir.
- Le toit : C'est la partie supérieure du réservoir, il est fait d'un assemblage de tôles.

Il peut être fixe ou flottant.

- **Accessoire des bacs**

- Accessoire de lutte contre la surpression

- Les événements : ce sont des ouvertures permanentes situées dans la partie supérieure du réservoir destinées à évacuer l'excédent de vapeur d'hydrocarbures par temps chauds
- Les soupapes : ce sont des dispositifs automatiques qui laissent s'échapper l'excédent de vapeur une fois que la pression de la phase gazeuse à l'intérieur du réservoir atteint une valeur limite ou critique. Cette pression est appelée pression de tarage.

- Accessoire de lutte contre l'incendie

- La couronne de mousse : extincteur de feux d'hydrocarbures (jaune-orangée).
- La couronne d'eau à refroidissement : refroidissement du bac (bleu ou rouge).
- Cuvette de rétention : circonscrit In lutte contre l'incendie à un périmètre limite

- Accessoire de mesure de niveau de produit

Sur certain réservoir (bac de stockage de fioul et de bitume), des accessoires appelés indicateurs de niveau à flotteur sont installés. Ils permettent de lire directement une règle graduée fixée sur la robe, la valeur du niveau de produits dans le réservoir grâce à un index se déplaçant devant la règle graduée.

- Accessoires de visite et nettoyage

Il s'agit des trous d'homme, des gardes de corps, des escaliers et des échelles.

- Accessoires de réchauffage

Dans le cas des fiouls, un système de réchauffage est prévu (serpentins tapissant le fond du réservoir). Le stockage du bitume en plus du système de réchauffage. Il est aussi prévu un calorifugeage (isolation thermique) couplé du réservoir.[3]

I.4.2.2 1.2.2. Equipements et accessoire des sphères :

- **Définition**

Ce sont des capacités sphériques destinées au stockage du GPL et particulièrement du butane.

- **Equipements**

- Equipements d'accès : escaliers, gardes de corps et les échelles.
- Equipement de visite trous d'homme

- Equipement de mesure de niveau de produit : télé jauge (sphères équipées de télé jauges.
- Equipements de sécurité : les soupapes, les couronnes d'eau et de mousse, les paratonnerres

I.4.3 Classification des réservoirs :

Les réservoirs utilisés sont classés selon trois critères :

- ✓ La pression développée par les produits stockés et supportable par le réservoir
- ✓ La Liât me du toit duré réservoir.
- ✓ Les capacités des réservoirs.

I.4.4 Classification des réservoirs selon le critère de pression :

Les produits pétroliers sont classés en quatre groupes suivant leur pression de Vapeur. A chaque classe ou groupe correspond des types particuliers de réservoirs qui se différencient essentiellement par la pression de service. La pression supportée par le réservoir est la somme de la pression hydrostatique créée par le liquide et sa pression de vapeur. La pression de vapeur doit varier dans les limites pour ne pas provoquer l'explosion du réservoir. Elle est maintenue entre ces limites par des soupapes.[3]

Tableau I. 1 : Classification des réservoirs selon le critère de pression [3]

CLASSEMENT DES PRODUITS STOCKES			Types de réservoir correspondant
N°de classe	Pression de vapeur aux T ⁰ de stockage	Exemple de Produits	
1	Pression de vapeur toujours supérieure à un bar.	Propane	Cigares
2	Pression de vapeur parfois légèrement inférieure à un bar.	Butane	Sphères
3	Pression de vapeur toujours inférieure à Un bar mais non négligeable.	Pétrole brut. Essences	Réservoirs dits « haute pression critique soupapes= 180g/cm ² . Réservoir dits « moyenne pression » : Pression critique soupapes =25g/cm ² .
4	Pression de vapeur négligeable.	Pétrole lampant. GO, Huile de graissage. Fioule. Bitume.	Réservoirs à événements.

I.4.5 1.3.2. Classification des réservoirs selon la nature des toits :

Selon l'utilisation du réservoir, il peut être à toit fixe, toit flottant ou toit fixe avec écran flottant.

❖ **Toit fixe**

Le toit fixe est solidaire de la robe. Ces réservoirs à toit fixe se présentent sous deux aspects :

- Aspect.
- Aspect de dôme.

Ils sont destinés à la classe quatre (04)

❖ **Réservoirs a toit flottant**

Ce type de toit est utilisé pour les réservoirs contenant des produits volatils. Ces réservoirs sont destinés à la classe trois (3). Le toit coulisse verticalement dans la robe et repose directement sur le produit dont il suit les niveaux de variation empêchant la formation de la phase gazeuse.

Toit fixe avec écran flottant

Ce type de toit va combiner les avantages du toit fixe et du toit flottant. Le toit fixe met le produit à l'abri de l'action des agents atmosphériques (eaux de pluie), l'écran interne comporte comme le toit flottant. Ce type de toit est utilisé pour le stockage du Jet A_J.

I.4.6 Classification selon la capacité des réservoirs :

Selon l'utilisation des réservoirs on distingue deux types de réservoirs :

- Les réservoirs de stockage : ce sont des réservoirs de grandes tailles qui sont affectés aux activités de réception de produits en provenance de la raffinerie. Leurs capacités sont supérieures à 20000 m³.
- Les réservoirs d'exploitation : ce sont des réservoirs de petites tailles destinés à des activités d'enlèvement de produits. Ils sont destinés à l'alimentation des postes de déchargement de wagons-citernes et ou de camions -citernes. Ils reçoivent du produit en provenance des réservoirs de stockage.[3]

I.5 Formes de stockage d'énergie :

Les technologies de stockage varient selon les sources d'énergie, par exemple, à mesure que la source d'énergie thermique est existante, on trouve le stockage thermique. Le classement de ces technologies est basé sur les phénomènes physico-chimiques qu'elles font intervenir. Le tableau suivant résume les différentes technologies de stockage :

Tableau I. 2 : Différentes technologies de stockage

Origine de l'énergie stockée	Technologie
Mécanique	-Hydraulique (gravitaire) - Volant d'inertie - Air comprimé
Electrochimique	Batteries - Hydrogène (piles à combustibles)
Thermique	-Chaleur sensible - Chaleur latente - Energie par sorption

I.5.1 Stockage mécanique :

Il existe plusieurs types de stockage mécanique ; stockage gravitaire, stockage inertiel et Stockage par air comprimé.

I.5.1.1 Stockage gravitaire :

Les installations de turbinage-pompage il consiste à pomper l'eau vers un réservoir située en altitude à l'aide d'une pompe électrique (phase de stockage). En phase de déstockage, l'énergie gravitaire hydraulique disponible est récupérée à travers une turbine couplée par un générateur comme (Figure 1.2). Ce type de stockage présente un bon rendement (70 à 80%) et un faible coût, mais il nécessite des sites adaptés.

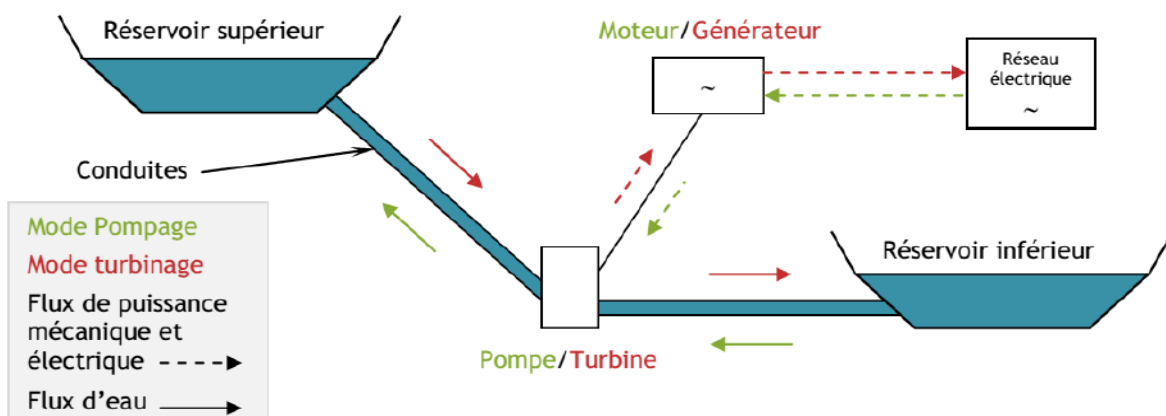


Figure I. 2 : Principe de fonctionnement d'un stockage gravitaire [4]

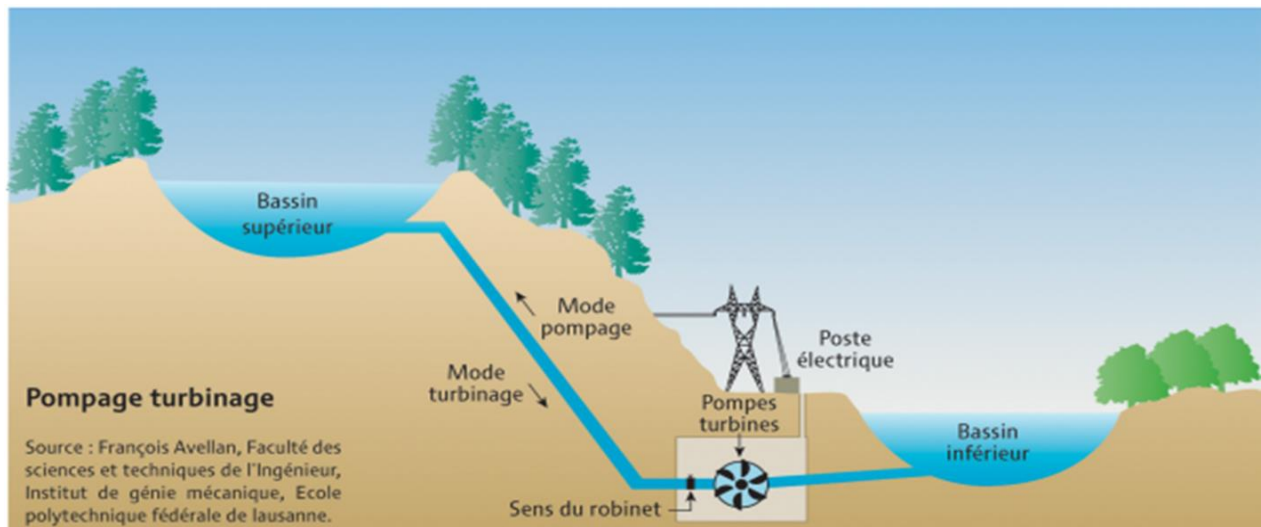


Figure I. 3 : Le fonctionnement des STEP [5]

- **Avantage des STEP :**

Technologie éprouvée et écologique : C'est une solution qui s'inscrit dans le cadre du développement durable. Le fonctionnement des STEP est éprouvé et totalement écologique. Il ne dépend d'aucun combustible, dans la limite où le pompage ne fait pas appel à de l'électricité d'origine thermique, haute densité de stockage ;

- optimisation de la gestion de stocks ;
- sécurité des personnels ;
- Réduction des coûts (diminution des coûts globaux résultant des réglages, des manutentions...).

- **Inconvénients des STEP**

- Coûts d'exploitation élevés
- La spécificité des sites à équiper et les investissements correspondants, leur éloignement par rapport aux grands centres de consommation, en particulier de ceux qui provoquent des pics de consommation, nécessite un transport d'énergie électrique sur d'assez grandes distances ce qui renchérit les coûts d'exploitation.
- Impact possible sur le paysage ;
- pertes d'énergie allant de 15% à 30%.

