

Chapitre 4 : Stockage de l'énergie

4.1. Intérêt

Aujourd'hui, malgré la diversité des sources d'énergie fossile utilisées, mais elles ne sont pas renouvelables. En effet, elles s'épuisent et leur disponibilité n'est pas constante. Ces sources d'énergie (pétrole, charbon, gaz naturel,..) fournissent plus de 80% de l'énergie consommée annuellement le reste provient des énergies renouvelables (nucléaire, l'hydroélectricité, vent, solaire,etc.). Comme les énergies fossiles s'épuisent, et leur consommation (combustion) dégage des gaz très nocifs et polluant de l'environnement (l'oxyde de soufre SO₂, l'oxyde d'azote NO₂ et le monoxyde de carbone CO), il faudra chercher d'autres types d'énergies qui sont renouvelables, gratuites, stockables, disponibles tout le temps et non polluants.

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.

4.2. 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.

4.3. 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 4.1. Différentes technologies de stockage

Origine de l'énergie stockée	Technologie
Mécanique	<ul style="list-style-type: none"> - Hydraulique (gravitaire) - Volant d'inertie - Air comprimé
Electrochimique	<ul style="list-style-type: none"> - Batteries - Hydrogène (piles à combustibles)
Thermique	<ul style="list-style-type: none"> - Chaleur sensible - Chaleur latente - Energie par sorption

4.3.1. Stockage mécanique

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

4.3.1.1. 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 4.1). Ce type de stockage présente un bon rendement (70 à 80%) et un faible coût, mais il nécessite des sites adaptés.

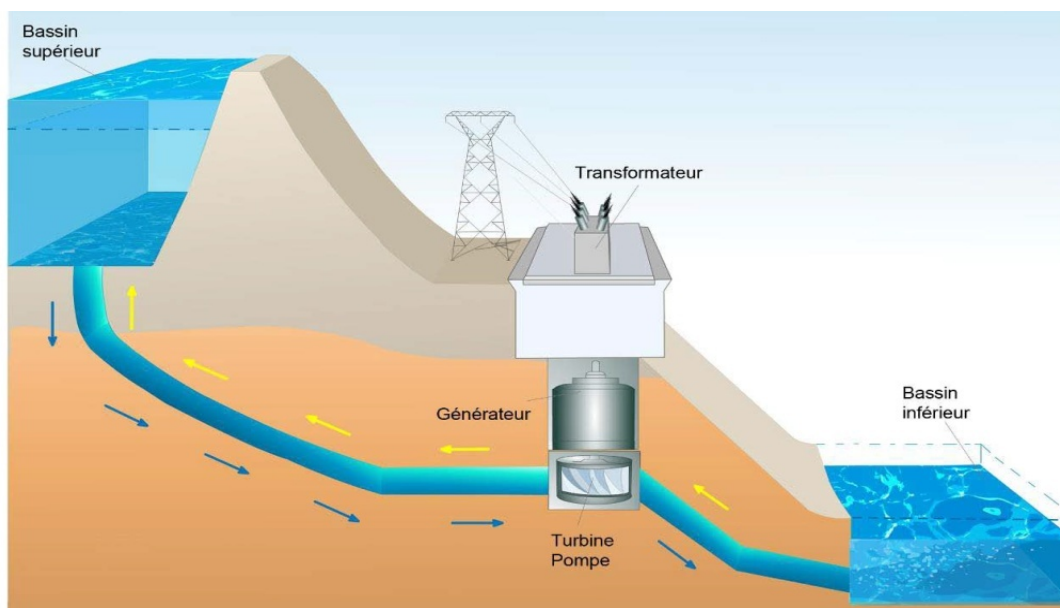


Fig. 4.1 : Principe de fonctionnement d'un stockage gravitaire

Au terme des valeurs, on donne l'exemple de site de Grand-Maison en France avec une capacité de stockage allant à 137000000 m^3 d'eau pour une retenue de 2.19 km^2 . Avec une chute de 1km qui produit 1800MW et un débit de $220 \text{ m}^3/\text{s}$, ceci permettrait de stocker 1.3 TWh pour un vidange complet de retenue.

Avantages et inconvénients

Les avantages de stockage gravitaire sont :

- 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...).

Ses inconvénients sont les suivantes

- Impact possible sur le paysage ;
- pertes d'énergie allant de 15% à 30%.

4.3.1.2. 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 4.2). La quantité d'énergie cinétique est proportionnelle au carré de la vitesse de rotation, donc :

$$E = \frac{1}{2} (J\Omega^2) \quad (4.1)$$

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

$$J = KmR^2 \quad (4.2)$$

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.

