



**Faculté De Technologie**

*Université Djillali Liabes Sidi Bel Abbès*

**DOMAINE: SCIENCES ET TECHNOLOGIES**

**FILIERES: - GENIEMECHANIQUE**

**- Energies renouvelables**

## ***Stockage d'énergie***

*Présenté par:*  
*Dr. LAHCENE Abdelkader*  
*Maitre de conférences B*  
*Département Génie Mécanique*



**2021-2022**

## Généralités

L'homme a toujours stocké l'énergie sous forme de chaleur par de simples gestes (cf. figure 1), en faisant chauffer une pierre au soleil et l'utiliser après pour le chauffage ou la cuisson.

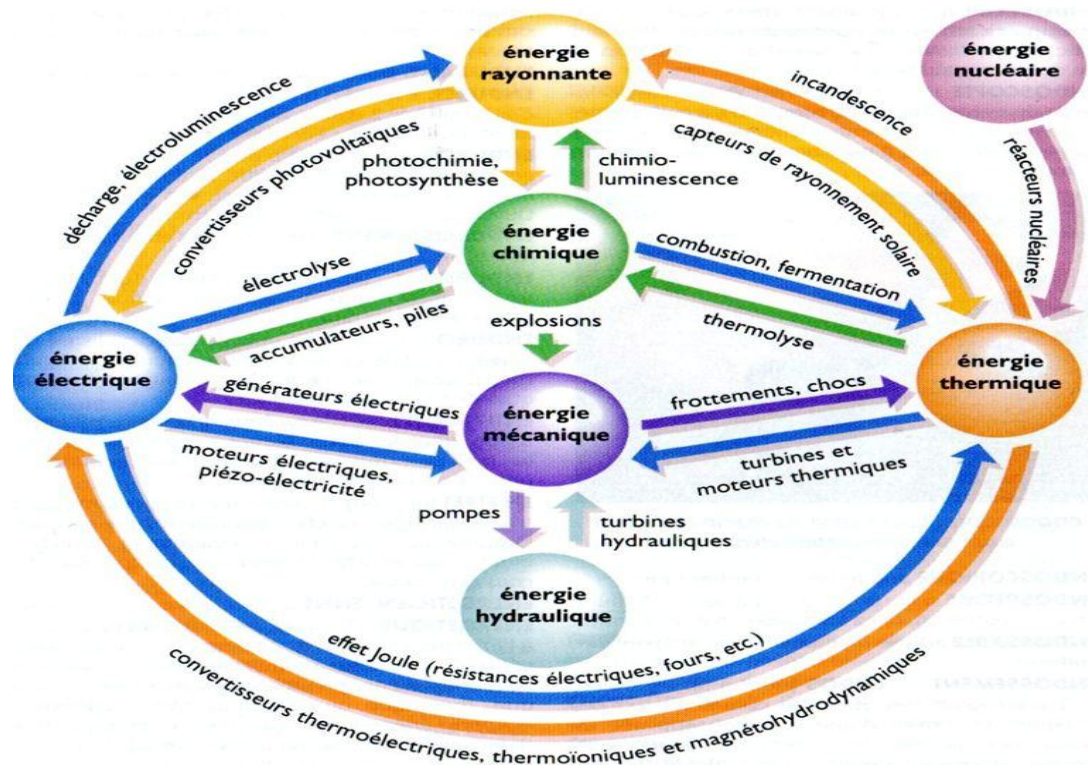


**Figure 1. L'homme et l'idée du stockage.**

Le stockage de l'énergie est au cœur des enjeux actuels, qu'il s'agisse d'optimiser les ressources énergétiques ou d'en favoriser l'accès. Il permet d'ajuster la « production » et la « consommation » d'énergie en limitant les pertes. L'énergie, stockée lorsque sa disponibilité est supérieure aux besoins, peut être restituée à un moment où la demande s'avère plus importante. Face à l'intermittence ou la fluctuation de production de certaines énergies, par exemple renouvelables, cette opération permet également de répondre à une demande constante.

Les méthodes de stockage dépendent du type d'énergie. Les sources d'énergies fossiles (charbon, gaz, pétrole), sous forme de réservoirs à l'état naturel, remplissent naturellement la fonction de stocks. Une fois extraites, elles peuvent facilement être isolées, hébergées et transportées d'un point de vue technique. Le stockage s'avère plus complexe pour les énergies intermittentes : leur production est relayée par des vecteurs énergétiques tels que l'électricité, la chaleur ou l'hydrogène, nécessitant des systèmes spécifiques de stockage.

Le diagramme ci-dessous indique les transformations qui permettent de passer d'une forme à une autre :



**Figure 1 : Diagramme de transformation d'énergie**

Le besoin de stockage est une réponse à des considérations d'ordre économique, environnemental, géopolitique et technologique.

L'accroissement mondial de la demande en énergies fossiles, la hausse des cours qui en résulte et les troubles politiques de plusieurs pays producteurs rendent l'approvisionnement partiellement incertain. Le stockage de l'énergie est donc un atout géostratégique, notamment dans le cas des hydrocarbures.

Dans le domaine économique, en particulier lors des pointes de consommation, le stockage de l'énergie peut permettre de réguler les fluctuations des prix indexés sur les variations de l'offre et de la demande. Pour les entreprises et les particuliers consommateurs, une énergie disponible, sans interruption ou hausse des prix inopinée, est une nécessité au regard des modes de vie actuels. Le stockage est aussi un moyen de limiter les pertes lors d'une surproduction et donc de réduire la consommation globale d'énergie.

D'un point de vue technologique, le développement des équipements portables et des véhicules hybrides et électriques nécessite de nouvelles formes de stockage permettant

d'héberger une forte densité d'énergie dans un volume limité et de la restituer aisément.

D'un point de vue environnemental, un gain environnemental lié au déverrouillage du déploiement à grande échelle d'énergies dé-carbonées, ainsi qu'en cas de remplacement de centrales thermiques.

Une indépendance vis-à-vis des ressources fossiles, avantage économique sur le long terme car une augmentation des prix de ces ressources et de celui du CO<sub>2</sub> est prévisible.

### **Panorama des technologies disponibles**

Le stockage est associé à une production énergétique qui peut être soit thermique, soit thermique puis électrique, soit directement électrique.

Le **stockage d'électricité** nécessite plusieurs étapes de transformation.

Il existe cinq formes de stockage d'électricité :

	<b>Transformation 1</b>	<b>Stockage d'énergie</b>	<b>Transformation 2</b>	
<b>Electrochimie – accumulateurs</b>	Réaction électrochimique	Potentiel électrochimique	Réaction électrochimique inverse	<b>Stockage électrochimique /chimique</b>
<b>Hydrogène</b>	Electrolyse de l'eau	Hydrogène	Pile à combustible	
<b>Inertie–volant d'inertie</b>	Moteur entraînant un disque	Energie cinétique de rotation	Alternateur récupérant l'énergie cinétique	<b>Stockage mécanique</b>
<b>Gravitaire - STEP</b>	Pompage	Energie potentielle gravitaire	Turbinage	

<b>AIR comprimé -CAES</b>	Compresseur	Air comprimé	Turbinage	
-------------------------------	-------------	--------------	-----------	--

L'énergie peut également être stockée sous sa **forme thermique** et ensuite restituée sous forme de chaleur :

<b>Le stockage par chaleur sensible</b>	Utilisation d'un matériau (liquide, solide)
<b>Le stockage par chaleur latente</b>	Utilisation d'un matériau à changement de phase
<b>Le stockage par chaleur de réaction</b>	Utilisation d'un réactif (réaction chimique réversible)

## Rappel sur le transfert de chaleur

Le transfert de chaleur est l'un des modes le plus commun d'échange d'énergie, il intervient naturellement entre deux systèmes caractérisés par une différence de température et cela quel que soit le milieu.