La durée de stockage de l'eau dans le bassin supérieur est quelconque et la quantité peut être importante (pouvant atteindre une centaine de millions de m³ d'eau). L'ensemble des matériels fait appel à une technologie classique, robuste, de très grande disponibilité.

I.5.1.2 Stockage inertiel (volant d'inertie) :

Un volant d'inertie est un système rotatif qui confère l'énergie cinétique à un élément (disque, cylindre...) de moment d'inertie J tournant à une vitesse Ω (voir figure I.4). La quantité d'énergie cinétique est proportionnelle au carré de la vitesse de rotation, donc :

$$E = \frac{1}{2}(J\Omega^2)$$

Avec J est le moment d'inertie qui dépend de la masse et du rayon du volant :

$$J = KmR^2$$

K est un constant dépendant de la géométrie d'élément tournant (pour un cylindre à paroi mince $K=1$). R et m sont respectivement le rayon et la masse du volant.

Afin de limiter les pertes de frottement, on place le volant dans une enceinte à vide et on utilise des paliers magnétiques pour assurer la rotation du volant sans contact. Un dispositif moteur/générateur monté directement sur l'arbre permet d'entraîner la masse à des vitesses très élevées (entre 8000 et 16000 tour/min) par l'application d'un couple de moteur électrique (phase de stockage). Par la suite, la masse continue à tourner même si le couple est nul (le moteur à l'état d'arrêt). L'énergie cinétique emmagasinée dans le volant d'inertie est récupérée par le générateur (phase de déstockage) ce qui par la suite ralentir progressivement la vitesse du volant.

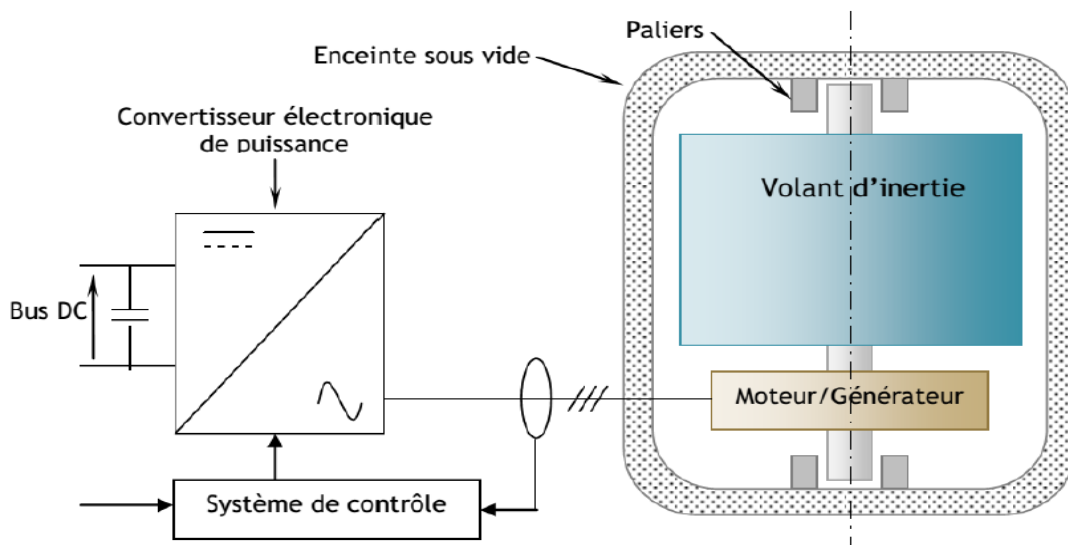


Figure I. 4 : principe de fonctionnement de Volant d'inertie [4]

Pour fabriquer un volant d'inertie, on prend par considération les forces centrifuges qui ne peuvent dépasser les contraintes de traction de matériau, donc, le choix du matériau est déterminé par sa résistance et sa vitesse périphérique maximale. Dans le tableau 1.3, on cite les données des différents matériaux utilisés pour fabriquer un volant d'inertie en forme d'un cylindre vide et mince avec un rayon interne $R_i = 20$ cm, un rayon externe $R_e = 25$ cm et d'épaisseur $h = 40$ cm.

- **Les avantages de ce type de stockage sont:**

- Rendement élevé (peut atteindre 90%)
- Phase de stockage très rapide par rapport à une batterie électrochimique
- Temps de réponse très court, permettant de réguler la fréquence du réseau
- Aucune pollution : ni combustible fossile, ni produits chimiques
- Technologies simples, fiabilité et peu d'entretien

- **Ses inconvénients sont:**

- Temps de stockage limité (environ 15 minutes).
- Durée d'utilisation faible (durée de récupération d'énergie est de 15 à 30 min).
- Risque des forces centrifuges dues à des vitesses de rotation importantes

Tableau I. 3 : Matériaux utilisés pour fabriquer un volant d'inertie [5]

Matériau	Fibre kevlar	Fibre de carbone	Fibre de verre	Alliage de titane	Acier de grande résistance	Alliage d'aluminium
Masse volumique (kg/m ³)	1800	1500	2000	4500	7800	2700
Résistance à la rupture (MN/m ²)	4800	2400	1600	1215	1300 à 2100	594
Vitesse maximal (m/s)	1633	1265	894	519	400 à 520	470
Densité énergétique (Wh/kg)	148.7	89.3	44.6	15.1	8.9 à 15.1	12.2

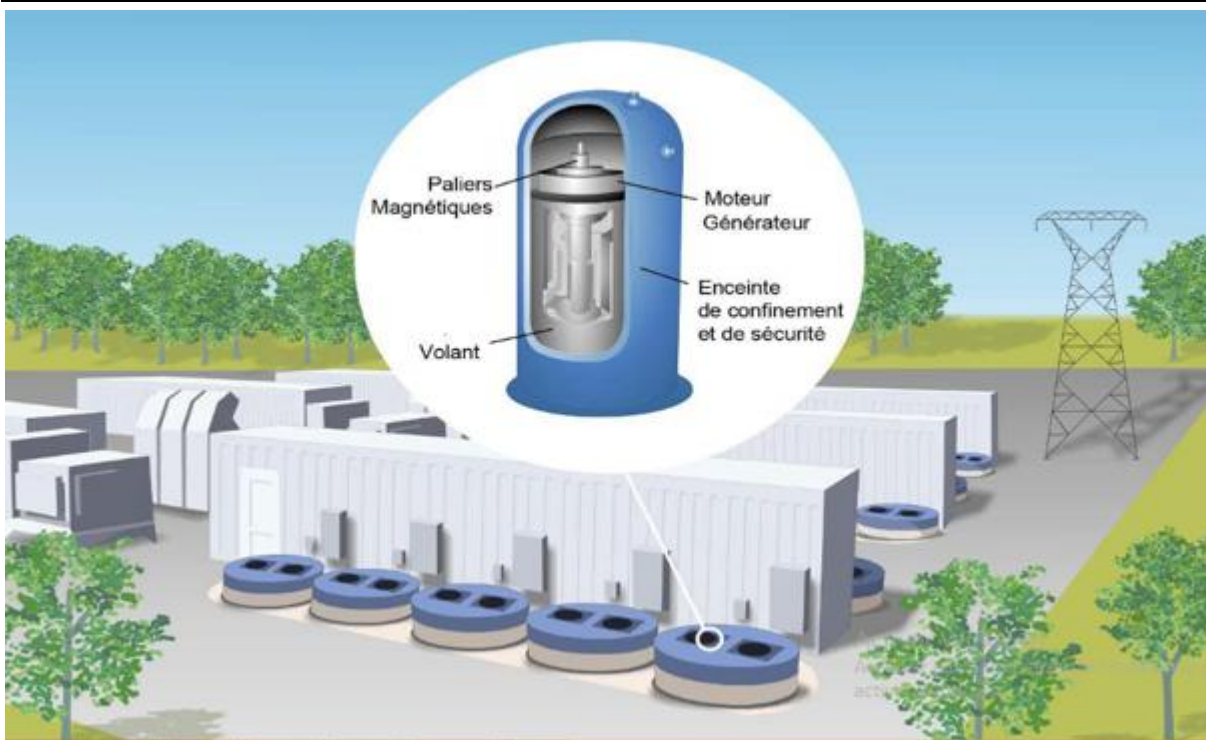


Figure I. 5 : Volant d'inertie

I.5.1.3 Air comprimé

Cette technique est basée sur la compression de l'air dans une enceinte (énergie stockée sous forme d'air à sous pression) qui peut être utilisé pour produire un travail mécanique. L'air est stocké soit dans de grande cavités géologiques (mines de sel, voir figure 1.6), soit dans des petites enceintes, dans des bouteilles ou réservoirs (compresseurs utilisés dans la menuiserie, voir figure 1.7).

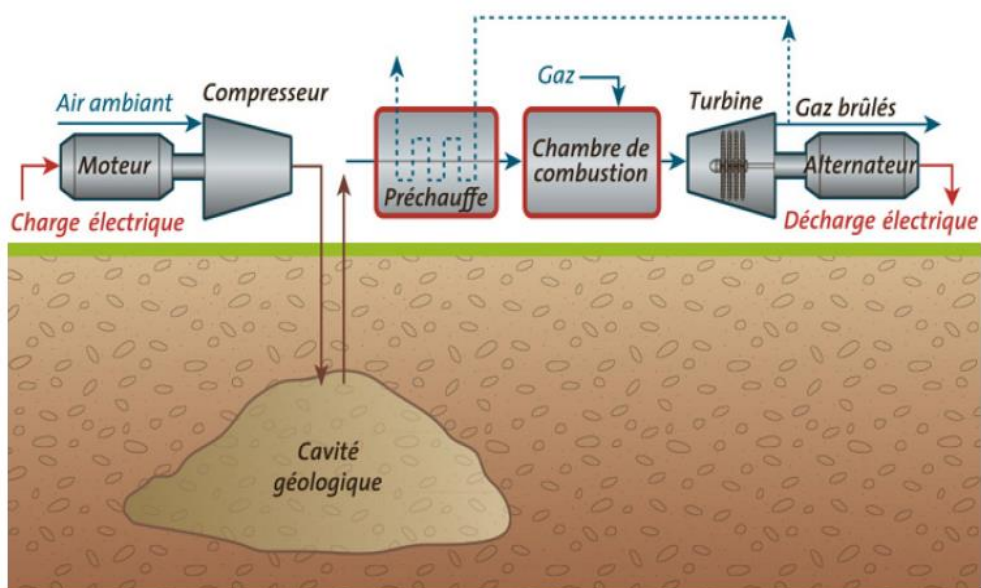


Figure I. 6: Centrale électrique couplée avec une cavité géologique d'air comprimé [6]

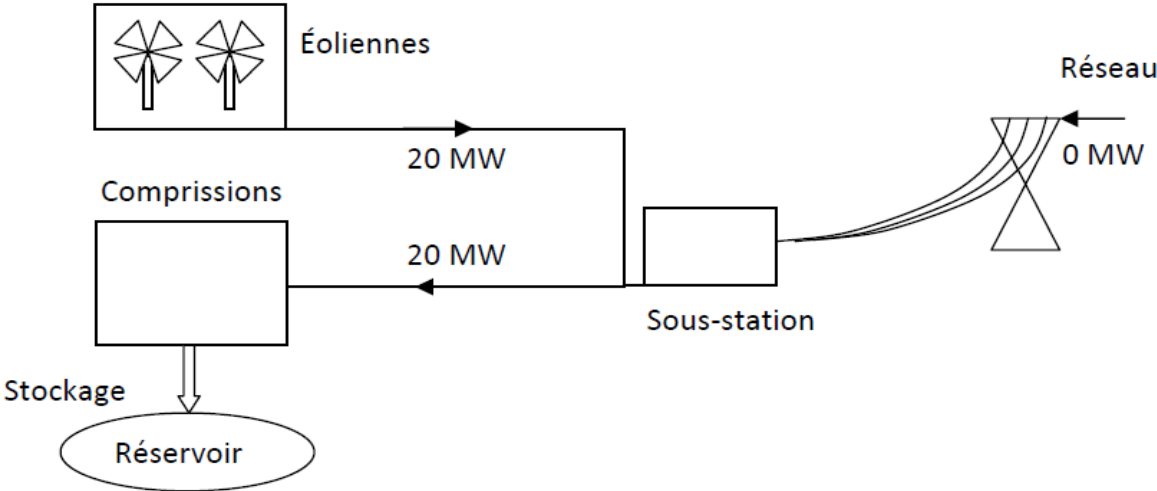


Figure I. 7 : Compresseurs avec un petit réservoir utilisé dans la menuiserie,..., etc. [7].