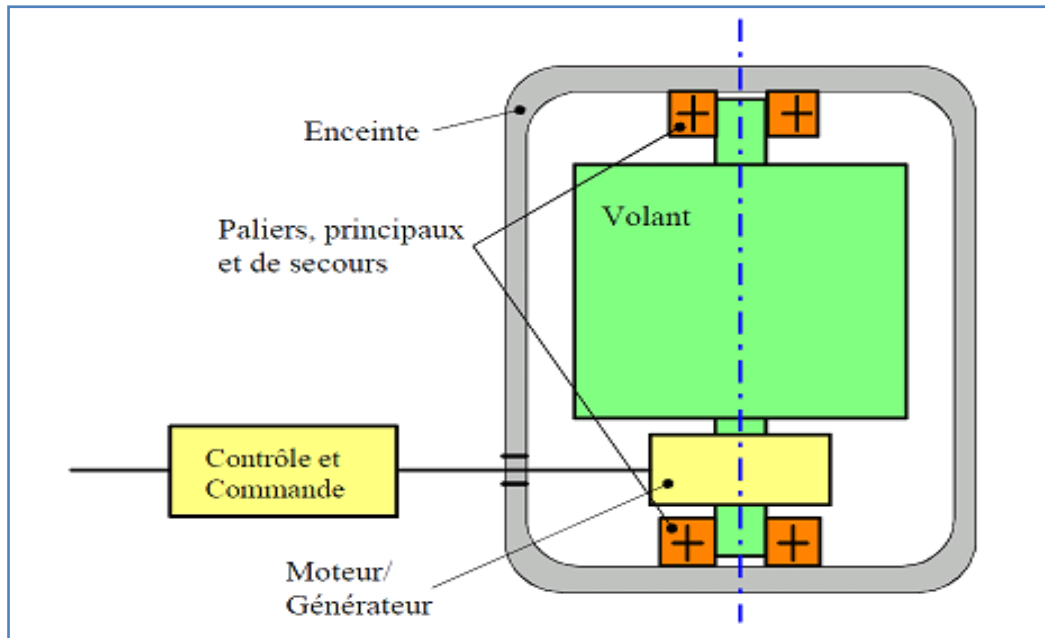


Fig. 4.2 : Volant d'inertie

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 4. 2, 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 4. 2 : Matériaux utilisés pour fabriquer un volant d'inertie

Materiau	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

4.3.1.3. Air comprimé

Cette technique est basée sur la compression de l'air dans cavités (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 4.3), soit dans des petites enceintes, dans des bouteilles où réservoirs (compresseurs utilisés dans la menuiserie, voir figure 4.4).

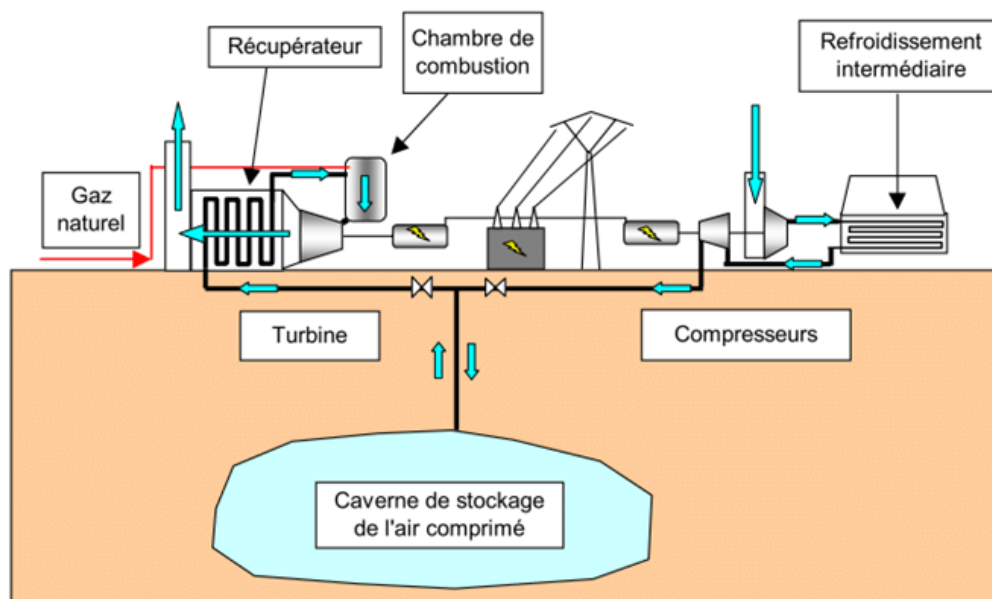


Fig. 4.3 : Centrale électrique couplée avec une cavité géologique d'air comprimé



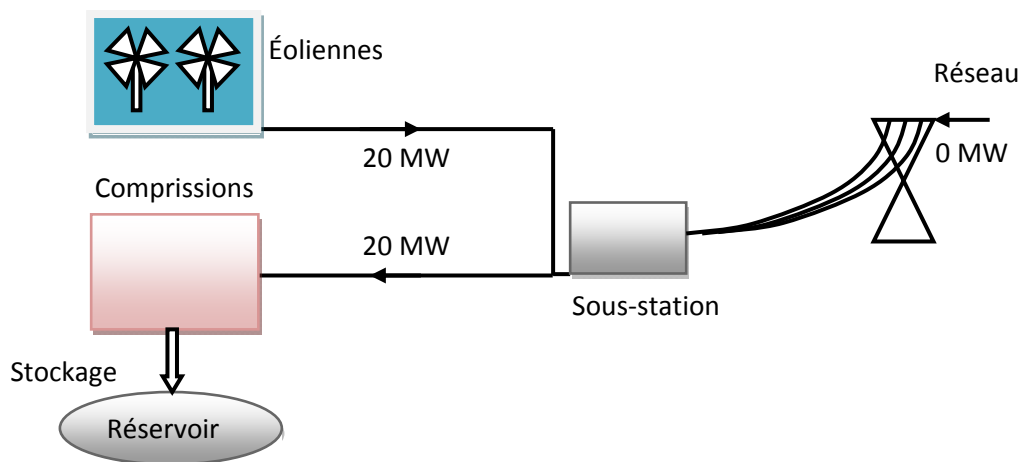
Fig. 4.4 : Compresseurs avec un petit réservoir utilisé dans la menuiserie,..., etc.

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. (Voir Fig. IV.3).

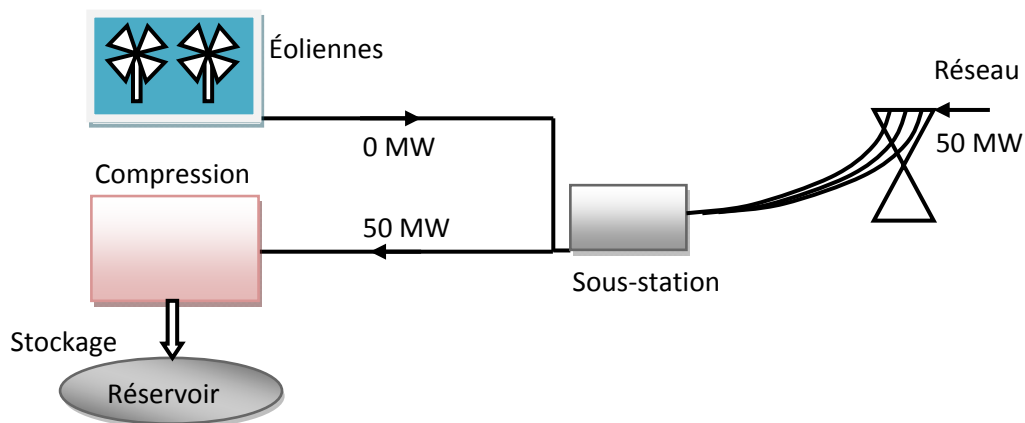
Couplage air comprimé/éolienne

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 :