L'échange thermique implique un flux de chaleur (en watts) qui exprime la quantité d'énergie passant chaque seconde au travers d'une surface quelconque, ou localement, une densité de flux de chaleur (en  $W/m^2$ ) qui exprime la quantité d'énergie transmise chaque seconde au travers d'une surface unité. Les modèles mathématiques des divers phénomènes de transport lient les flux de chaleur aux températures existant à certains endroits, il permet de prédire par le calcul ce qui pourrait se passer dans un élément de construction dans diverses circonstances.

Ce mode de transfert peut être stationnaire lorsque les températures aux différents points sont constantes, c'est-à-dire indépendantes du temps.

## Différents mode de transfert thermique :

Il existe trois modes de transfert de la chaleur : conduction, convection et rayonnement.

**Conduction** : la chaleur se propage à l'intérieur d'un corps de particule à particule par interaction intermoléculaires, les particules étant au repos.

**Convection** : le transfert de la chaleur s'effectue d'un fluide (liquide ou gaz) vers un corps solide ou inversement, par exemple de l'air vers un mur, les particules se déplaçant les unes vers les autres.

**Rayonnement**: il s'agit d'un transport d'énergie par ondes électromagnétiques. Le rayonnement thermique se produit d'un corps à un autre sans support matériel.

## Transfert de chaleur par Conduction :

La conduction est une transmission de la chaleur dans la matière par vibration moléculaire. Elle concerne surtout les solides, mais aussi les liquides et les gaz pour lesquels elle est souvent négligeable par rapport à la convection ou au rayonnement.

### 1) Loi de Fourier

Elle exprime la proportionnalité de l'effet à la cause :

Cause = gradient de température  $d\theta/dx$

Effet = débit de chaleur (c'est-à-dire flux de chaleur).

$$\varphi = -\lambda \frac{d\theta}{dx} \quad (\text{W/m}^2) \quad \text{ou} \quad \Phi = -\lambda S \frac{d\theta}{dx} \quad (\text{W})$$

### 2) Conductivité thermique :

La conductivité thermique dépend de la structure du matériau, de la densité, de la température, de l'humidité et de la pression. Il s'agit de valeur moyenne en situation réelle.

### 3) Température de contact

Lorsque deux corps à une température différente sont mis en contact, la température de contact est celle de la surface de contact. Elle dépend de l'effusivité des deux matières.

$$b = \sqrt{\lambda \rho c} = \frac{\lambda}{\sqrt{a}} \quad \text{en} \quad \text{W} \cdot \text{s}^{0,5} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\text{Température de contact} : \theta_k = \frac{b_1 \theta_1 + b_2 \theta_2}{b_1 + b_2}$$

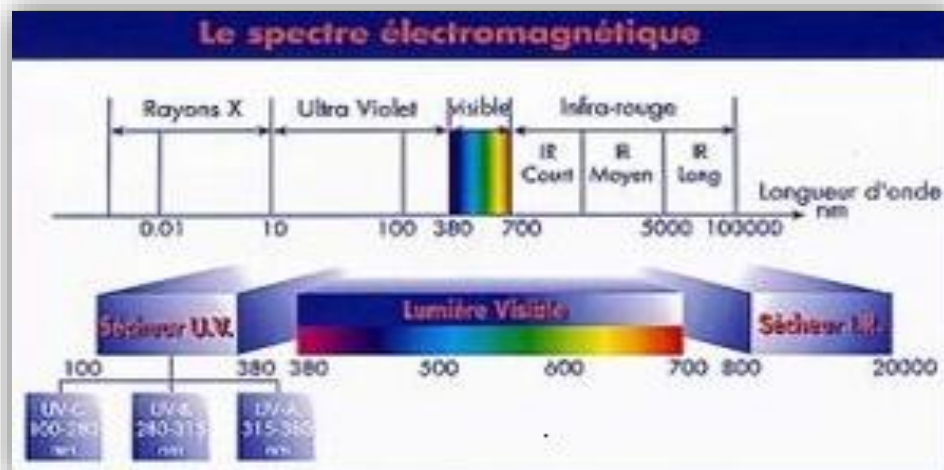
Les valeurs des  $\lambda$ ,  $c$ ,  $a$ ,  $\rho$  se trouve dans l'annexe tableau 1.1

### 3.2 Transmission de la chaleur par rayonnement :

Le rayonnement thermique est émis par des corps solides, des liquides et aussi quelques gaz qui l'absorbent. Il s'agit d'ondes électromagnétiques dans une gamme d'ondes allant de 0,8 à 800  $\mu\text{m}$  (lumière : 0,4...0,8  $\mu\text{m}$ ).

La puissance rayonnée (densité de flux thermique par unité de longueur d'ondes) augmente avec la température et parcourt la plus grande distance possible en fonction de la longueur d'onde (loi du rayonnement de Planck, 3.1).

Avec les élévations de température, les maxima prennent la place des plus petites longueurs d'ondes (loi de déplacement de Wien). Le rayonnement qui apparaît sur un corps peut être absorbé (degré d'absorption  $a$ ), réfléchi (degré de réflexion  $r$ ) ou transmis (degré de transmission  $d$ ) (Fig. 3.2). Les quantités dépendent de la matière, de la texture de la surface, de l'épaisseur de la couche et de la longueur d'onde.



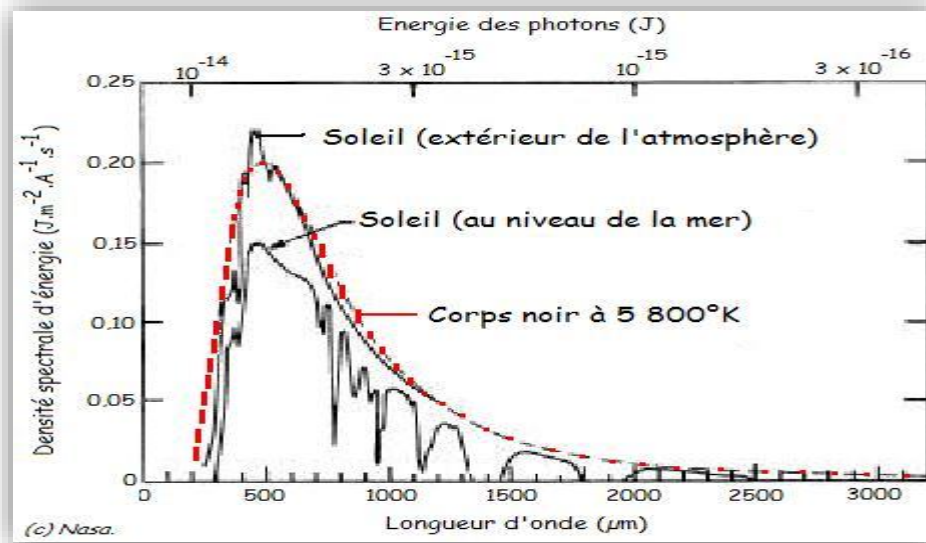
#### Loi de Stefan et de Boltzmann :

L'énergie de radiation totale (émission) d'une surface noire s'élève à :

$$\dot{E}_s = \sigma \theta^4 A \text{ en W}$$

Ou, en se référant à la surface :

$$e_s = \frac{\dot{E}_s}{A} = \sigma \theta^4 \text{ En W/m}^2$$



Répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre.