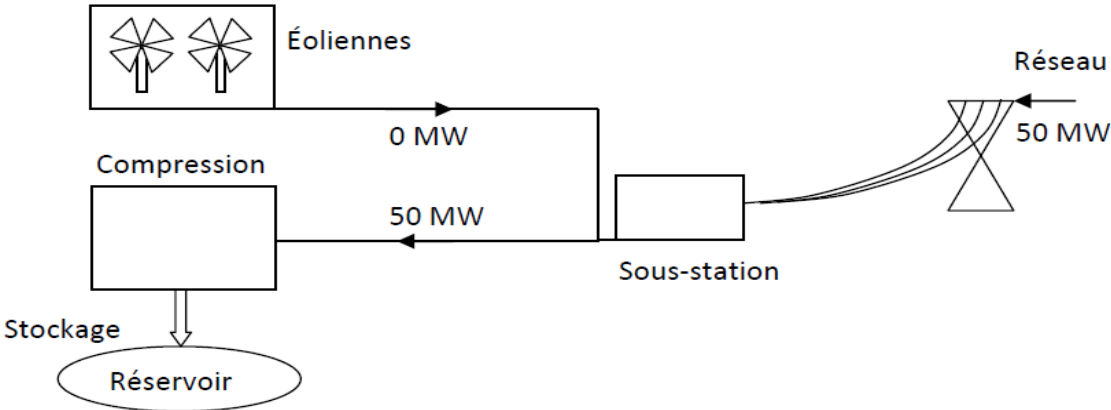
Pendant les périodes où il y a une forte demande d'électricité, on utilise l'air qui a été précédemment comprimé vers 200 bars et stocké pour mettre en mouvement une turbine à gaz. Cette énergie est améliorée en chauffant l'air dans une chambre de combustion avant de le restituer sous forme électrique grâce à un alternateur.

- **Couplage air comprimé/éolienne**

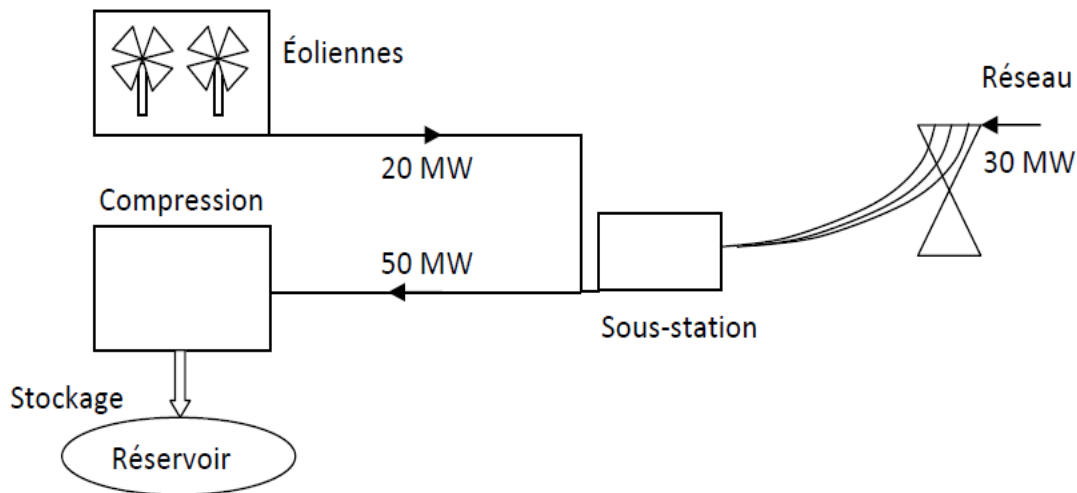
On peut réaliser une centrale flexible en associant une source de l'air comprimé avec une éolienne. Cette centrale peut être utilisée d'une manière quasi-permanente et bénéficiant du faible coût de fonctionnement de l'éolienne. La compression d'air (phase de stockage) est effectuée par l'un des trois différentes manières suivantes [8]:



- Compression : réseau utilisé pour comprimer l'air sans utiliser l'éolienne:

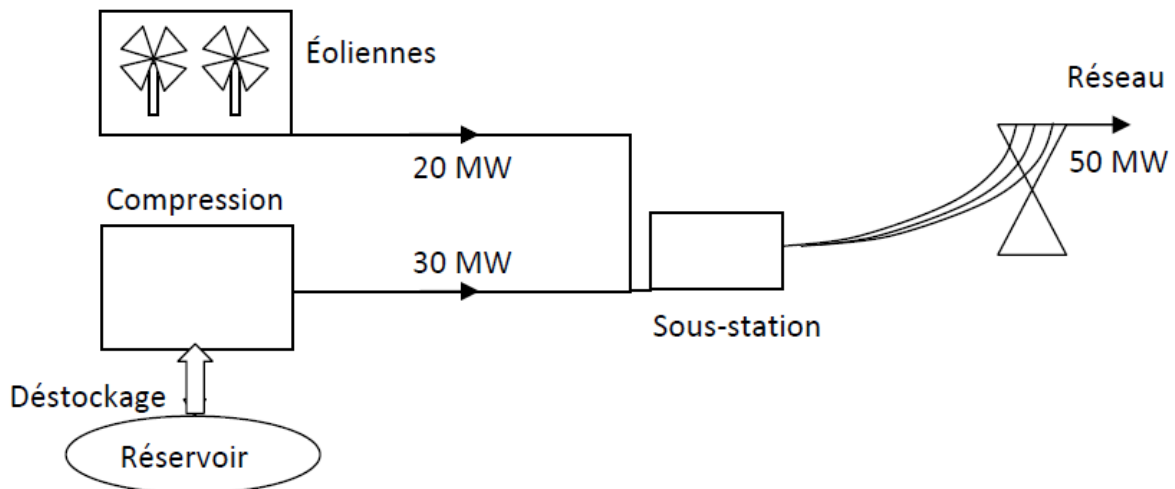


- Compression : réseau et l'éolienne utilisés pour comprimer l'air:



La génération de l'énergie est effectuée par la récupération d'énergie stockée dans l'air comprimé (phase de déstockage) plus l'énergie produite par les éoliennes, donc l'éolienne et l'air comprimé alimentent le réseau.

- Génération ; réseau et l'éolienne utilisés pour alimenter le réseau



- **Avantages et inconvénients**

Cette technique a des avantages importants, on en cite :

- faible coût;
- pas de pollution pour les échappements d'air et les fuites ;
- utilisation idéale en milieu explosif ;
- capacité de refroidissement ;
- peu sensible aux grands écarts de température (cas des forges et fonderies) ;
- peu sensible aux vibrations ;

- plus sécurisant que l'emploi de l'électricité.

Comme on a des avantages, cette technique a aussi des inconvénients dignes de mentionner

- difficulté d'obtenir des puissances constantes du fait de la compressibilité de l'air et des variations de pression lors de sa détente ;
- bruit des échappements ;
- opération de la compression n'est pas gratuite

I.5.2 Stockage électrochimique et électrostatique (batteries)

I.5.2.1 Définition

Une batterie c'est un dispositif capable de fournir une énergie électrique à partir d'une réaction chimique d'oxydoréduction. Ce type de stockage d'électricité est largement utilisé dans l'industrie, dans les équipements des véhicules automobiles. Une batterie est composée d'un ensemble d'accumulateurs électroniques en série où chacun ayant trois constituants de base (Fig. I. 8) :

- **L'électrode négative (l'anode)** : qui fournit les électrons au circuit extérieure par la réaction de réduction est généralement c'est un métal ;
- **L'électrode positive (cathode)** : qui accepte les électrons de circuit extérieur par la réaction de l'oxydation est généralement c'est un oxyde métallique ;
- **L'électrolyte (siège de réaction électrochimique)** : c'est un conducteur ionique de conductivité nulle pour les électrons, le passage du courant est assuré par le déplacement des ions sous l'effet du champ électrique résultant entre les deux électrodes, généralement c'est une solution aqueuse ;
- **Séparateur (membrane séparatrice)** : perméable à l'électrolyte.

I.5.2.2 Principe de fonctionnement :

Les réactions chimiques sont spontanées dans un accumulateur et mettent en jeu deux couples d'oxydoréduction de potentiels différents (cathode et l'anode). Durant la charge de l'accumulateur (phase de stockage), l'électrode positive (cathode) est le siège d'une réaction d'oxydation du couple de plus faible potentiel. Par contre, l'électrode négative (anode) est le siège d'une réaction de réduction de couple de plus haut potentiel. Durant la décharge (phase de déstockage) le phénomène s'inverse l'électrode positive se réduit tandis que l'électrode négative s'oxyde.

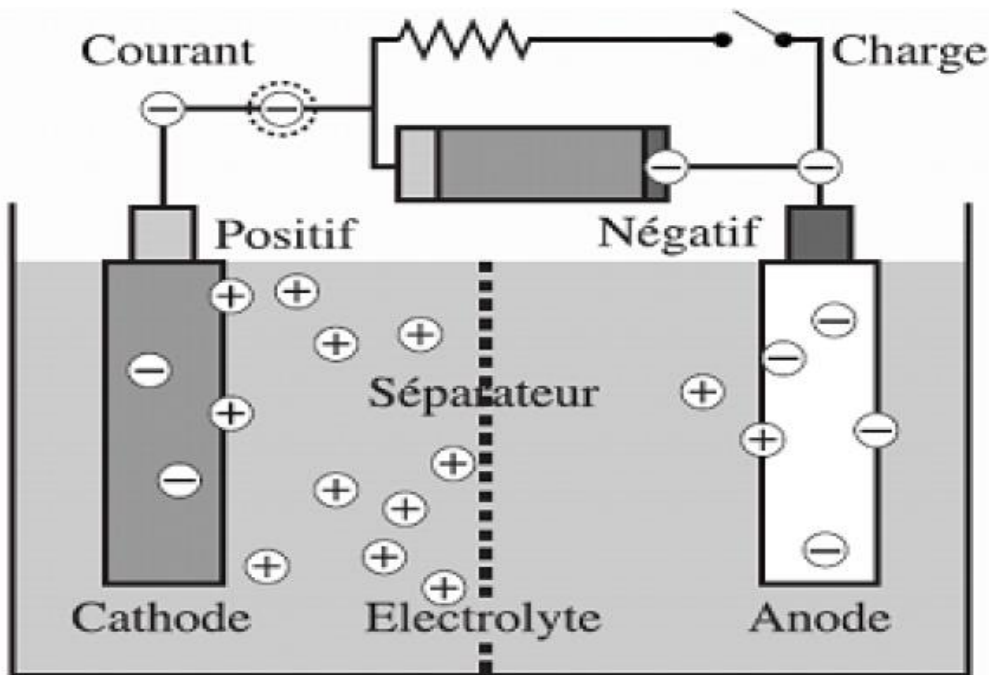


Figure I. 9 : Schéma représentative un accumulateur électrochimique [9]

I.5.3 Technologies :

Il existe diverses technologies d'accumulateurs électrochimiques, accumulateur au plomb, Accumulateur au nickel et accumulateur au lithium.