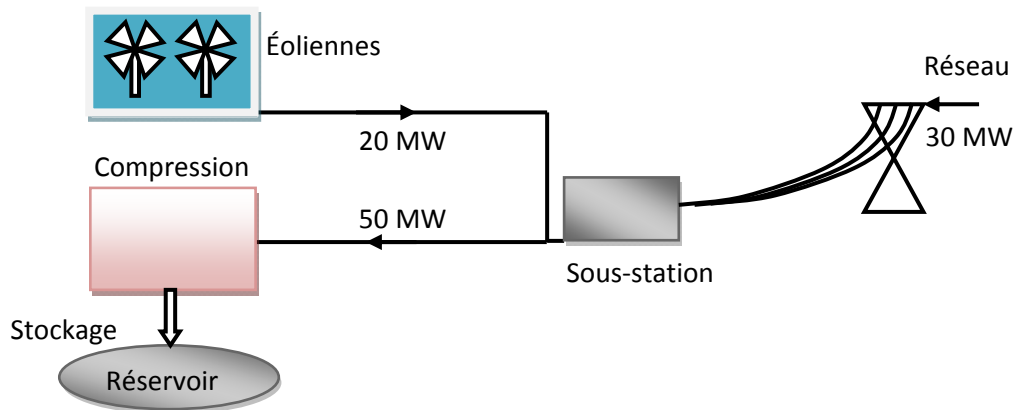
- ***Compression : éolienne utilisée pour comprimer l'air sans utiliser le réseau :***



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

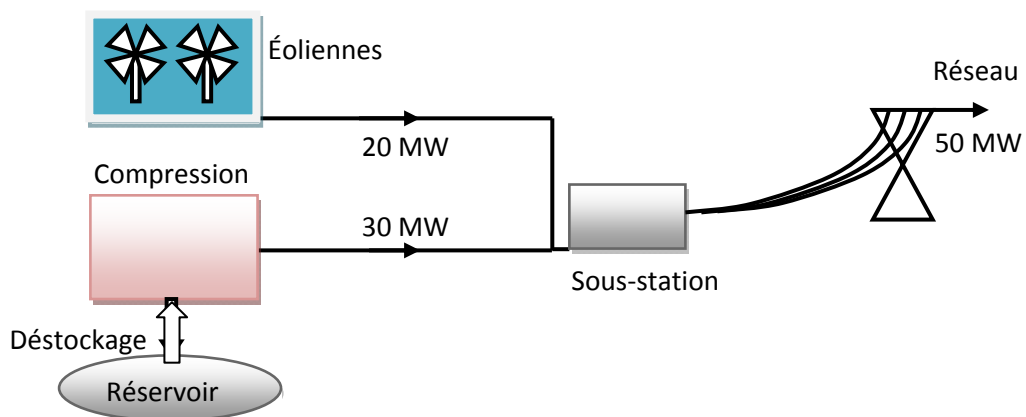


- **Compression : réseau et l'éolienne utilisés pour compresser l'air:**



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

4.3.2. Stockage électrochimique et électrostatique (batteries)

4.3.2.1. 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. 4.5) :

- 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.

4.3.2.2. 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.

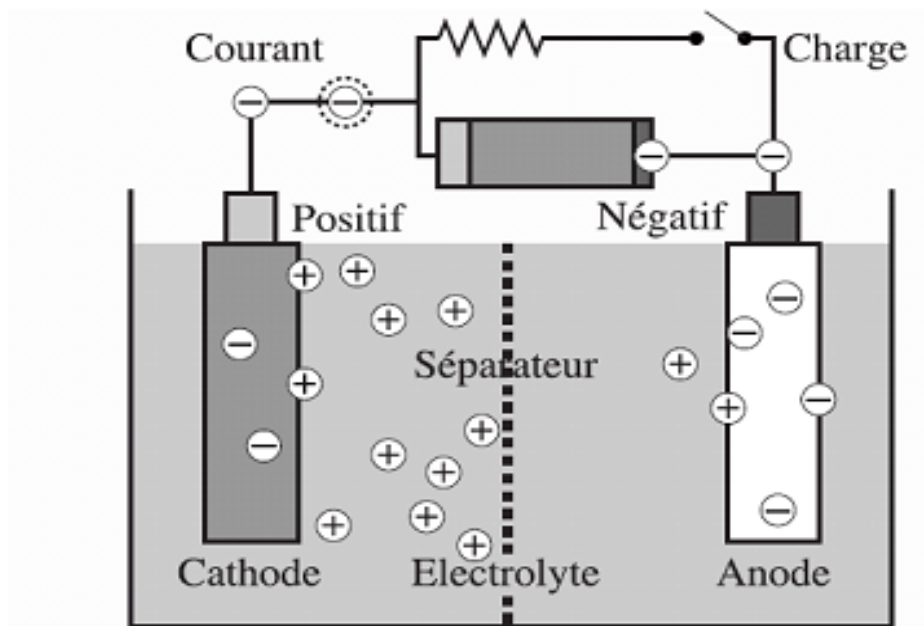


Fig. 4.5 : Schéma représentative un accumulateur électrochimique

4.3.2.3. Technologies

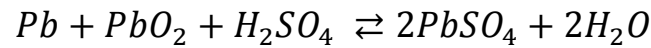
Il existe diverses technologies d'accumulateurs électrochimiques, accumulateur au plomb, accumulateur au nickel et accumulateur au lithium.

a- Accumulateur au plomb-acide

L'accumulateur au plomb acide a été inventé par Gaston Planté en 1839. On distingue différentes technologies d'électrodes (plaque plane ou plaque tubulaire) et d'électrolyte (liquide ou 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 4.3 : Caractéristiques d'un accumulateur plomb acide

Tension à vide	2 – 2.1 V
Capacité spécifique pratique	7 à 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 :

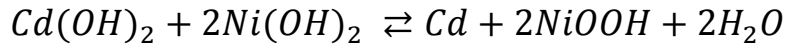
- Une faible densité énergétique massique (car sa masse est élevée) ;
- Un faible courant de charge ;
- L'utilisation d'un liquide corrosif ;
- La nocivité due au plomb.