Constante de rayonnement :

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \cdot W/(m^2 K^4)$$

Les sources de rayonnement réelles émettent moins d'énergie. Pour la source de rayonnement grise, on admet, avec le degré d'émission  $\varepsilon < 1$ .

$$E' = \varepsilon \sigma \theta^4 A \text{ en W ou } e' = \varepsilon \sigma \theta^4 \text{ W/m}^2$$

Les couleurs n'ont que peu d'impact sur le degré d'émission. Le bronze d'aluminium et les métaux blancs ont des valeurs très faibles. Le verre est transparent pour le rayonnement thermique à grande longueur d'onde.

### 3.3 Transmission par convection :

On exprime le Flux thermique par la loi de Newton :

$$\Phi = h A (\theta_p - \theta_f) \text{ notamment } \varphi = \frac{\dot{Q}}{A} = h(\theta_p - \theta_f)$$

Convection naturelle et forcée

Selon la nature du mécanisme qui provoque le mouvement du fluide on distingue:

-La convection libre ou naturelle : le fluide est mis en mouvement sous le seul effet des différences de masse volumique résultant des différences de



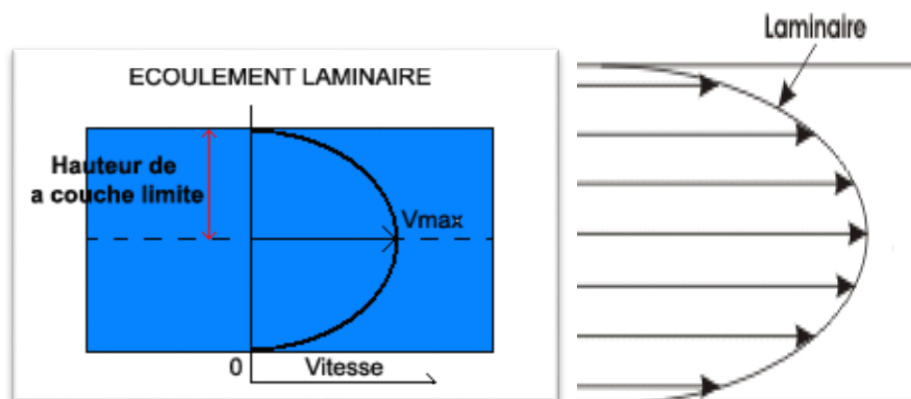
températures sur les frontières et d'un champ de forces extérieures (la pesanteur).

- La convection forcée : le mouvement du fluide est induit par une cause indépendante des différences de température (pompe, ventilateur...).

### 3.3.1 Régime d'écoulement :

Compte-tenu du lien entre le transfert de masse et le transfert de chaleur, il est nécessaire de considérer le régime d'écoulement. Considérons à titre d'exemple l'écoulement d'un fluide dans une conduite :

- a. En régime laminaire : l'écoulement s'effectue par couches pratiquement indépendantes:

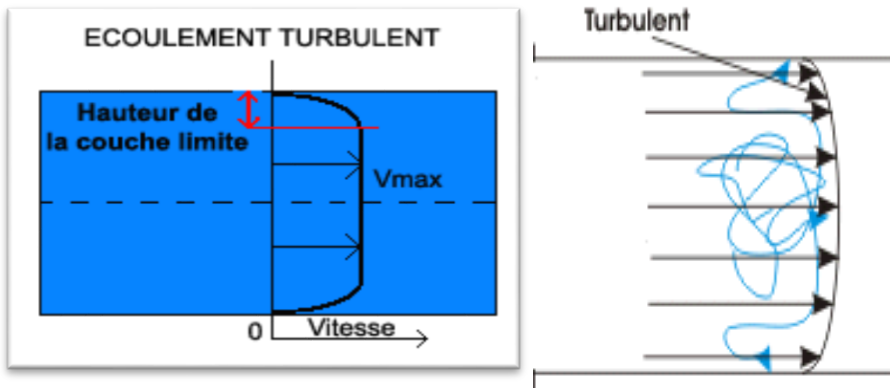


Entre deux filets fluides adjacents les échanges de chaleur s'effectuent donc :

Par conduction uniquement si l'on considère une direction normale aux filets fluides.

Par convection et conduction (négligeable) si l'on considère une direction non normale aux filets fluides.

- b. En régime turbulent : l'écoulement n'est pas unidirectionnel:



L'échange de chaleur dans la zone turbulente s'effectue par convection et conduction dans toutes les directions. On vérifie que la conduction est généralement négligeable par rapport à la convection.

### 3.3.2 Convection naturelle :

Dans le cas d'un transfert de chaleur par convection naturelle le long d'une paroi, le coefficient de convection dépend des caractéristiques du fluide :  $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $C_p$ ,  $\beta$ ,  $g$ , de la paroi caractérisée par la longueur  $L$ , et de l'écart de température  $\Delta\theta$  aux bornes du film ce que l'on peut traduire par une relation du type :

$$\Phi = f(\lambda, \rho, \mu, C_p, \beta, g, L, \Delta\theta)$$

Dans le système  $M, L, T, \theta, Q$ , cette relation entre 8 grandeurs se réduit à une relation entre trois nombres adimensionnels :

$$Nu = f(Gr, Pr)$$

Définis par :

$$Nu = \frac{hD}{\lambda} \text{ Nombre de Nusselt}$$

$$Gr = \frac{\beta \Delta T \rho^2 L^3}{\mu^2} \text{ Nombre de Grashof}$$

$$Pr = \frac{C_p \mu}{\lambda} \text{ Nombre de Prandtl}$$

$$Ra = Gr \cdot Pr$$

Calcul d'un flux de chaleur transmis par convection naturelle s'effectue donc de la manière suivante :

1. Calcul des nombres adimensionnels de Grashof et de Prandtl
2. Suivant la valeur de  $Gr$  et configuration  $\rightarrow$  choix de la corrélation.
3. Calcul de  $Nu$  par application de corrélation (voir l'annexe).
4. Calcul de  $h = \frac{\lambda Nu}{D}$  et de  $\Phi = h S (\theta_p - \theta_\infty)$ .

### 3.3.3 Convection forcée :

L'application de l'analyse dimensionnelle montre que la relation liant le flux de chaleur transféré par convection aux variables dont il dépend peut être recherchée sous la forme d'une relation entre trois nombres adimensionnels :

$$Nu = f(Re, Pr)$$

Définis par :

$$Nu = \frac{h D}{\lambda} \text{ Nombre de Nusselt}$$

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} \text{ Nombre de Reynolds}$$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda} \text{ Nombre de Prandtl}$$

Le calcul de nombre de Nu par l'application de corrélation (voir l'annexe).

Le coefficient  $h$  est un élément essentiel des calculs d'échange de chaleur par convection. Malheureusement, son approche théorique est très difficile. On se contentera de l'estimer en recherchant dans la littérature les corrélations expérimentales correspondant le mieux possible qui nous intéresse, que ce soit en convection forcée ou en convection naturelle. Souvent la valeur de  $h$  sera remise en cause, d'une manière indirecte, au moment du calage de la modélisation physique par des mesures de température in situ.