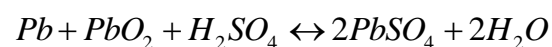
a- Accumulateur au plomb-acide

L'accumulateur au plomb acide à été inventé par Gaston Planté en 1839. On distingue différentes technologies d'électrodes (plaque plane ou plaque tubulaire) et d'électrolyte (liquide où gélifié).

Composition électrochimiques

- Electrode négative : Pb
- Electrode positive : PbO₂
- Electrolyte H₂SO₄ : (acide sulfurique)

Réaction électrochimiques



Pour ce type des accumulateurs (au plomb), il est très intéressant d'éviter une décharge supérieure de 80% pour d'éviter le phénomène sulfatation de l'accumulateur (accumulation de

sulfate sur l'électrode qui empêche la réaction sur l'électrode). On donne dans le tableau suivant les caractéristiques d'un accumulateur plomb-acide :

Tableau I. 4 : Caractéristiques d'un accumulateur plomb acide [10]

Tension à vide	2-2.1V
Capacité spécifique pratique	7 a 20 Ah/kg
Densité énergétique massique	15 à 40 Wh/kg
Densité énergétique volumique	40 à 100 Wh/dm ³
Durée de vie	200 à 400 cycles en version plaquent 600 à 1000 cycles en version tubulaire
Température d'utilisation	De -20°C à +60 °C
Rendement faradique global	Entre 85 et 90%
Autodécharge	0.5% par jour

L'avantage de l'accumulateur au plomb est son faible coût. Ses inconvénients sont :

- Une faible densité énergétique massique (car sa masse est élevée) ;
- Un faible courant de charge ;
- L'utilisation d'un liquide corrosif ;
- La nocivité due au plomb.

b- Accumulateur au nickel

Il existe plusieurs types d'accumulateur au nickel on en cite :

➤ **b.1. accumulateur Nickel-Cadmium**

- composition électrochimique
- électrode négative Cd (solide)
- électrode positive NiO(OH) (solide, hydroxyde de nickel)
- électrolyte KOH (solution alcaline de potasse)

Réaction électrochimique

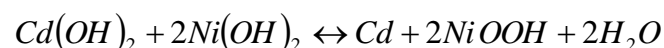


Tableau I. 5: Caractéristiques d'un accumulateur Nickel-Cadmium [10]

Tension à vide	1.25 – 1.3 V
Capacité spécifique pratique	30 à 50 Ah/kg
Densité énergétique massique	30 à 60 Wh/kg
Densité énergétique volumique	80 à 160 Wh/dm ³
Durée de vie	500 à 1000 cycles quand la décharge est 100% à chaque cycle. 500 à 10000 quand la décharge est 25% à chaque cycle
Température d'utilisation	Stockage -20°C à +45 °C Charge 0°C à +45 °C Décharge -20°C à +60 °C
Rendement faradique global	Entre 75 et 80%
Autodécharge	2% par jour

➤ **Les avantages des accumulateurs Ni-Cd sont :**

- Une grande capacité
- De bonnes performances à faible température
- Un bon niveau de fiabilité
- Une durée de vie élevée
- Une charge complète rapide de l'ordre de 15 min
- Possibilité de la récupération de toute l'énergie stockée (décharge complète)

➤ **Ses inconvénients sont les suivants**

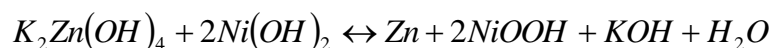
- Batterie très chère (coût environ de 1.5 fois plus chère que la batterie au Pb)
- Toxicité due au Cd.

b.2. Accumulateur Nickel-Zinc

L'accumulateur Ni-Zn à été développé en 1930, sa composition électrochimique est :

- Électrode négative Zn
- Électrode positive NiO(OH) (solide, hydroxyde de nickel)
- Électrolyte KOH (solution alcaline de potasse)

Réaction électrochimique



Les caractéristiques d'un accumulateur Ni-Zn sont données dans le tableau suivant :

Tableau I. 6: Caractéristiques d'un accumulateur Nickel-Zinc [10]

Tension à vide	1.7 V
Capacité spécifique pratique	45 Ah/kg
Densité énergétique massique	60 à 70 Wh/kg
Densité énergétique volumique	120 Wh/dm ³
Durée de vie	600 à 1000 cycles
Température d'utilisation	-20°C à +60 °C

➤ **Les avantages de l'accumulateur au Ni-Zn sont :**

- Son cout moins cher que Ni-Cd
- Une tension d'utilisation 25% supérieure à celle de Ni-Cd
- Fiable

➤ **Son principal inconvénient, c'est qu'il présente une faible durée de vie.**

c- Accumulateur au lithium

Pour les accumulateurs au lithium, on distingue quatre technologies selon la construction de l'électrode négative et la composition de l'électrolyte. On résume ces technologies dans le tableau suivant :

Tableau I. 7 : Technologies d'accumulateur au lithium

technologie	Li-métal	Li-ion	Li-métal polymère	Li-métal polymère ou plastique
Electrode négative	Lithium métallique	Matériau à insertion de Li	Lithium métallique	Matériau à insertion de Li
électrolyte	liquide	Liquide	polymère	polymère

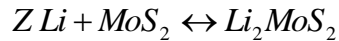
c-1. Accumulateur lithium-métallique

Les batteries basées sur la technologie lithium-métallique ont été exploitées dans les années 1980. Leur composition électrochimique est :

- Electrode négative : lithium métallique (Li) ;
- Electrode positive : composée d'insertion de lithium, ce qui permet aux ions lithium Li⁺ de passer d'une électrode à l'autre ;

- Electrolyte : l'électrolyte est une solution d'un sel de lithium dans un solvant organique ou un sel de LiAsF₆ (n'est pas aqueux car le lithium est très réactif vis-à-vis de l'eau).

Réaction électrochimique (avec une cathode à base de sulfure de molybdène) :



Durant la charge, électrode positive (cathode) est le siège d'une oxydation. Les ions Li⁺ traversent l'électrolyte et vont à l'anode (ou électrode négative) où ils se soumettent une réduction. Les électrons produits lors de la réduction alimentent alors le circuit électrique extérieur et durant la décharge, la réaction s'inverse. A l'électrode négative, il y a donc insertion de l'ion lithium lors de la décharge et désinsertion lors de la charge.

Les inconvénients de l'accumulateur lithium-métal sont :

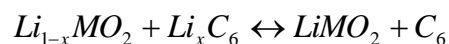
- problème de sécurité due aux dendrites qui peuvent provoquer une instabilité jusqu'à l'emballement thermique ;
- phase de charge relativement lente.

c-2. Accumulateur lithium-ion

La technologie de l'accumulateur lithium-ion est réalisée en 1991 par Sony. Sa composition électrochimique est :

- Electrode négative : matériau permettant l'insertion de lithium (graphite LiC₆, coke Li_{0.5}C₆, titane LiTiS₂...etc.) ;
- Electrode positive : un composé permettant l'insertion ou la désinsertion de l'ion Li⁺, (oxydes de métaux de transition lithiés LiCoO₂, LiNiO₂ et LiMn₂O₄ ;
- Electrolyte : un liquide qui n'est pas aqueux et qui ne peut contenir ou fournir des protons pour éviter de dégrader les électrodes très réactives (LiPF₆)

Réaction électrochimique : (M est un métal, pouvant être Ni, Co ou Mn par exemple)



La technologie d'un accumulateur Li-ion est la même que celle-ci d'un accumulateur Li métal sauf que l'électrode négative est également un composé d'insertion, empêchant le contact direct du Lithium à l'état métal avec l'électrolyte.

➤ **Les avantages de l'accumulateur Lithium-ion sont :**

- une densité énergétique massique très élevée (de 2 à 5 fois que celle pour Ni-MH) ;
- un faible encombrement ;
- une faible autodécharge.

➤ **Ses inconvénients sont les suivants :**

- sécurité (échauffements qui peuvent conduire à l'explosion) ;
- coûteuses.

c-3. Accumulateur lithium- Li-métal polymère

L'accumulateur Lithium-métal Polymère (LMP) remplace les accumulateurs Li-ion afin de résoudre les problèmes en termes de sûreté de fonctionnements provoqués par l'électrolyte liquide. La composition électrochimique de ce type d'accumulateur est :

- Electrode négative : Li sous forme de films fins métalliques ;
- Electrode positive : composé d'insertion réversible (exemple : l'oxyde de vanadium V_6O_{13} , LiV_3O_8 ou TiS_2) ;
- Electrolyte : membrane polymère POE-LiX (poly-oxyde d'éthylène chargé en ions lithium) associée à un solvant aprotique liquide.

Pour assurer un fonctionnement optimal de ce type d'accumulateur, il devrait maintenir l'électrolyte à la température de 80 à 100°C.

➤ **Les avantages de l'accumulateur LMP sont les suivants :**

- une faible masse ;
- performances spécifiques élevées ;
- autodécharge : 10% par mois ;
- une longue durée de vie (ordre de 10 ans) ;

Permet d'éviter des problèmes de sécurité que l'on peut enregistrer pour les accumulateurs à électrolytes liquides.

➤ **Ses inconvénients sont :**

- un risque de dendrites associé à l'électrode de lithium.

c-3. Accumulateur lithium- Li-ion polymère

La technologie de ce type d'accumulateur (Lithium-ion Polymère) est basée sur l'insertion de lithium pour les deux électrodes.

Composition électrochimique

- Electrode négative : idem Li-ion
- Electrode positive : idem Li-ion
- Electrolyte : plastifié, constitué d'une matrice poreuse telle que le copolymère PVDF-HFP (polyfluorure de vinylidène et hexafluoropropylène).

➤ **Les avantages de l'accumulateur Lithium-ion polymère sont :**

- une faible masse ;

- un nombre de cycles élevé ;
- pas d'effet mémoire ;
- une faible autodécharge.

Dans le tableau suivant, on donne une synthèse des caractéristiques (tension à vide et énergie spécifique) des accumulateurs :

Tableau I. 8: Caractéristiques de différents accumulateurs [10]

type	Pb-acide	Ni-Cd	Ni-MH	Ni-Zn	Li-ion	LMP	LiPo
Tension (V)	2	1.3	1.3	1.7	3.7	3.7	3.7
Energie (Wh/kg)	15-40	30-60	60-90	60-70	90-180	110	120-140

I.5.4 Stockage chimique (hydrogène ou pile à combustible)

Au même titre que les moyens de stockage électrochimique, le stockage par la filière hydrogène nécessite une transformation d'énergie électrique en dihydrogène H₂ puis une deuxième transformation du dihydrogène en électricité (stockage indirect de l'énergie).