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

Les caractéristiques d'un accumulateur Nickel-Cadmium sont données dans le tableau suivant:

Tableau 4.4 : Caractéristiques d'un accumulateur Nickel-Cadmium

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 quant la décharge est 100% à chaque cycle. 500 à 10000 quant 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)

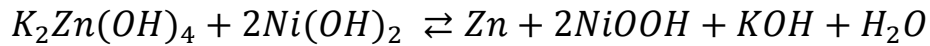
Ses inconvénients sont les suivants

- 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 a 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 4.5 : Caractéristiques d'un accumulateur Nickel-Zinc

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 coût 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 4.6 : Technologies d'accumulateur au lithium

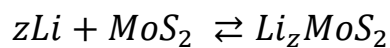
technologie	Li-métal	Li-ion	Li-métal polymère	Li-métal polymère ou plastique
Electrode négative	Lithium métallique	Matériau à insertion de Li	Lithium métallique	Matériau à insertion de Li
électrolyte	liquide	Liquide	polymère	polymère

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 LiAsF_6 (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 :

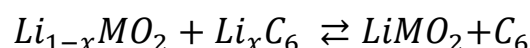
- problème de sécurité due aux dendrites qui peuvent provoquer une instabilité jusqu'à l'emballement thermique ;
- phase de charge relativement lente.

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 LiC_6 , coke $\text{Li}_{0.5}\text{C}_6$, titane LiTiS_2 ...etc.) ;
- Electrode positive : un composé permettant l'insertion ou la désinsertion de l'ion Li^+ , (oxydes de métaux de transition lithiés LiCoO_2 , LiNiO_2 et LiMn_2O_4 ;
- 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 (LiPF_6)

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 4.7 : Caractéristiques de différents accumulateurs

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

4.3.3. 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 H_2 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).

4.3.3.1 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 :

- à l'anode : $H_2O \rightarrow \frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^-$
- à la cathode $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$
- Le bilan $H_2O \rightleftharpoons \frac{1}{2} O_2 + H_2$

4.3.3.2. Moyen de 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.

4.3.3.3 Pile à combustibles

a- Historique et principe de fonctionnement

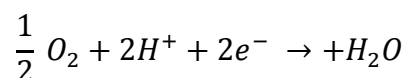
Le premier énoncé de principe de l'électrolyse inverse est lancé en 1802 par Sir Henry David. Cet énoncé met en évidence la possibilité de produire de l'électricité et de la chaleur à partir de la réaction chimique entre le dioxygène et le dihydrogène. En 1839, L'anglais Sir William-Robert Grove réalise 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 :

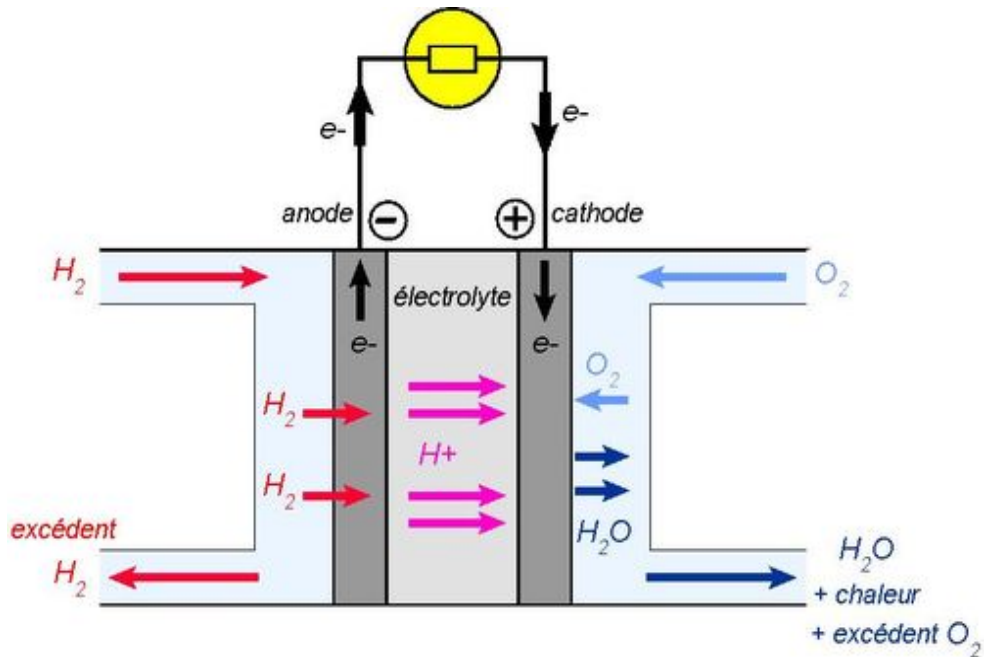
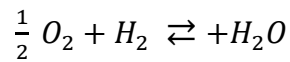


Fig. 4.6 : Principe de fonctionnement d'une pile à combustible.

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 soient 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 :

Tab. 4.8 : Caractéristiques des piles à combustibles.

Type	Electrolyte	Puissance MW	Température	Rendement
AFC	Hydroxyde de potassium	0.01 à 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 10	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 %

a- 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).

4.3.4. 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).