## ECHANGEURS THERMIQUES

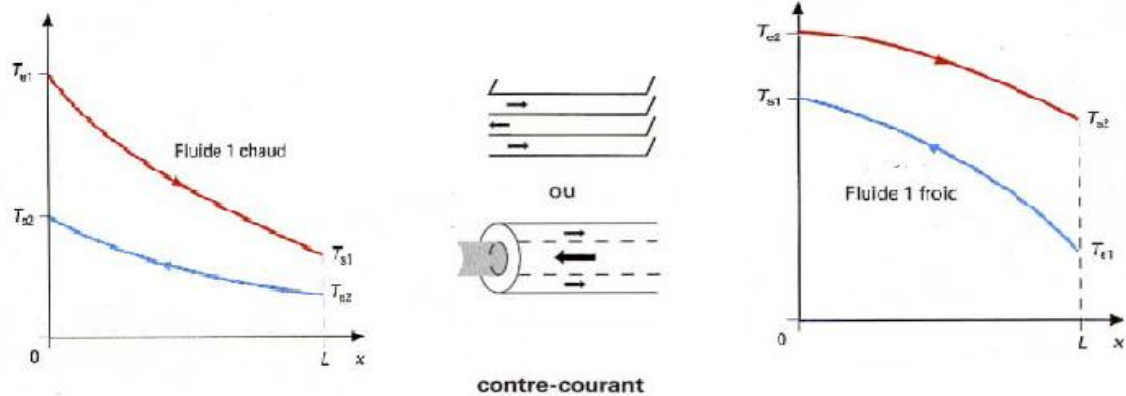
Un échangeur de chaleur est un appareil qui effectue un échange de chaleur entre deux corps ou deux fluides. On dit aussi que c'est un appareil qui permet de transmettre la chaleur d'un fluide chaud à un fluide froid.

Dans les échangeurs les plus courants, les deux fluides sont séparés par une paroi au travers de laquelle les échanges se font par conduction, la transmission de chaleur fluides-paroi relevant essentiellement de la convection.

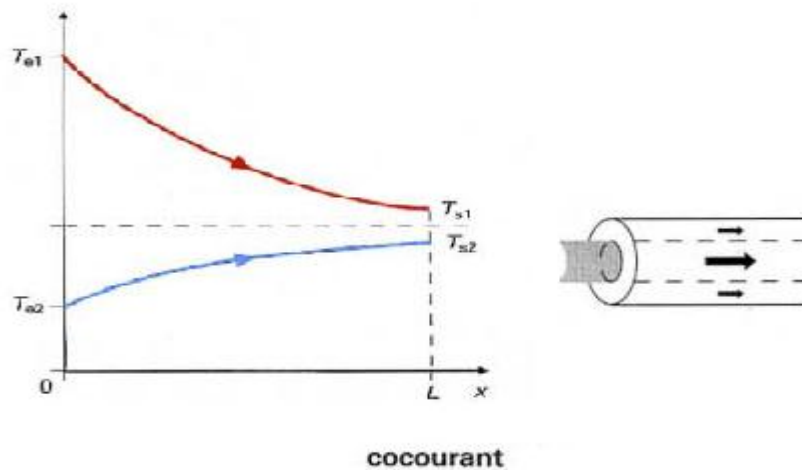
### 1. Différents modes de circulation des fluides caloporteurs

Tous les échangeurs de chaleur se divisent en trois types, d'après le caractère de mouvement des fluides.

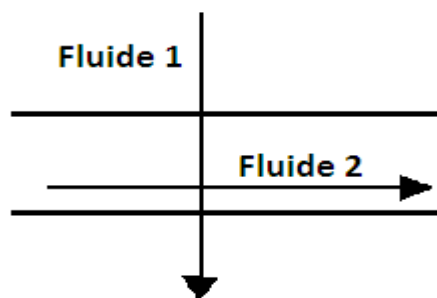
- fonctionnement à contre courant  
Les fluides circulent en sens inverse



- fonctionnement a Co-courant ou courants parallèles  
Les fluides circulent dans le même sens



- fonctionnement a courants croises  
Le mouvement des fluides est croisé



## 2. Classement des échangeurs

### a) Échangeurs tubulaires

On peut distinguer trois catégories suivant le nombre de tubes et leur arrangement, toujours réalisés pour avoir la meilleure efficacité possible pour une utilisation donnée :

— échangeur monotube (figure a) dans lequel le tube est placé à l'intérieur d'un réservoir et a généralement la forme d'un serpent ;

— échangeur coaxial (figure b) dans lequel les tubes sont le plus souvent cintrés ; en général, le fluide chaud ou le fluide à haute pression s'écoule dans le tube intérieur

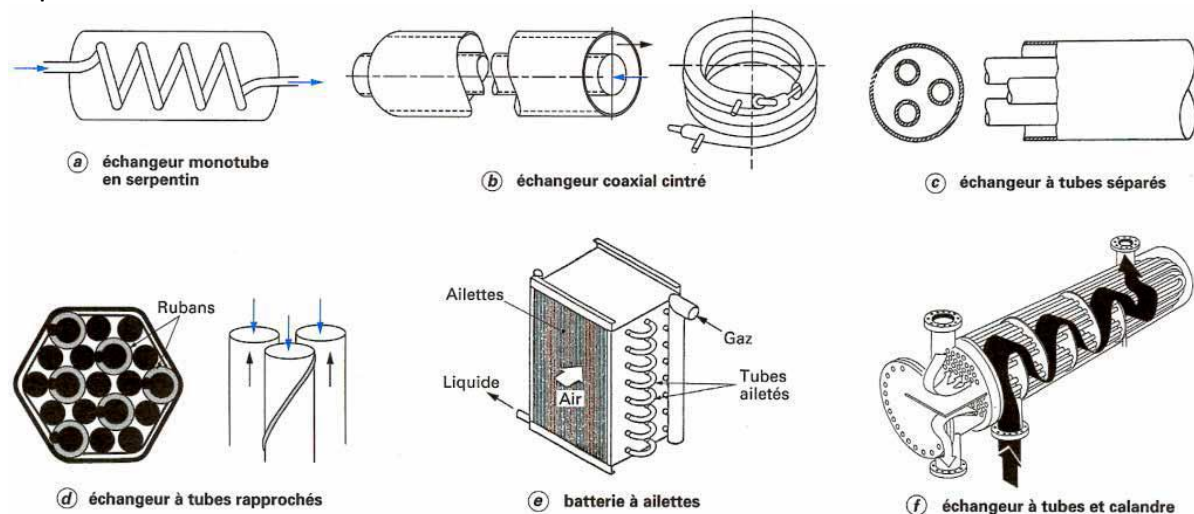
— échangeur multitubulaire, existant sous quatre formes :

- échangeur à tubes séparés (figure c): à l'intérieur d'un tube de diamètre suffisant (de l'ordre de 100 mm) se trouvent placés plusieurs tubes de petit diamètre (8 à 20 mm) maintenus écartés par des entretoises. L'échangeur peut être soit rectiligne, soit enroulé,

- échangeur à tubes rapprochés (figure d): pour maintenir les tubes et obtenir un passage suffisant pour le fluide extérieur au tube, on place un ruban enroulé en spirale autour de certains d'entre eux. Les tubes s'appuient les uns sur les autres par l'intermédiaire des rubans.

- échangeur à tubes ailetés (figure e): ces tubes permettent d'améliorer le coefficient d'échange thermique.

- échangeur à tubes et calandre (figure f): c'est l'échangeur actuellement le plus répandu.