➤ Ce système de stockage comprend donc trois composants essentiels qui sont :

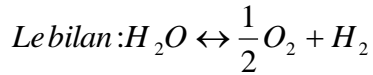
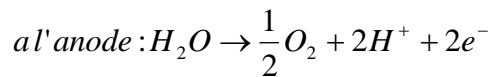
- l'électrolyseur (transformation de l'énergie électrique en dihydrogène) ;
- le moyen de stockage de l'hydrogène ;
- la pile à combustible (permet la génération d'électricité à partir de l'hydrogène et de l'oxygène de l'air).

I.5.4.1 Electrolyseur :

L'électrolyseur permet de transformer l'énergie électrique en dihydrogène par l'électrolyse de l'eau. Il existe deux catégories de l'électrolyseur :

- Solide : où bien un polymère utilisant une membrane échangeuse de proton (PEM : Proton Exchange Membrane) et une céramique haute température (SO : Solid Oxyde).
- liquide, électrolyte acide ou basique du type hydroxyde de potassium (KOH).

Réaction électrochimique en milieu acide :



I.5.4.2 Moyen de stockage de l'hydrogène

Dans les années 1980, une production de masse d'hydrogène avait été envisagée pour stocker de façon indirecte l'énergie électrique. L'idée consistait à profiter des heures creuses de consommation pour faire fabriquer par les centrales nucléaires de l'hydrogène par électrolyse de l'eau.

Cela présentait l'avantage d'assurer une marche sans contraintes thermiques des équipements de génération de vapeur des centrales nucléaires et à maintenir constante leur production d'électricité.

Ce projet a été rapidement abandonné pour des raisons économiques et technologiques. (à l'époque on ne savait pas reconvertir l'hydrogène en énergie électrique sans utiliser de piles à combustibles).

Aujourd'hui on sait brûler l'hydrogène dans des centrales électriques spécialement équipées, et l'hydrogène stocké peut être considéré comme un stockage indirect de l'électricité.

Il s'agit de la conversion de l'électricité en hydrogène. En cas de surplus de production, l'électricité est utilisée pour séparer des molécules d'eau (H₂O) en hydrogène (H₂) et en oxygène (O₂) (électrolyse de l'eau). Contrairement à l'électricité, l'hydrogène converti en méthane est stockable sur de longues durées. L'hydrogène ainsi produit peut alors être valorisé de différentes manières :

être injecté dans les réseaux de gaz naturel, en l'état (dans une limite d'environ 20%), ou après avoir été associé à du CO₂ pour le convertir en méthane de synthèse alimenter des véhicules à hydrogène ; être consommé à des fins industrielles ; être reconverti en électricité via une pile à combustible. La conversion en hydrogène est en cours d'expérimentation et montre un intérêt technique.

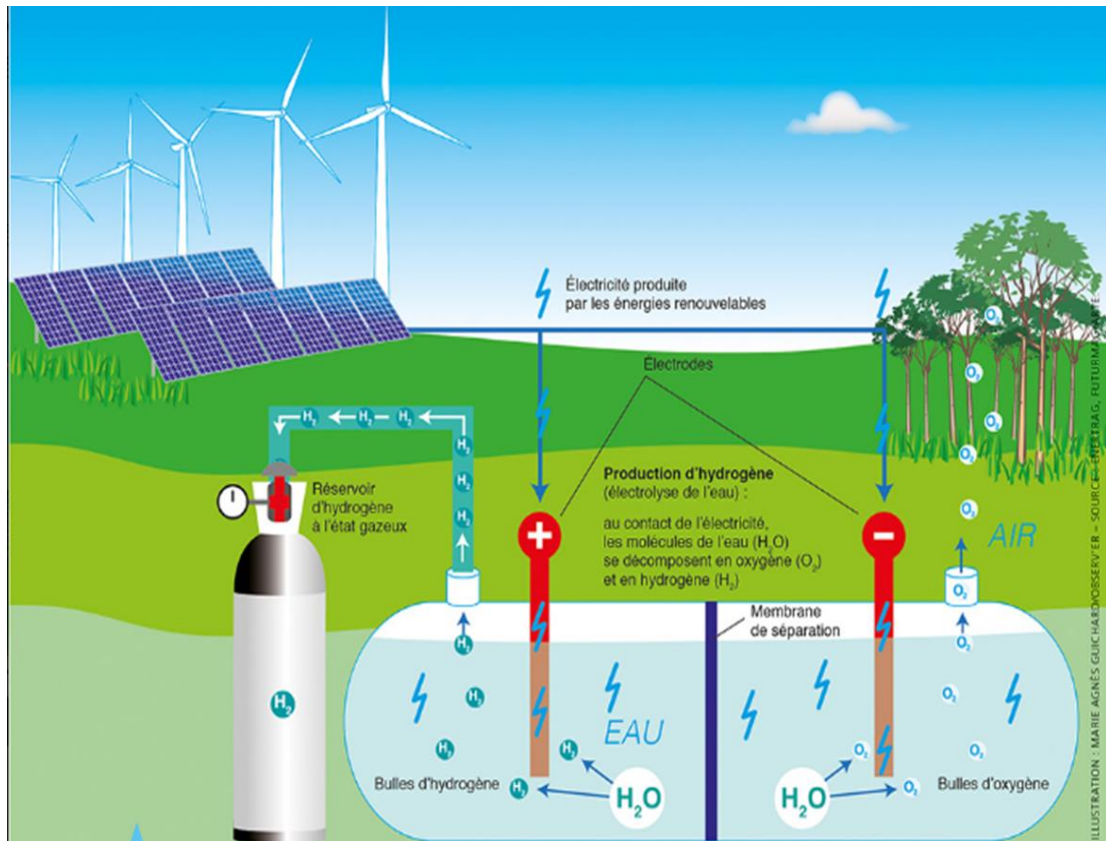


Figure I. 10 : Le stockage de l'hydrogène

Le stockage de l'hydrogène peut être effectué sous plusieurs formes :

- **forme gazeuse** : elle consiste à comprimer le gaz afin de minimiser le volume de stockage ce qui conduit à l'utilisation des réservoirs capables de résister à des pressions allant jusqu'à 700 bar. L'élévation de température due à la compression rapide du gaz nécessite l'emploi des systèmes de refroidissement. Cette façon de stockage consomme environ 10% de l'énergie primaire.

- **forme liquide** : pour maintenir l'hydrogène à l'état liquide il faudra abaisser sa température au voisinage de -253°C ce qui exige donc un équipement cryogénique. Dans ce cas là, l'énergie utilisée pour maintenir l'hydrogène à cette température est de l'ordre de 30% de l'énergie stockée. Ce moyen de stockage nécessite les aspects de sécurité, ainsi que les pertes lors du stockage (autodécharge) doivent être prises en compte.

- **forme solide** : C'est une forme de stockage très complexe qui permet à celui-ci de se stocker entre les atomes d'un métal (ou alliages).

Le stockage de l'hydrogène et sa distribution représente un défi important notamment avec l'existence des contraintes supplémentaires, telles que la haute diffusivité, la très faible densité (forme gazeuse ou liquide), et l'inflammabilité

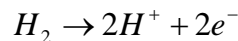
1.5.4.3 Pile à combustibles

a- Historique et principe de fonctionnement

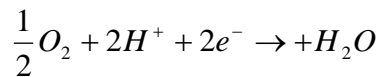
Le premier énoncé de principe de l'électrolyse inverse est lancé en 1802 par Sir Henry David. Cet énoncé met en évidence la possibilité de produire de l'électricité et de la chaleur à partir de la réaction chimique entre le dioxygène et le dihydrogène. En 1839, L'anglais Sir William-Robert Grove réalise la première pile à combustible produisant de l'électricité, de la chaleur et de l'eau en utilisant des électrodes de platine poreux et de l'acide sulfurique comme électrolyte. Bien que leur principe soit connu depuis longtemps (plus de 200 ans) mais les applications sont encore aujourd'hui au stade du développement. Donc, une pile à combustible est un générateur qui convertit directement l'énergie de la combustion de l'hydrogène avec l'oxygène en énergie électrique.

Réaction électrochimique :

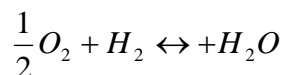
À l'anode, on a donc une oxydation électrochimique de l'hydrogène :



À la cathode, on observe la réduction de l'oxygène



Le bilan global est alors :



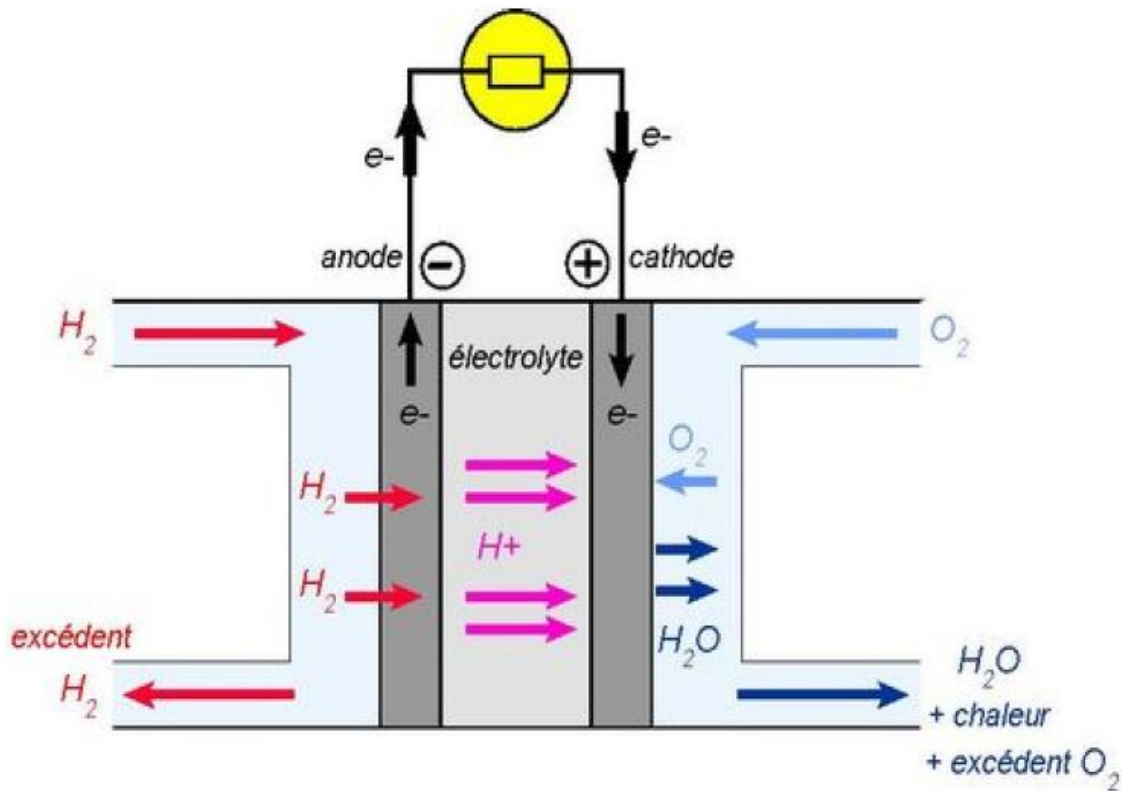


Figure I. 11 : Principe de fonctionnement d'une pile à combustible. [10]

b- Différents types des piles à combustibles

Les piles à combustible peuvent être classées selon plusieurs critères qui se sont ; l'électrolyte utilisé, la température de fonctionnement, le dimensionnement et l'application:

- **Piles à combustibles à membrane échangeuse de protons (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)** ; ce type des piles fait l'objet de réalisations dans tous les domaines : stationnaire, automobile et portable.
- **Piles à combustibles à oxyde solide (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)** ; valable dans les applications stationnaires ayant des températures de fonctionnement élevée et du temps de démarrage important. Elle se prête particulièrement bien à la production d'électricité décentralisée et à la cogénération.
- **Piles à combustibles à alcaline (Alkaline Fuel Cell, AFC)** : utilisée comme un générateur d'électricité des sous-marins et dans le domaine des transports (véhicules militaires, taxis hybrides...etc.).