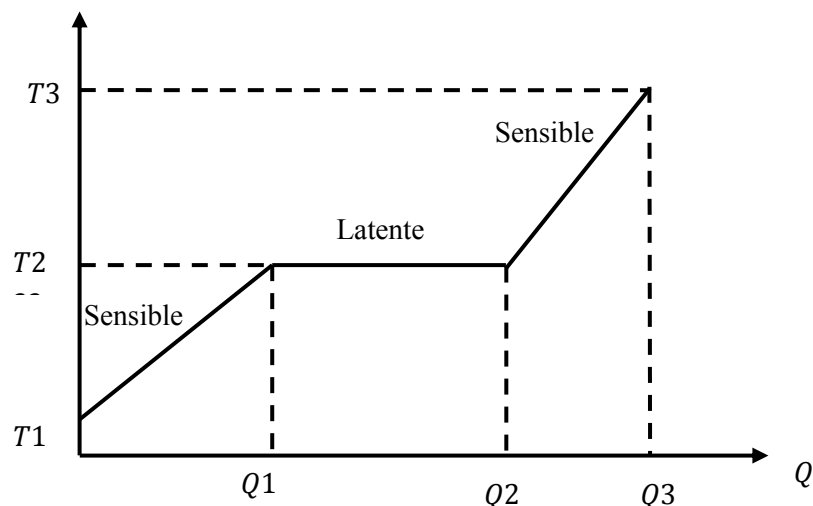


Fig. 4.7 : Chaleur sensible et latente en fonction de la température

4.3.4.1. 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

$$Q = m(h_f - h_i) \text{ Ou } Q = mC_p(T_f - T_i) \quad (4.1)$$

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 $2.5 \cdot 10^5$ 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 les 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 10^5 kJ/m^3 .

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.

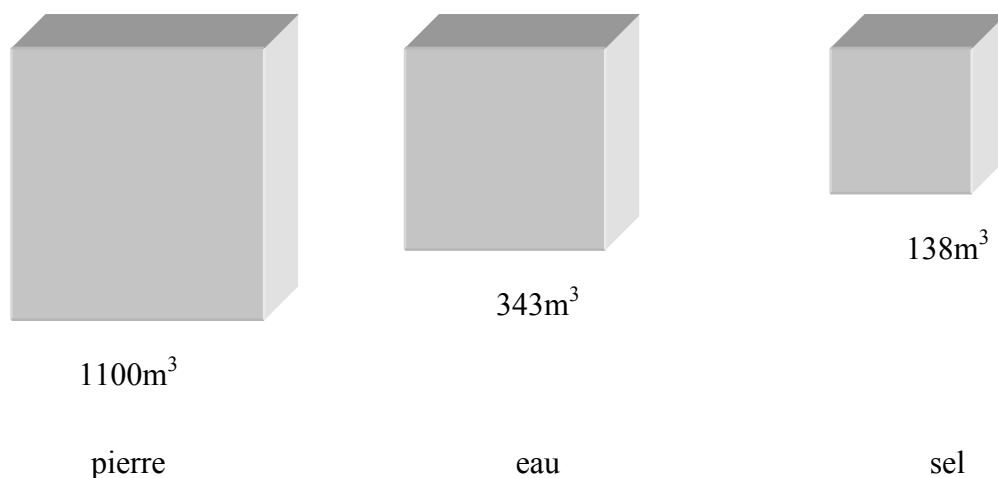


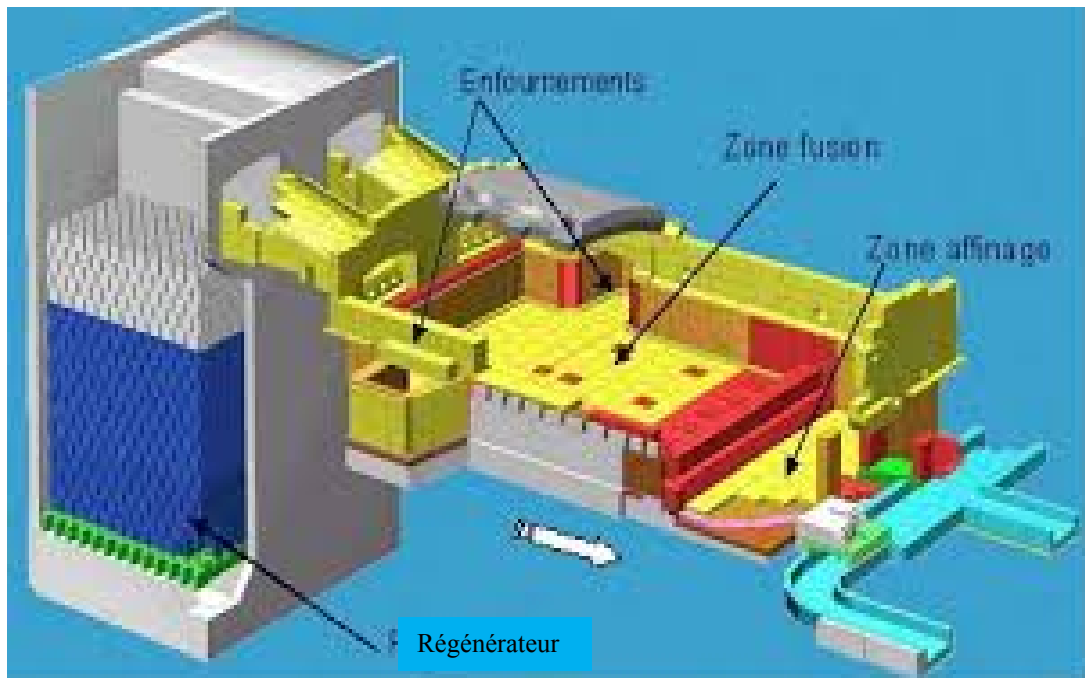
Fig. 4.8 : Comparaison des volumes nécessaires au stockage d'une même quantité d'énergie thermique pour différents matériaux.

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 4.9 : (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



(b) Briques réfractaires

Fig. 4.9 : (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 4.10). 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.