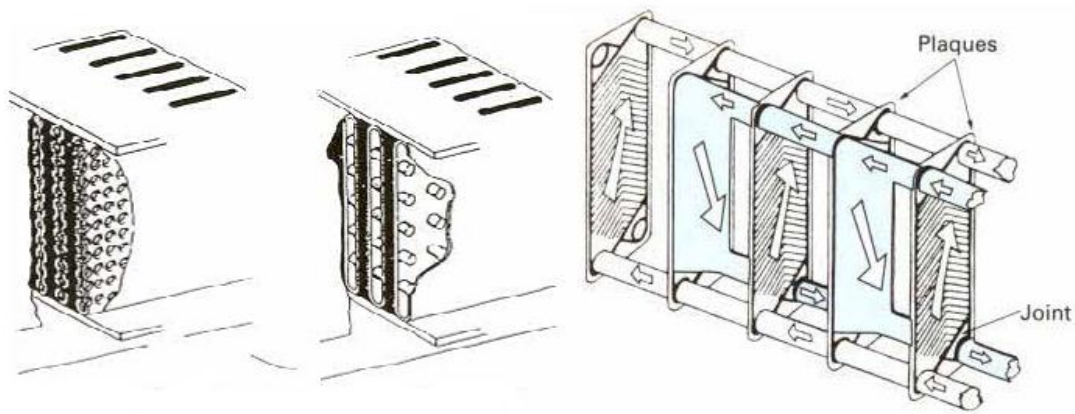
## Différents types d'échangeurs tubulaires

### b) Échangeurs à plaques

Le concept des échangeurs à plaques date du début du siècle ; ces échangeurs ont été étudiés à l'origine pour répondre aux besoins de l'industrie laitière, puis utilisés par la suite dans diverses branches de l'industrie (chimie, nucléaire, etc.). On regroupe sous ce vocable différentes technologies dont certaines sont d'un développement assez récent. On distingue suivant la géométrie de canal utilisée les échangeurs à surface primaire et les échangeurs à surface secondaire.

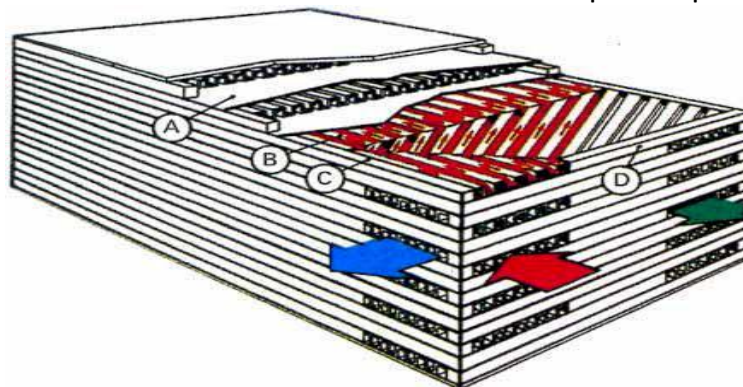
- Échangeurs à surface primaire

Les échangeurs à surface primaire sont constitués de plaques corruguées, nervurées ou picotées. Le dessin du profil de plaques peut être assez varié mais il a toujours un double rôle d'intensification du transfert de chaleur et de tenue à la pression par multiplication des points de contact. Les différentes géométries de plaques les plus couramment rencontrées sont présentées sur la figure.



- Échangeurs à surface secondaire

Ces échangeurs sont réalisés en aluminium ou en acier inoxydable ; ils sont constitués par un empiilage de tôles ondulées formant des ailettes séparées par des tôles planes.



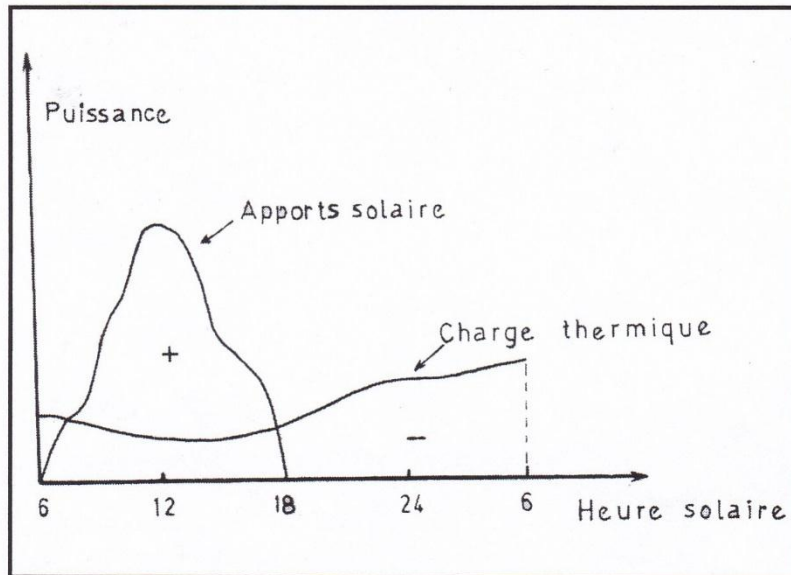
A tôle de séparation  
B surface d'échange

C barre latérale  
D barre d'extrémité

## 1. Stockage Thermique

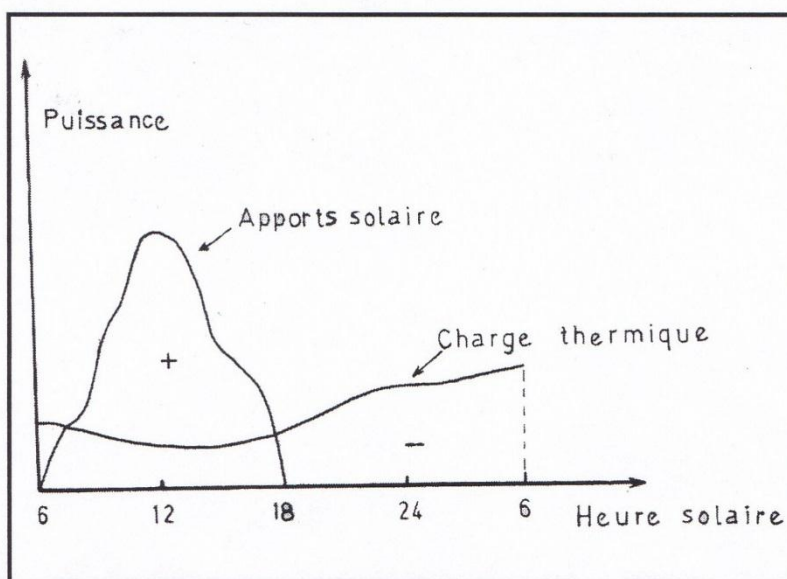
Le stockage est un élément essentiel de tout système solaire les apports et les besoins étant générale déphasés l'un par rapport à l'autre. Ceci particulièrement le cas avec les systèmes de chauffage. L'examen d'un tel système à l'échelle de la journée,

permet de noter qu'en moyenne, le besoin en chauffage augmente la nuit alors que les apports solaires n'existent que le jour, voir figure 2. Le but du stockage sera donc d'emmagasiner l'excédent marqué (+) afin de l'utiliser la nuit (-).



**Figure 2 : Apporte et besoins sur une journée**

Une variation similaire se produit à l'échelle de l'année (figure 3) ou l'on note aussi que les apports sont généralement en excédent des besoins pendant les périodes de beau temps et inversement pendant les périodes de mauvais temps.