- **Piles à combustible à carbonate fondu (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC)** : elles sont en concurrence avec les piles à combustible à oxyde solide. Les puissances électriques des installations actuelles vont de quelques centaines de kilowatts à quelques mégawatts. Les installations de forte puissance forment des centrales électriques. Les installations de puissance moyenne soit utilisées pour alimenter les industries, les bâtiments publics et les bateaux.

- **Piles à combustibles à acide phosphorique (Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC)** : ce type des piles à combustibles est largement commercialisé. Il est destiné principalement aux applications stationnaires à haute puissance (quelques dizaines de mégawatts) comme les groupes d'habitations ou des bâtiments publics.

- Le tableau suivant présente les caractéristiques de différentes technologies des piles à combustibles :

Tableau I. 9 : Caractéristiques des piles à combustibles [9].

Type	Electrolyte	Puissance MW	Température	Rendement
AFC	Hydroxyde de potassium	0.01 a 0.1	60 à 90 °C	60 à 70%
PEMFC	Membrane polymère Nafion-PBI	Jusqu'à 0.5	60 à 220 °C	50 à 70%
PAFC	Acide phosphorique	Jusqu'à 100	Environ de 200°C	55 %
MCFC	Carbonate de métaux alcalins	Jusqu'à 100	Environ de 650°C	55 %
SOFC	Céramique	Jusqu'à 100	800 à 1050 °C	60 à 65 %

c- Avantages et inconvénients des piles à combustibles

- **Les avantages des piles à combustible sont :**
 - Elles produisent de bon rendements énergétiques ;
 - Elles sont silencieuses ;
 - Elles prennent peu de place ;
 - Elles peuvent fonctionner à basses et à hautes températures

- Elles permettent une construction modulaire ;
- Elles demandent peu d'entretien ;
- Elles produisent de l'eau et dégagent peu de gaz à effet de serre.

- **Leurs inconvénients sont les suivants :**

- L'inexistence d'hydrogène à l'état nature sur notre planète ;
- Leurs faibles tensions (1 V) nécessitent la mise en série de cellules ;
- La densité du courant reste de l'ordre 1 A.cm² ;
- Coût ; technologie très chère (catalyseurs, membrane, collecteur de courant, ...etc.) ;
- Gestion thermique (étanchéités à haute température).

I.5.5 Stockage thermique et thermochimique : (chaleur sensible, chaleur latente)

Le stockage d'énergie thermique peut se faire généralement sous forme de chaleur sensible (accompagnée par une variation de température), chaleur latente (changement de phase à température constante).

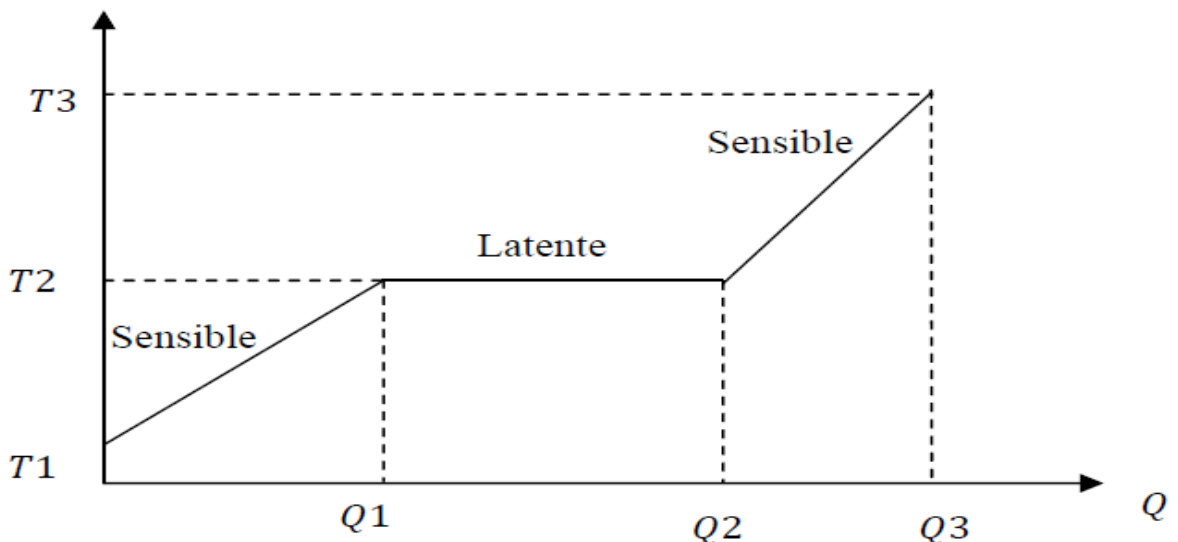


Figure I. 12 : Chaleur sensible et latente en fonction de la température

I.5.5.1 Stockage par chaleur sensible :

Dans le stockage par chaleur sensible, la température du matériau varie avec la chaleur transférée. Si h est l'enthalpie massique du matériau, la variation de la quantité de chaleur Q échangée par le matériau lorsqu'il passe d'un état initial à un état final est

$$Q = m(h_f - h_i) \text{ ou } Q = mC_p(T_f - T_i)$$

C_p est la capacité thermique massique de matériau. Plus la capacité thermique des matériaux est importante, plus il y a possibilité d'emmagasiner un maximum d'énergie. Donc le classement du type de stockage par chaleur sensible dépend du matériau et du milieu de stockage. On distingue : stockage par un fluide (l'eau, l'huile, ...) et stockage par un solide (pierre, métaux, ..).

a- Stockage de chaleur sensible par un fluide

➤ a-1. Stockage par l'eau

Vu la capacité calorifique importante de l'eau (4185 J/kgK à 20 °C, la plus grande par rapport aux autres corps), il représente le meilleur milieu pour le stockage aux faibles températures (25 à 90°C) où il peut stocker 2.5 10⁵ kJ/m³ pour une variation de température de 60°C. De plus, l'eau n'est pas chère et facilement disponible et aussi peu utilisable comme milieu de transport d'énergie.

Réservoir de stockage : pratiquement il y a une compatibilité entre l'eau et plusieurs matériaux pour fabriquer les réservoirs comme l'acier, l'aluminium, le béton, la fibre de verre, etc. et le choix dépend de l'application. Pour l'isolation on utilise généralement la laine de verre, la laine minérale ou le polyuréthane.

➤ a-2. Stockage par les autres fluides

Les liquides utilisés pour le stockage par chaleur sensible sont généralement des huiles organiques ou des sels fondus ayant des capacités thermiques massiques de 25 à 40 % que celle de l'eau. On cite :

- **Les huiles organiques** : elles ont une pression de vapeur plus faible que celle de l'eau elles peuvent être utilisées à des températures supérieures à 300°C mais inférieures à 350°C afin d'éviter leur décomposition.

- **Les sels fondus** : le plus courant est l'hydroxyde de sodium, il a un point de fusion de 320°C et il est possible d'utiliser une température supérieure à 800°C. mais il est fortement corrosif et il est difficile à stocker à fortes températures.

- **Les métaux liquides** : la plupart de leurs propriétés sont similaires à celles de l'eau. Ces liquides ont une grande conductivité thermique.

Réservoirs de stockage : pour éviter la corrosion des réservoirs de stockage due aux sels fondus et aux métaux liquides, l'acier inoxydable 304 est le matériau le plus valable pour ce type de stockage.

b- Stockage de chaleur sensible par un solide

La difficulté due à la grande pression de vapeur d'eau dans le stockage à haute température, conduisent à stocker la chaleur sensible à l'aide d'un solide en éliminant le risques de fuite. Les matériaux utilisés pour le stockage thermique aux faibles et aux hautes températures sont généralement les pierres, les métaux, le béton, le sable et la brique.

La récupération d'énergie thermique se faisant à l'aide d'un flux d'air (convection), la taille des pierres est alors un facteur de choix important (surface d'échange). Les pierres et le béton peuvent stocker de l'ordre 36 kJ/kg ou 105 kJ/m³.

- Sur la figure suivante on compare les volumes nécessaires au stockage d'une même quantité d'énergie thermique pour un même écart de température par trois types de corps.

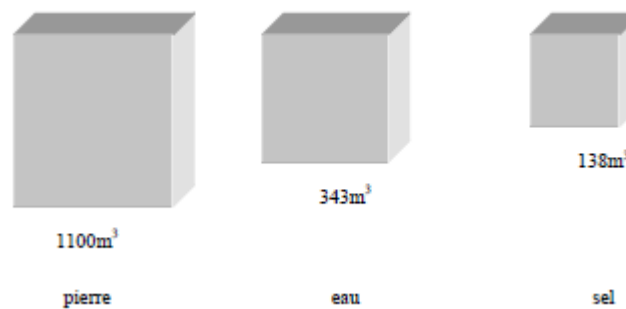


Figure I. 13 : Comparaison des volumes nécessaires au stockage d'une même quantité d'énergie thermique pour différents matériaux.

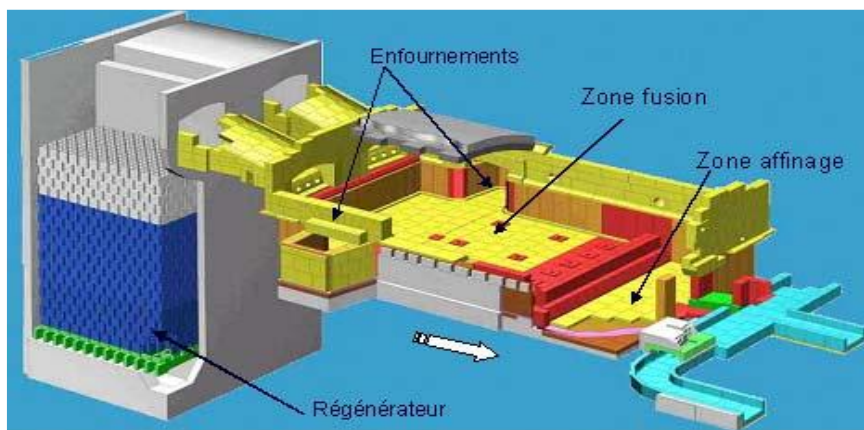
Technologie de stockage de chaleur par un solide

- Régénérateurs des fours à flammes

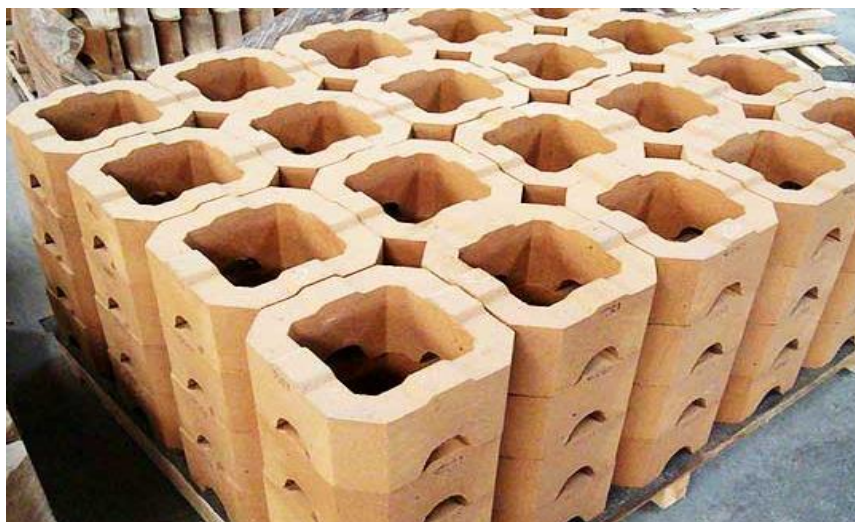
On trouve l'application de ce type de stockage dans les industries qui contiennent des fours à brûleurs (dites aussi fours à flammes), en particulier, les fours de verreries qui sont la plupart du temps équipés d'un dispositif de recyclage de l'énergie de la combustion par un système de régénérateur afin d'augmenter le rendement thermique des fours. Un régénérateur (voir figure I. 14 : (a)) est composé généralement de deux empilages de briques réfractaires traversés par de nombreux de canaux vides. En phase de stockage, les gaz chauds de

combustion qui proviennent du four entrent dans le premier empilage du régénérateur et cèdent leur énergie calorifique aux briques de l'empilage. Pendant ce temps, de l'air froid est amenée dans le deuxième empilage chauffé au cours du cycle précédent pour restituer l'énergie calorifique

(phase de déstockage); cet air qui sort chaud de l'empilage est utilisé pour assurer une bonne combustion du carburant. Donc, la phase de stockage et celle de déstockage sont effectuées en même temps.