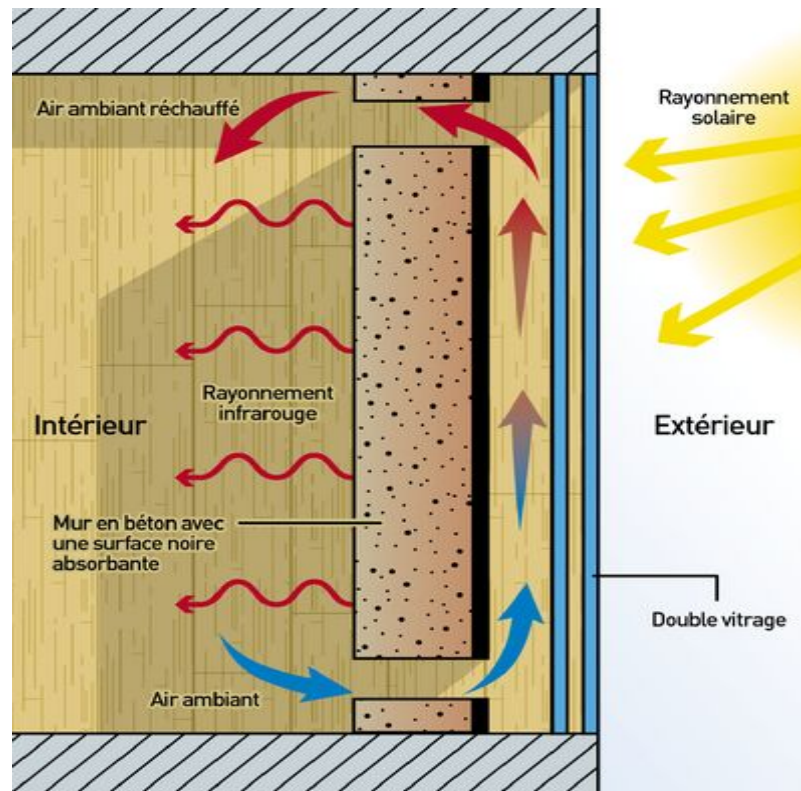


Fig. 4.10 : Mur de TROMBE

4.3.4.2. 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 :

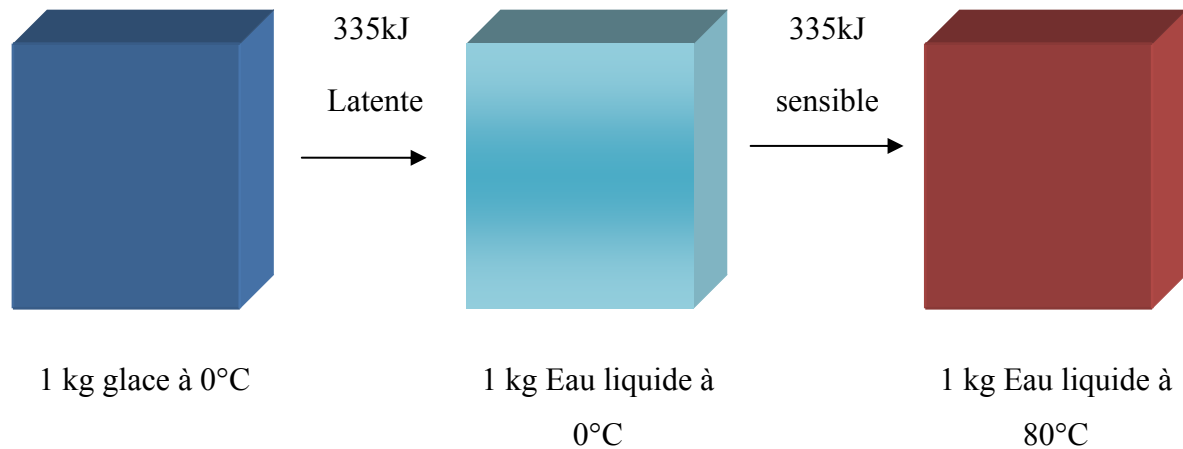


Fig. 4.11 : Comparaison entre la chaleur latente et la chaleur sensible

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 de 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 IV.9 les caractéristiques des certains matériaux à changement de phase.

Tab. 4.9 : Caractéristiques des matériaux à changement de phase

	Masse volumique (kg/m ³)	Chaleur latente (kJ/kg ¹)	T chgt. phase (°C)	Densité d'énergie (kWh/m ³)
Eau	1000	2250	100	58
paraffine	820	200	20 à 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.

4.3.5. 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.

4.3.5.1. 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. 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 4.12). 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.