**Figure 3 : Apporte et besoins sur une Année**

Le problème du déphasage (figures 2 et 3) entre la production de chaleur et les besoins des utilisateurs peut être résolu par l'utilisation d'un accumulateur thermique dans la chaîne de conversion thermodynamique

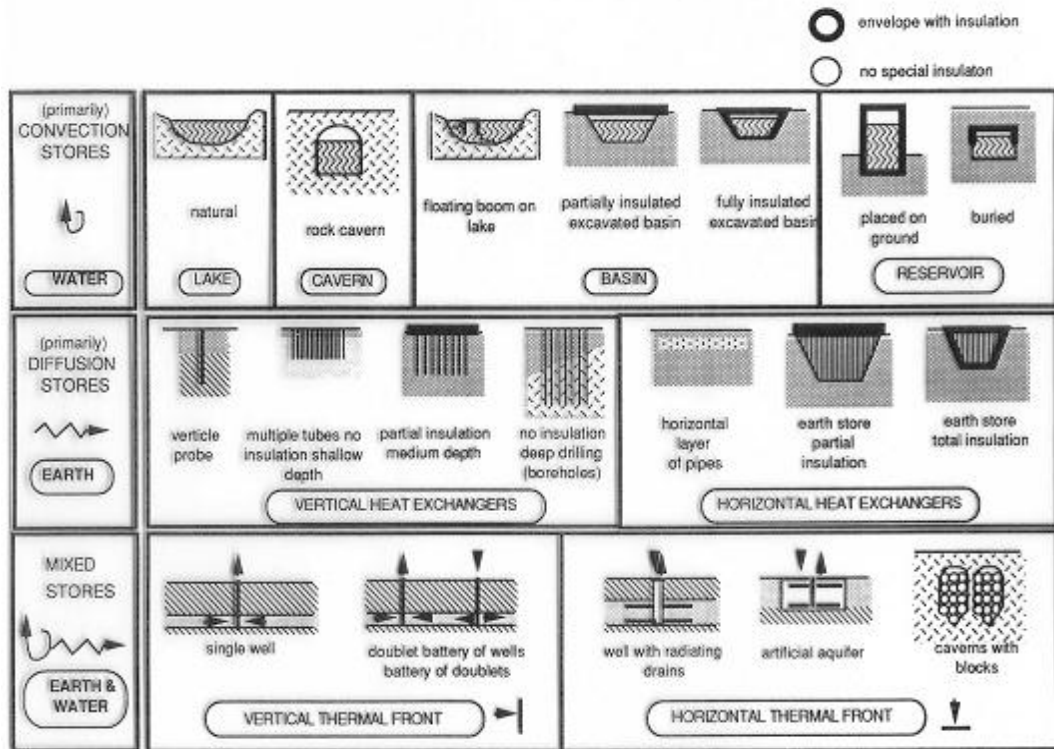
Donc on distingue, suivant la capacité du stockage :

- Stockage Très court terme (de l'ordre de la minute ou de l'heure) :  
Les ballons électriques de 30 l environ que l'on place aux postes de soutirage permettent de stocker temporairement une faible quantité d'eau chaude en limitant les pertes de distribution dans les conduites
- Stockage courte durée \* jours \* : le solaire thermique nécessite un stockage au moins diurne, réalisé le plus souvent sous forme de cuve à eau. Voir figure 4



*Figure 4 : Gamme de cuves en acier avec échangeurs inox*



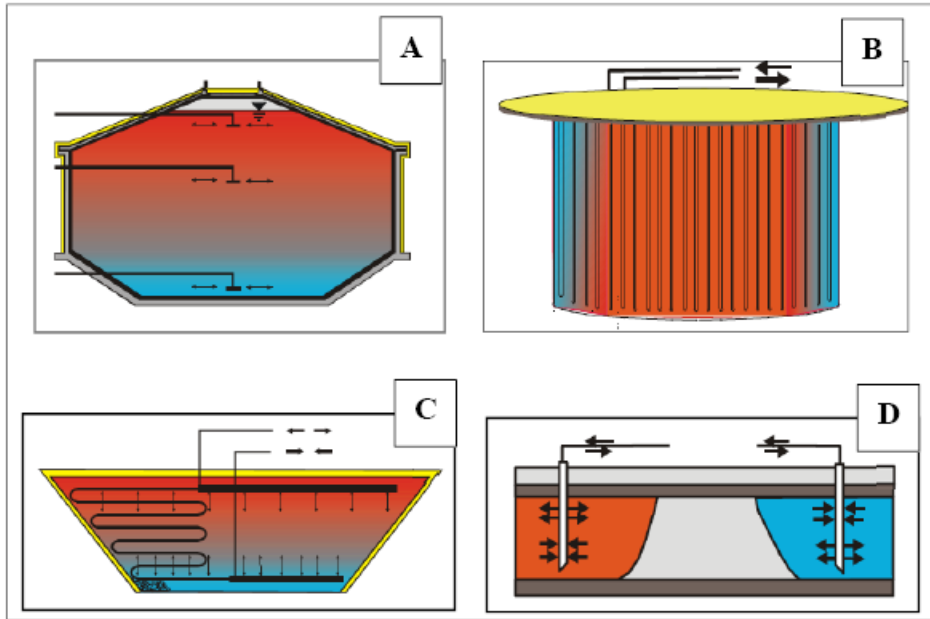


**Figure 5 : Typologie du stockage saisonnier de chaleur, eau, sol et aquifère**

- Stockage Moyen terme (semaine) : Ce stockage de moyen terme (semaine ou plus) n'a que peu d'intérêt. Il est néanmoins effectué dans des stocks saisonniers dont le dimensionnement (ou l'efficacité) est insuffisant. Ce n'est cependant pas un objectif.
- Stockage longue durée (inter-saisonnier), lorsque la capacité permet d'emmagasiner l'excédent d'énergie pour l'utiliser en hiver .

Le stockage saisonnier peut être réalisé par différents principes. La Figure 5 résume ces technologies qui peuvent être groupées en trois grandes parties : les stockages à convection, à diffusion et mixed.

Au cours des 20 dernières années, quatre techniques de stockage se sont imposées (Figure 6) Le stockage thermique dans le sol : dans un réservoir d'eau (A), par échangeur géothermiques (B), par aquifères (C) et dans un réservoir eau + gravier (D).: le stockage à eau, le stockage de type « lit de cailloux », le stockage par champs de sondes géothermiques ainsi que le stockage en nappe aquifère.



*Figure 6 : Les 4 techniques de stockage saisonnier qui se sont imposées au cours des 20 dernières années*

Donc le choix de la capacité de stockage est généralement fonction d'autres éléments du système tels que surface des capteurs, type des capteurs, système de restitution de l'énergie à l'habitat, etc...mais aussi et surtout fonction du type de climat. En effet un stockage journalier est bien adapté aux régions généralement bien ensoleillées ayant des écarts de température diurne élevés. Par contre, dans les régions telles que l'Europe du nord, un stockage saisonnier est pratiquement indispensable, les flux en hiver dépassent rarement en moyenne le seuil de fonctionnement des capteurs.

## **2/ Caractéristique des accumulateurs de chaleur :**

L'énergie peut être accumulée soit sous forme de chaleur sensible dans un milieu solide liquide, soit forme de chaleur de fusion de sels judicieusement choisis. Ce stockage présente 5 catégories de paramètre qui paramètre d'optimiser le choix des accumulateurs :

### *1- Niveau thermique désiré :*

C'est le paramètre le plus important, ce niveau dépend d'une part du niveau thermique dont on dispose du côté de source d'énergie (capteur plan, four solaire) mais également des cycles de conversion, des formes d'énergie ultérieure et des niveaux thermique qu'on désire obtenir.