(a) Four de verre à régénérateurs [11]



(b) Briques réfractaires [12]

Figure I. 15 : (a) Four de verre à régénérateurs, (b) Briques réfractaires

- Technologie du mur de TROMBE

La technologie du mur de TROMBE est une installation de captage de l'énergie solaire utilisée dans les domaines de l'habitat pour réduire sa consommation énergétique. Cette technologie est constituée d'un mur plein vertical peint en noir, souvent en béton, exposé au sud afin de recevoir un ensoleillement maximal durant la journée (voir figure I. 16). Ce mur est muni de deux orifices appelés « clapets » permettant la circulation de l'air par convection naturelle entre le local froid et l'espace chaud formée par la surface réceptrice du mur et le vitrage qui va capturer la chaleur émise par le soleil.

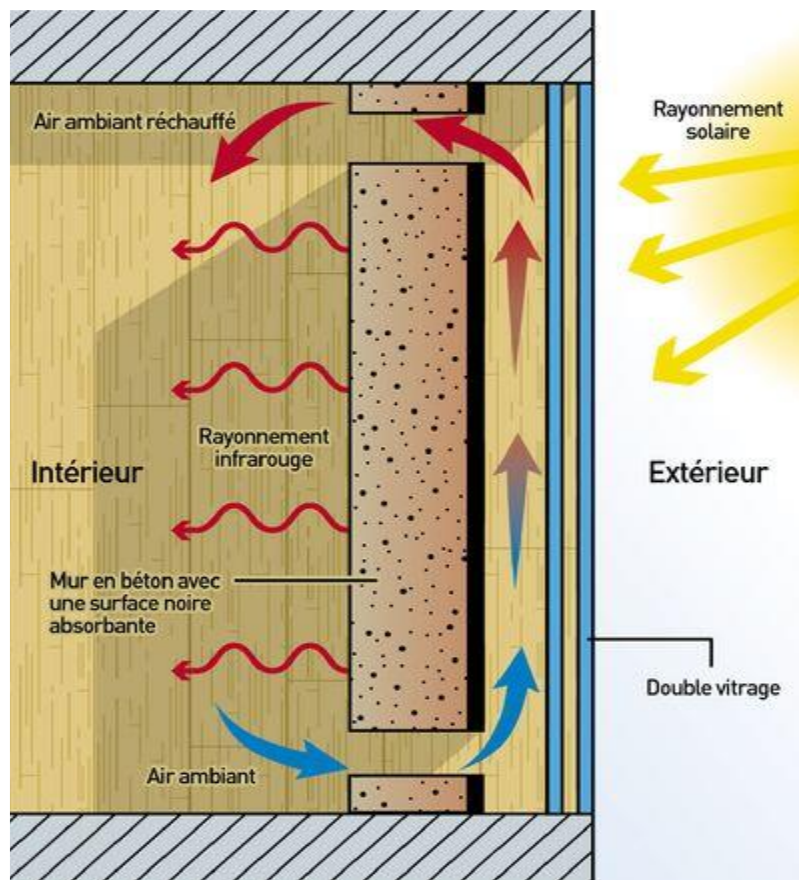


Figure I. 17 : Mur de TROMBE [13]

I.5.5.2 Stockage par chaleur latente

Dans ce type de stockage, la chaleur stockée est accompagnée par un changement de phase du matériau (vaporisation, fusion,...etc.) à température constante. Cette température correspondant à la température de la transition de phase. Le stockage par chaleur latente dans les matériaux à changement de phase (MCP) permet de stocker une grande densité d'énergie

Comparativement avec celui par chaleur sensible. Pour donner des ordres des grandeurs, par exemple ; on a besoin de 335kJ pour compléter la fusion de 1kg d'eau en glace à 0°C (chaleur latente) et 4.2 kJ pour augmenter la température de 1Kg d'eau par un degré (chaleur sensible). Alors, l'énergie demandée pour liquéfier 1kg de glace d'eau est 80 fois l'énergie demandée pour augmenter la température par 1°C de la même quantité d'eau liquide. Une autre image, on donne cette figure

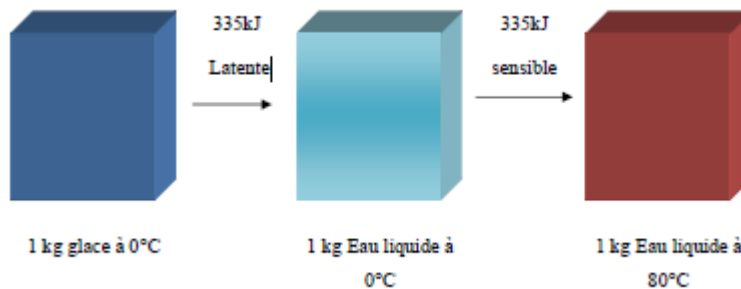


Figure I. 15 : Comparaison entre la chaleur latente et la chaleur sensible

Technologies et matériaux de stockage par chaleur latente

Le stockage sous forme de chaleur latente doit être réservé à des applications qui utilisent Directement cette forme dégradée de l'énergie. A titre d'exemple, on en cite :

- Technologie stockage de glace

Cette technique est applicable dans les systèmes de ventilation, chauffage, et air conditionné. Le principe est basé sur le stockage de froid par la congélation d'eau afin de produire la glace. Cette source de froid peut être utilisée (air conditionné) durant les chaudes journées d'été (climatisation).

- Utilisation de MCP dans la construction des bâtiments

Afin d'augmenter l'inertie thermique des parois des bâtiments, l'intégration de MCP dans la construction des ces parois représente la solution la plus moderne. Cette application, consiste à contenir le MCP dans une microcapsule de polymère microscopique (méthode de la micro-encapsulation). Ces microcapsules forment une poudre que l'on peut inclure dans des matériaux de construction. Le matériau le plus séant pour cette application est de la paraffine C21-C50. On donne sur le tableau **I. 10** les caractéristiques des certains matériaux à changement de phase.

Tableau I. 11 : Caractéristiques des matériaux à changement de phase [14]

	Masse volumique (kg/m ³)	Chaleur latente (kJ/kg)	T chgt. phase (°C)	Densité d'énergie (kWh/m ³)
Eau	1000	2250	100	58
paraffine	820	200	20 a 60	45
Na ₂ S ₂ O ₄ .10H ₂ O	1675	254	32.4	118
CaCl ₂ .6 H ₂ O	-	171	29.7	-
Zn(NO ₃) ₂ 6 H ₂ O	-	147	36.4	-

➤ **Critères de sélection d'un MCP**

Les principaux critères de choix des matériaux à changement de phase sont les suivants :

- température de fusion adéquate avec l'application ;
- grande chaleur latente de changement de phase;
- grande densité ;
- faible coût ;
- faible dangerosité, compatibilité environnementale ;
- fiabilité et stabilité dans le temps.

I.5.6 Nouvelles technologies de stockage d'énergie

Les technologies actuelles pour stocker l'énergie (notamment la chaleur et l'électricité) sont diverses, on cite certaines qui sont en stade de développement ou en industrialisation.

I.5.6.1 Stockage de la chaleur par un fluide artificiel

Récemment (fin 2018), des chercheurs, (en Suède et en Etats-Unis), ont publié des résultats d'une nouvelle technologie pour stocker l'énergie solaire par l'utilisation d'un fluide artificiel [15]. En effet, ce fluide est une molécule sous forme liquide, composée de carbone, d'hydrogène et d'azote, qui permet de capturer l'énergie thermique du soleil, de la conserver pratiquement sans pertes, et de la libérer à la demande. Ce fluide a une particularité intéressante où en phase de stockage (exposé à la chaleur du soleil), La molécule se

transforme alors en une nouvelle version énergétique due au changement des liaisons chimiques entre ses atomes, (ce qu'on appelle un isomère baptisé quadri-cyclane). Ainsi l'énergie thermique du solaire est conservée entre ses liaisons chimiques et reste enfermée même lorsque la molécule se refroidit. À la phase de déstockage (récupération de la chaleur), il suffit de passer le fluide dans un catalyseur pour que la molécule reprenne sa forme initiale, ce changement atomique libère la chaleur solaire prisonnière, provoquant ainsi un réchauffement brutal du liquide (voir figure I. 18). Cette chaleur peut ensuite être récupérée en passant ce fluide dans un échangeur de chaleur et peut être utilisée directement dans les systèmes de chauffage domestique ou d'eau chaude sanitaire.

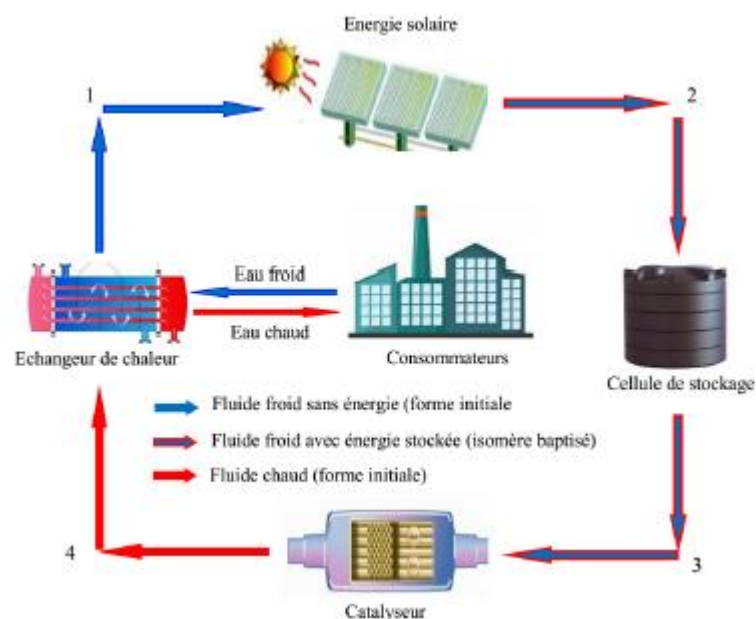


Figure I. 19: Cycle énergétique du stockage de la chaleur par un fluide artificiel [15].