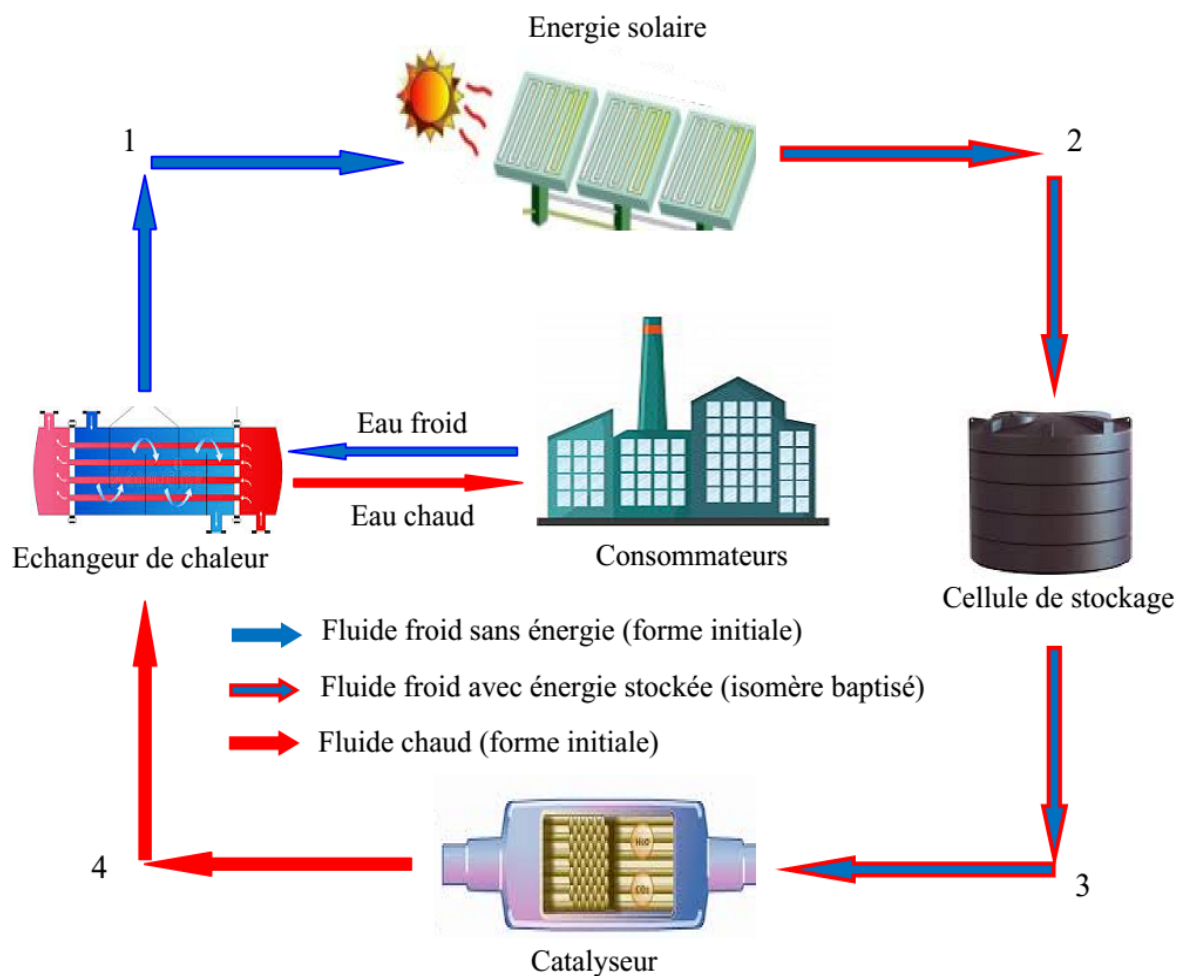


Fig. 4.12 : Cycle énergétique du stockage de la chaleur par un fluide artificiel

Cette technologie a des nombreux avantages :

- Un temps de stockage presque infini, dans un volume réduit ;
- déperdition d'énergie minime (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).

4.3.5.2. 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 électrochimique vu la haute densité énergétique de ces batteries (voir figure 4.13). 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.

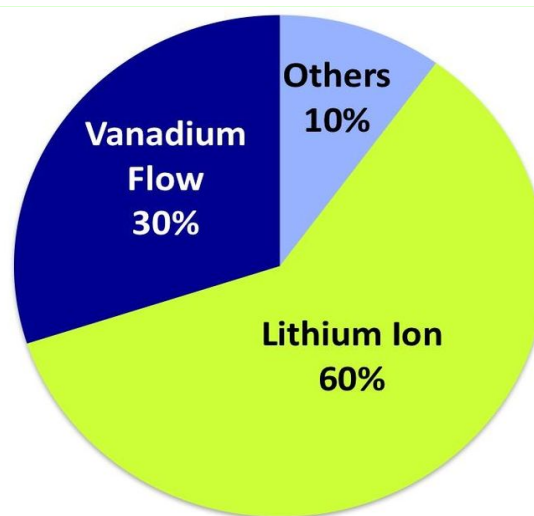


Fig. 4.13 : La quantité du stockage d'électricité dans différentes technologies des batteries.

4.3.5.2. 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 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ afin d'alimenter les lampes de l'éclairage extérieur.

4.3.5.3. 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 IV.12).
- 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).

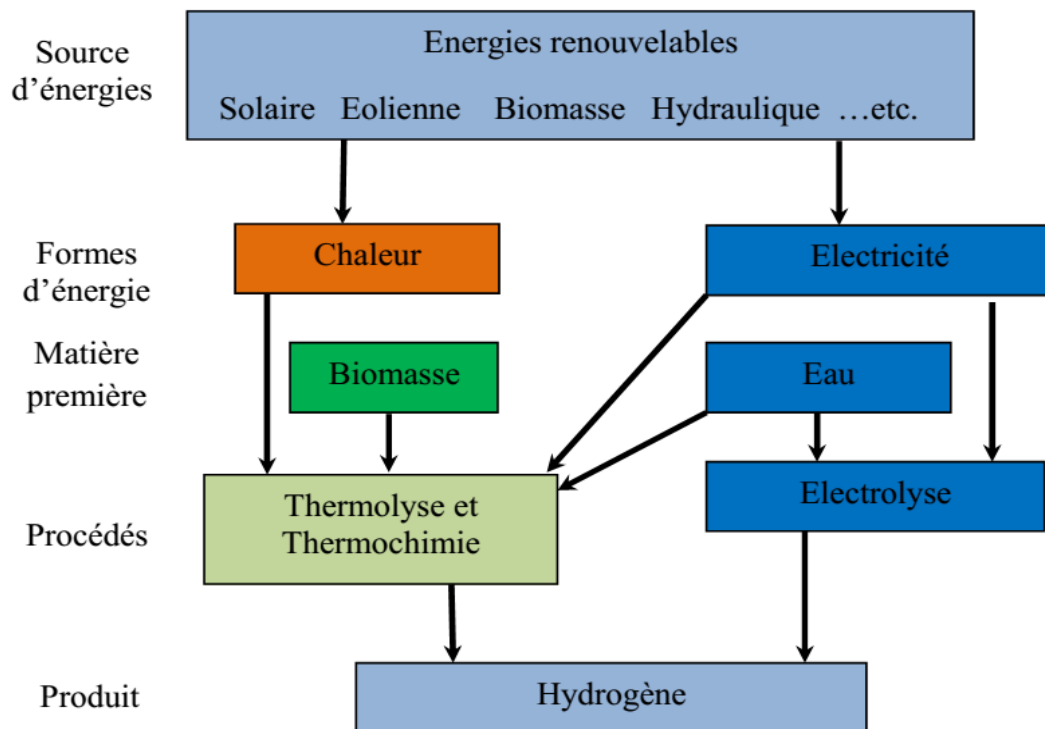


Fig. 4.14 : Les modes de production de l'hydrogène.