#### 2- Propriétés thermiques des corps envisagé :

- Chaleur sensible.
- Chaleur de fusion.
- Le coefficient de conductibilité (Un bon coefficient pour les échange soient rapide)
- La variation du volume au court du changement.
- La stabilité thermique (soit stable ne ce décomposent pas).
- Tension de vapeur aux températures envisagées.
- Masse volumique forte, afin de réduire le dimensionnement de l'installation.

#### 3- Echange thermique :

Il faut que les échanges thermique à l'extraction des calories soient aussi rapides que possibles. Les corps une chaleur sensible et de fusion importante peuvent avoir une conductibilité faible donc il faut augmenter la surface d'échange.

#### 4- Isolation thermique :

Il est indispensable de réaliser un calorifuge efficace dans le plus faible volume possible, afin de ne pas perdre l'avantage de la capacité calorifique élevée de stockage. Ainsi que l'emplacement de l'accumulateur thermique joue un rôle primordial dans les pertes thermiques en valeur relative. Les accumulateurs sont quelquefois enterrés. L'avantage de cette disposition est que la température du sol est relativement constante tout au long de l'année.

#### 5- Caractéristique pratique :

- Cycles de changement de phase.
- Danger d'incendie et d'explosion.
- Viscosité au température envisagé (stockage fluide, circulation).

### **3/ Les différents processus physique de stockage de l'énergie thermique :**

Il y a lieu de distinguer trois modes de stockage :

**a)- Le stockage par chaleur sensible** : La chaleur stockée augmenté la température du corps récepteur situé dans le réservoir (solide, liquide ou gaz) sans changement d'état pour ce dernier. L'énergie stockée conduit à une élévation de la température du matériau (capacité moyenne de  $2\text{M J/m}^3\text{K}$ ).

**b)- Le stockage par chaleur latente** : la chaleur stockée entraîne une variation de température et un changement d'état du corps récepteur (solide\_liquide par exemple) ; le matériau change de phase à température constante en libérant ou accumulant de la chaleur suivant le sens de la transformation (capacité moyenne de  $200\text{ M J/m}^3$ ).

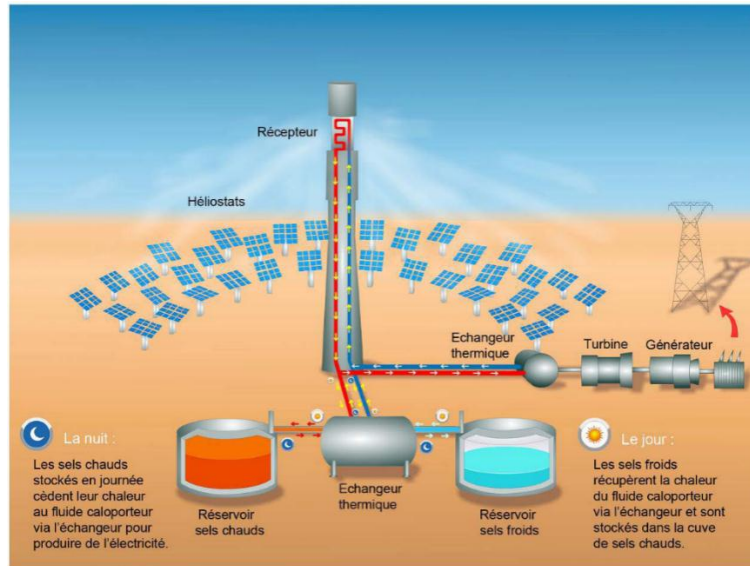
**c)- Le stockage par chaleur de réaction** : la chaleur stockée entraîne une modification chimique du corps récepteur par réaction endothermique réversible. La réaction inverse, naturellement exothermique, restitue la chaleur emmagasinée. (Capacité moyenne de  $700\text{ M J/m}^3$ ).

### **4/ Le stockage par chaleur sensible**

#### **Stockage thermique par chaleur sensible**

Le stockage par chaleur sensible est la technique de stockage la plus mature à ce jour. Il s'agit d'un volume isolé d'un matériau que l'on met en contact thermique avec les capteurs ; la chaleur capté se traduisant par une augmentation de la température du matériau. Le choix du milieu de stockage est généralement conditionné par le système. C'est aussi le principe que l'on retrouve dans l'utilisation d'un ballon d'eau chaude ou d'une simple bouillote. Dans le cas d'une centrale thermodynamique, il s'agit de stocker la chaleur emmagasinée au cours de la journée d'ensoleillement. Le fluide caloporteur (qui transporte la chaleur) circule jusqu'à un échangeur thermique relié à deux réservoirs de sels fondus. Les sels fondus froids passent à travers l'échangeur et

emmagasinent à leur tour la chaleur du fluide, ils sont ensuite stockés dans un réservoir de sels chauds. Au coucher du soleil, le circuit s'inverse et les sels chauds circulent, à travers l'échangeur, vers le réservoir à sels froids. La chaleur est ainsi cédée au fluide caloporteur (autour de 500°) et permet d'alimenter une turbine pour produire de l'électricité.



Les matériaux de stockage pour la chaleur sensible les plus courants sont : l'eau, la roche, la céramique, le sol, la brique et le béton. Dans les systèmes de stockage thermique par chaleur sensible, l'eau et la roche sont les deux matériaux les plus utilisés. Ils sont abondants, peu chers, et la technologie sur leur utilisation est bien assimilée.

La quantité d'énergie qui peut être stockée dans un matériau est proportionnelle à la différence de température à l'entrée et la sortie du milieu de stockage ( $\Delta T$ ), à la masse du matériau de stockage ( $m$ ) et sa chaleur spécifique ( $C_p$ ). La quantité de chaleur sensible ( $Q$ ) est donnée par l'équation suivante :

$$E = \int_{T_{froid}}^{T_{fchaud}} m \cdot C_{p,s} \cdot dT$$

Donc  $Q = m C_p \Delta T$

La chaleur spécifique du matériau est un critère important, car c'est la quantité d'énergie nécessaire pour élever 1 kg du matériau de 1°C. Plus la chaleur spécifique est grande, plus le matériau peut emmagasiner de l'énergie. Dans les systèmes de stockage thermique par chaleur sensible, il n'y a pas de changement de phase au-delà de la plage de températures du processus de stockage. Ainsi, la quantité maximale d'énergie emmagasinée (Q) est limitée par la température de changement de phase. Cependant, à la pression atmosphérique, la température limite de l'eau dans un système de stockage thermique par chaleur sensible est limitée à 100°C. Ainsi, pour des besoins de stockage à des températures plus élevées, l'utilisation d'un autre matériau, avec une chaleur spécifique plus faible, est nécessaire. La faible chaleur spécifique des matériaux comme la roche ou la brique est quelque peu compensée par les grands changements de températures que permettent ces matériaux. Ainsi, la roche est souvent utilisée pour des applications à haute température car sa chaleur spécifique vaut la moitié de celle de l'eau (Tableau 1)

Material	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Specific heat (J/kgK)	Volumetric thermal capacity (10 <sup>6</sup> J/m <sup>3</sup> K)
Clay	1458	879	1.28
Brick	1800	837	1.51
Sandstone	2200	712	1.57
Wood	700	2390	1.67
Concrete	2000	880	1.76
Glass	2710	837	2.27
Aluminum	2710	896	2.43
Iron	7900	452	3.57
Steel	7840	465	3.68
Gravelly earth	2050	1840	3.77
Magnetite	5177	752	3.89
Water	988	4182	4.17

Source: Norton (1992).