- **Cette technologie a des nombreux avantages :**

- Un temps de stockage presque infini, dans un volume réduit ;
- déperdition d'énergie minimale (beaucoup plus faible que n'importe quel dispositif de stockage) ;
- Rendement élevé (1 kg peut contenir 250 wattheures d'énergie, le double de la capacité énergétique des batteries Power Wall de Tesla).

I.5.6.2 Stockage de l'électricité par batterie Lithium-Ion

Le stockage d'énergie électrique par les batteries Lithium-Ion est toujours considéré la technologie la plus performante et la plus utilisable dans les domaines de stockage

vu la haute densité énergétique de ces batteries (voir figure I. 16). Ces dernières années, des recherches plus intensives se proposent l'amélioration de la technologie des batteries Li-ion. Les performances des nouvelles batteries Li-ion sont les suivantes :

- Peuvent stocker trois à quatre fois plus d'énergie de masse que les autres batteries ;
- Phase de stockage plus vite ;
- Une durée de vie importante (au moins un demi-millier de rechargement à 100 %) ;
- Ils ont les qualités qui les rendent nécessaires à tous les appareils essentiels de notre vie quotidienne

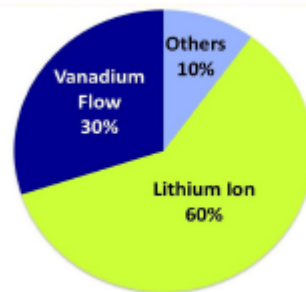


Figure I. 20: Quantité du stockage d'électricité dans différentes technologies des batteries [16].

I.5.6.2.1 Domaine d'utilisations des batteries Lithium-Ion

Les domaines d'utilisation des batteries Lithium-ion sont divers, nous les mentionnons :

- **Les appareils électroniques** : où on compte environ de deux milliards de batteries au lithium-ion rien que pour les appareils électroniques et les robots domestiques.
- **La mobilité électrique** : des batteries Lithium-ion performantes sont développées et adaptées aux véhicules électriques (véhicules, engins, machines, trains,...etc.) dans ce domaine on compte environ de un milliard de batteries Lithium-ion utilisées.
- **Eclairage extérieur** : des panneaux photovoltaïques sont combinés avec des batteries Lithium-ion spécifiques permettant en particulier une décharge dans les marges de température de -30 °C à 75 °C afin d'alimenter les lampes de l'éclairage extérieur.

1.5.6.3 Hydrogène

Aujourd'hui, l'introduction de l'hydrogène comme vecteur énergétique pour le stockage d'énergie renouvelable à grande échelle, présente le support futur le plus probable selon les scientifiques et les industriels. Dans ce contexte, plusieurs possibilités sont envisagées et profondément étudiées, certaines sont arrivées à maturité technologique et d'autres sont encore au stade du développement. Le grand intérêt de cette technologie du stockage est à cause de :

- Sources principales de production de l'hydrogène (chaleur et électricité) sont faible coût, renouvelables et disponible (voir figure I. 17).
- Cycle de la production de l'hydrogène ne présente aucun danger principal pour l'environnement.
- Réduire la dépendance vis-à-vis des carburants fossiles.
- Représente le carburant qui concentre le plus d'énergie (1 kg d'hydrogène contient 3 fois plus d'énergie qu'1 kg d'essence).

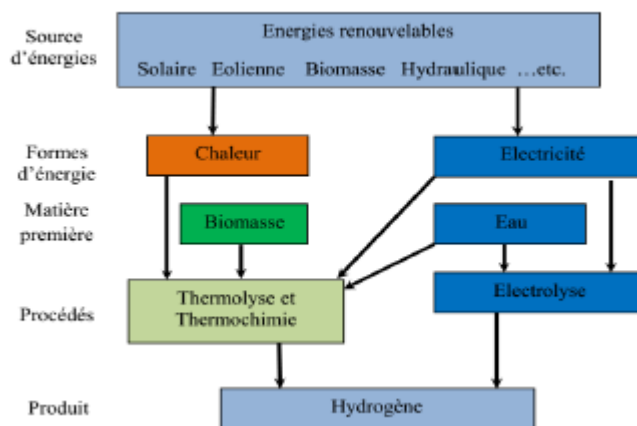


Figure I. 21 : Les modes de production de l'hydrogène

Domaines d'applications : l'hydrogène représente un vecteur pour la production d'électricité par l'utilisation des piles à combustibles. Cette énergie électrique d'origine hydrogène est utilisée dans plusieurs applications permet ces applications on en cite :

- Transport (véhicules électriques, bus...cet) ;
- Utilisation domestique d'électricité (éclairage, appareils électriques,...cet) ;
- Les appareils électroniques (portable, ordinateur, ...etc.) pour la fabrication de composants électroniques ;

- Usages industriels dans la chimie et le raffinage ;
- Production de chaleur.

I.5.7 Coût du stockage d'énergie

L'économie des entreprises de stockage d'énergie est basée sur le coût d'investissement de l'opération stockage/restitution d'énergie où ce coût de cette opération varie d'une technologie à l'autre. Le graphique de la Figure **I. 22** illustre l'état actuel du classement des technologies en termes de coûts par kW, de capacité du stockage (taille des bulles) et de réactivité selon la *Direction Générale de l'Energie et du Climat* (DGEC) et *Electric Power Research Institute* (EPRI). D'après cette figure, on remarque que la technologie des STEP (Stations de Transfert d'Énergie par Pompage), est classée en tête de liste des technologies dont son coût d'investissement, ramené à la capacité, est parmi les plus bas et sa durée de vie très longue. Ceci due au fait que la phase de stockage est presque gratuite surtout en hiver (les rivières et les fleuves). Dans la deuxième classe on trouve la technologie de stockage par air comprimé qui a presque le même coût d'investissement que la technologie de STEP mais une capacité moins faible que celle de STEP. Ce faible coût d'investissement est lié avec la simplicité de cette technologie ainsi que la phase de stockage n'est pas coûteuse. La technologie de stockage d'électricité via l'hydrogène présente une capacité énergétique similaire à celle d'air comprimé avec un coût d'investissement triple fois que celui de l'air comprimé due au fait que l'opération de la production/stockage de l'hydrogène est très coûteuse (voir paragraphe . En effet, le stockage par air comprimé et l'hydrogène sont aujourd'hui les deux technologies de stockage les plus prometteuses. Les autres technologies nécessitent davantage d'efforts de recherche, démonstration et développement pour être compétitives pour certaines applications, notamment le stockage électrochimique (batteries) dont les coûts sont encore trop élevés offrant ainsi une faible capacité de stockage

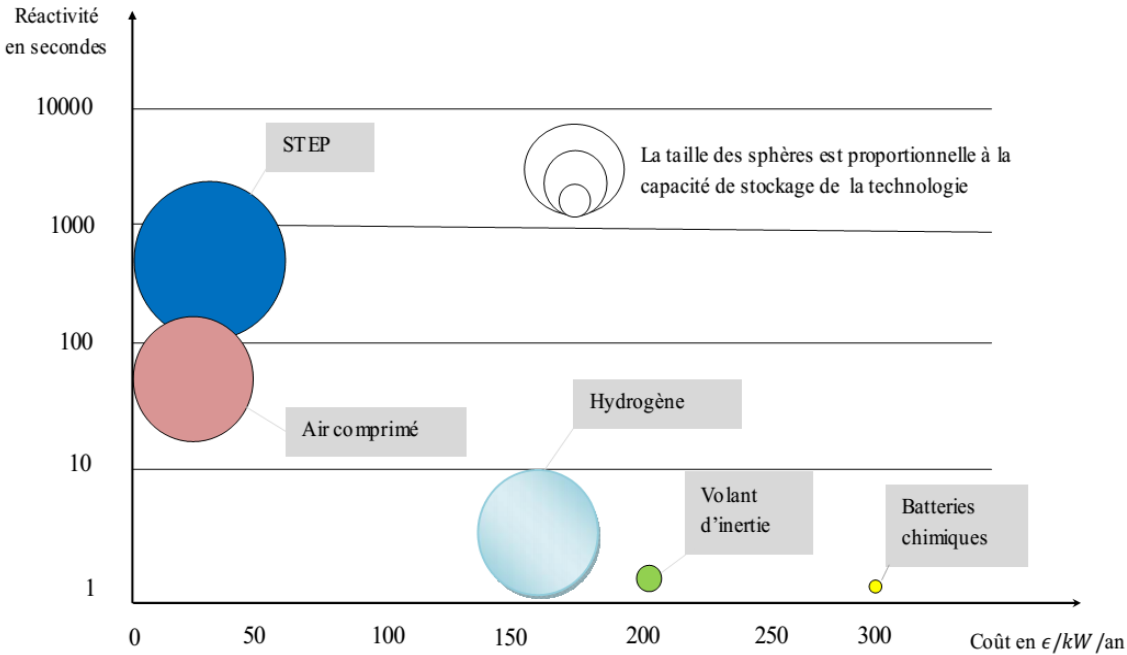


Figure I. 23 : Caractéristiques des technologies de stockage, (coût, capacité et réactivité) [17]

Référence

- [1] https://fr.wikipedia.org/wiki/Stockage_de_1%27%C3%A9nergie
- [2] Dr AKE, cours de stockage, distribution et transport des hydrocarbures (STDH).[en ligne]. [consulté le 26 janvier 2017]. Disponible à l'adresse :<http://fr.slideshare.net/leroiani/cours-de-stockage-distribution-et-transport-des-hydrocarbures>
- [3] Bac de stockage, bac de stockage à toit fixe, bac de stockage toit...-CMP Arles . Disponible à l'adresse : <http://www.cmparles.com>
- [4] H. H. Molinaro, B. Multon “Technologies des systèmes de stockage de l'énergie électrique. Culture sciences de l'ingénieur, 2019
- [5] H. Liu and J. Jiang, “Flywheel energy storage—An upswing technology for energy sustainability,” *Energy Build.*, vol. 39, no. 5, pp. 599–604, May 2007.
- [6] https://www.brgm.fr/sites/default/brgm/publications/lettresearche_01/images/schema-cavite_zoom.jpg
- [7] <https://i.ebayimg.com/images/g/DPgAAOSwj9hcQbDS/s-l300.jpg>
- [8] R. Ledoeuff et J. C. sabonnadière “Nouvelles technologies de l'énergie 2 ”, 2007
- [9] Pierre Mayé “générateurs électrochimiques ”, 2010, Paris, France.
- [10] Nathalie Devillers “Caractérisation et modélisation de composants de stockage électrochimique et électrostatique “ thèse de doctorat. Université de Franche-Comté, 2012. Français
- [11] <https://docplayer.fr/docs-images/59/43982280/images/211-2.png>
- [12] <https://www.refractory-material.com/wp-content/uploads/2015/02/Magnesia-Brick-12.jpg>
- [13] <https://i.pinimg.com/originals/30/f6/0b/30f60b46643c0ce06e6c40de444cacb6.jpg>
- [14] Driss STITOU “ Transformation, Conversion, Stockage, Transport de l'énergie thermique par procédés thermochimiques et thermo-hydrauliques”, Thèse de Habilitation, Université de Perpignan, 2013.
- [15] <https://les-smartgrids.fr/stockage-fluide-pieger-solaire/>
- [16] <https://i1.wp.com/www.cleanfuture.co.in/wp-content/uploads/2020/07/Figure-5-market.jpg>
- [17] <http://www.ufe-electricite.fr/IMG/pdf/18.pdf>