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 appareille électroniques (portable, ordinateur, ...etc.) pour la fabrication de composants électroniques ;
- Usages industriels dans la chimie et le raffinage ;
- Production de chaleur.

4.3.6. 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 4. 15 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'Energie 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 couteuse (voir paragraphe 4.3.3.2.). 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.

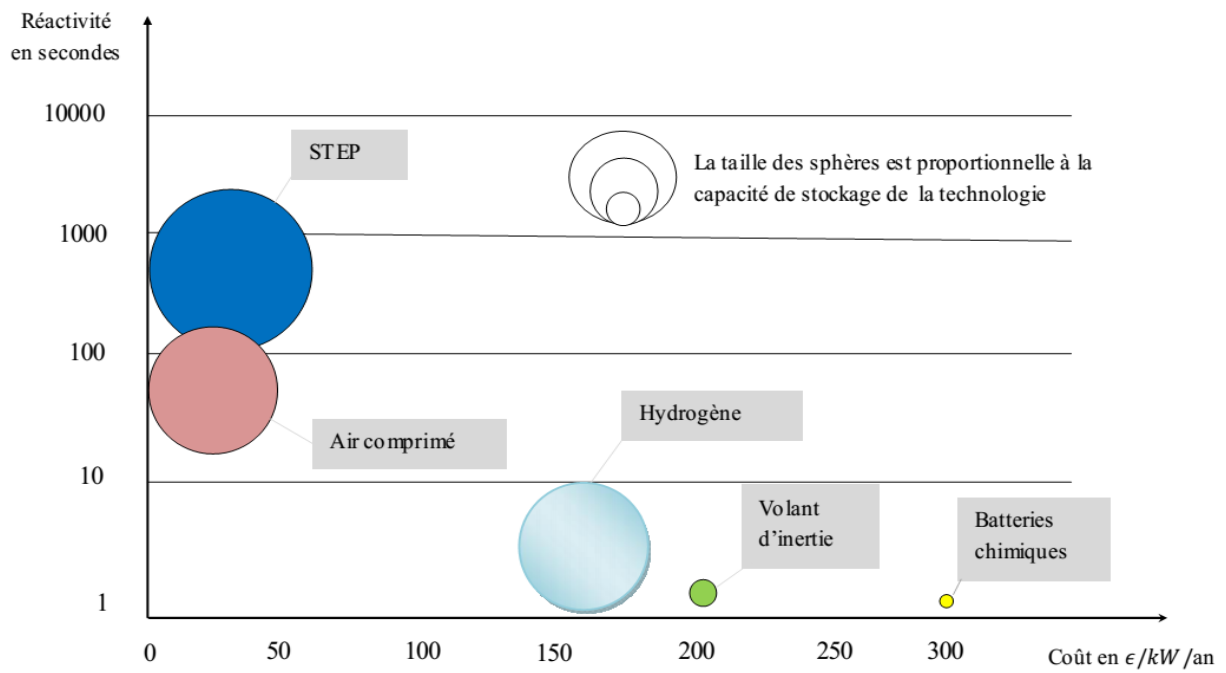


Fig. 4. 15 : Caractéristiques des technologies de stockage, (coût, capacité et réactivité)

Références :

- Roger Ginocchio, Pierre-Louis Viollet “L'énergie hydraulique”, 2^{ème} édition 11, rue Lavoisier 75008 Paris, France.
- Pierre Mayé “générateurs électrochimiques ”, 2010, Paris, France.
- DAEDE, EECCT, CMTEMHP, ECCJ, “Total energy management handbook” November 2005.
- V. Vesma, “Energy Management Principles and Practice”, British Standards Institution, 2009.
- O. Megret, L. Bequet, A. Manificat, C. Weber “Transport longue distance et stockage d'énergie calorifique, en couplage avec des procédés de valorisation énergétique des déchets”, décembre 2011
- R. Ledoeuff et J. C. sabonnadière “Nouvelles technologies de l'énergie 2 ”, 2007.
- R. Benchrif, A. Bennouna et D. Zejli “ Rôle de l'hydrogène dans le stockage de l'électricité à base des énergies renouvelables ” Revue des Energies Renouvelables CER'07 Oujda (2007)103 – 108.
- K. Imessad et M. Belhamel “ Evaluation des Performances d'un Mur Trombe”, Rev. Energ. Ren. : Valorisation (1999) 195-198.
- Y. Miao, P. Hynan, A. v. Jouanne and A. Yokochi “Current Li-Ion Battery Technologies in - Electric Vehicles and Opportunities for Advancements” journal of energies pp.1074-1097, 2019.
- H. Derbal, M. Belhamel et A. M'Rouai “L'hydrogène, vecteur énergétique solaire” Revue des Energies Renouvelables ICRES-07 Tlemcen (2007) 235-247.
- J.L. LILLEN “Transport et Distribution de l'Energie Electrique” Cours donné à l'Institut d'Electricité Montefiore Université de Liège 2010.
- Ky Le, “ gestion optimale des consommations d'énergie dans les bâtiments”, thèse de l'école doctorale. Institut polytechnique de Grenoble, 2008.
- Driss STITOU “ Transformation, Conversion, Stockage, Transport de l'énergie thermique par procédés thermochimiques et thermo-hydrauliques”, Thèse de Habilitation, Université de Perpignan, 2013.

Sites internet:

<https://les-smartgrids.fr/stockage-fluide-pieger-solaire/>

<http://www.nrcan.gc.ca/energy/sites/www.nrcan.gc.ca.energy/files/files/OS>

<http://www.cepa.com/fr/bibliotheque/niveau-dintegrite-des-pipelines-des-societes-membres>

http://www.southbirminghampct.nhs.uk/_services/rehab/Images/AuditCycle.jpg