**Tableau 1. Propriétés de quelques matériaux**

Un autre facteur important dans le choix du matériau de stockage reste la vitesse à laquelle la chaleur peut être extraite et libérée. Cette caractéristique dépend

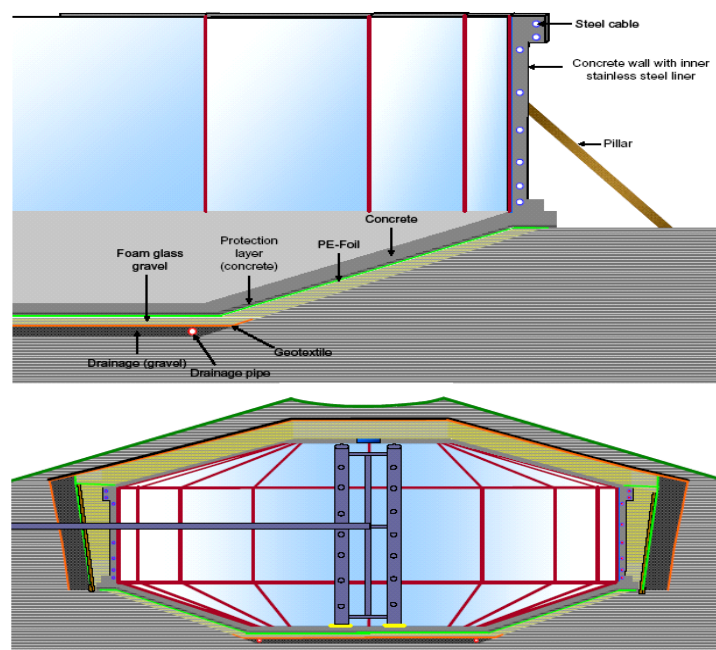
de la diffusivité thermique du matériau ( $\alpha$ ) soit le rapport entre la conductivité thermique du matériau ( $k$ ) et la chaleur spécifique  $\rho C_p$ :  $\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$

Un bon matériau de stockage thermique sensible est donc celui qui présente à la fois une conductivité et une chaleur spécifique volumétrique élevées.

#### ***4-1-a/ Stockage Liquide :***

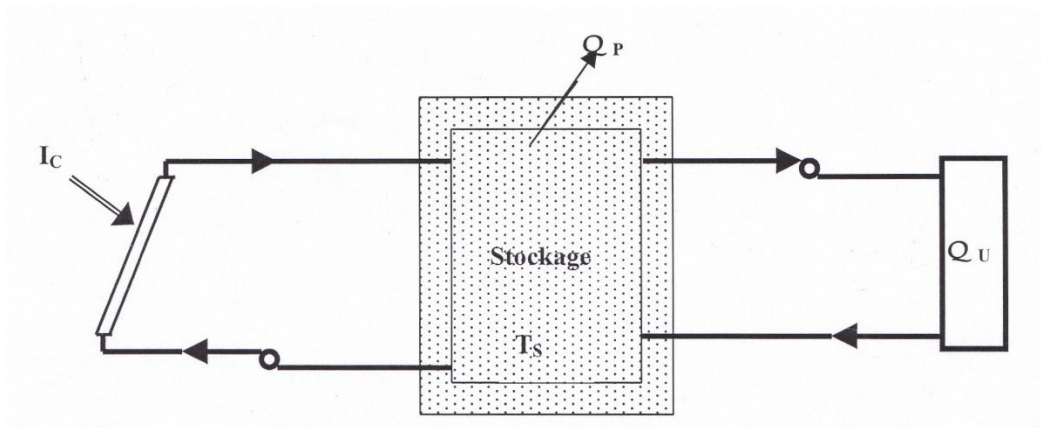
Le stockage liquide n'utilise pratiquement que l'eau, ce fluide ayant une chaleur massique ( $C_p=4180 \text{ J/Kg } ^\circ\text{C}$ ) parmi les plus élevées.

Le stockage à eau a été réalisé dans plusieurs projets de démonstration réels, surtout en Allemagne. La Figure 8 montre le principe du stockage du projet CSHPSS à Munich, le volume de stockage étant intégré au sous-sol, ce qui représente le cas le plus courant.



***Figure 8 : Coupe du stock du projet CSHPSS de Munich***

Le fonctionnement pour ce type de stockage est schématisé dans la figure 4.



**Figure 9**

Dans un tel système, l'eau dans le ballon de stockage sera généralement stratifiée, l'eau chaude se trouvant dans la partie supérieure.

Le bilan thermique s'écrit :

$$Q_c = Q_s + Q_u + Q_p$$

Où :  $Q_c$  Puissance captée.

$Q_s$  Puissance Stockée.

$Q_u$  Puissance utilisée.

$Q_p$  Puissance perdue.

A. On néglige la stratification des températures dans le ballon on a :

$$Q_s = M C \frac{dT_s}{dt} = A \eta I_c - Q_c - Q_p$$

Où :  $T_s$  Température moyenne de stockage .

$A$  Surfaces des capteurs

$\eta$  Rendement instantané des capteurs .

$I_c$  Flux sur le plan des capteurs .

On a le rendement du capteur :  $\eta = f_R \left[ \eta_0 - U \frac{(T_e - T_a)}{I_c} \right]$ .

Où :  $f_R$  Facteur de conductance de l'absorbeur .

$\eta_0$  Rendement optique du capteur .

$U$  Conduction thermique entre l'absorbeur et l'ambiance .

Les pertes thermique sont exprimées par :

$$Q_p = K_S (T_s - T_e)$$



Ou  $K_s$  est conductance entre le stockage et l'extérieure.  
 $T_e$  la température dans l'espace entourant la cuve de stockage .

On substituant  $\eta$  et  $Q_p$

$$Q_s = m C \frac{dT_s}{dt} = A F_C F_R [\eta_0 I_c - U (T_s - T_a)] - Q_u - K_s (T_s - T_e)$$

Ou  $F_C$  Fonction de contrôle de fonctionnement des pompes .

$$F_C \begin{cases} 1 \text{ lorsque } Q_C > W_P \\ 0 \text{ lorsque } Q_C < W_P \end{cases}$$

L'intégration de l'équation se fait généralement avec un pas de temps de l'ordre de heure. La méthode généralement utilisée est la méthode d'Euler, soit :

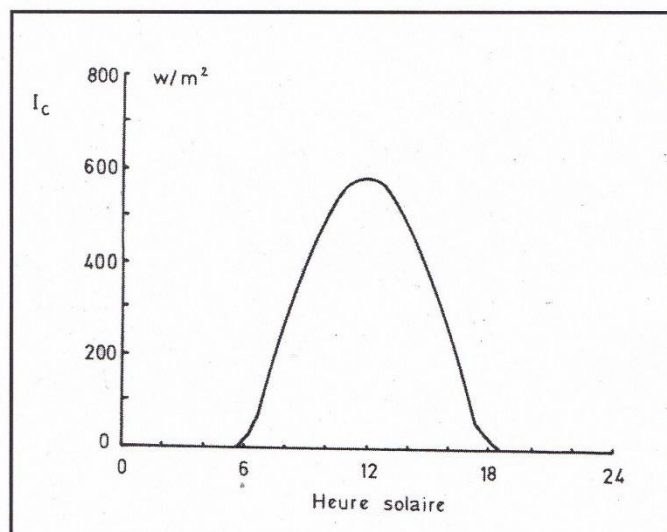
$$T_{si+1} = T_{si} + \frac{\Delta t}{MC} \{ A F_C F_R [\eta_0 I_{ci} - U (T_{si} - T_{ai})] - Q_{Ui} - K_s (T_{si} - T_{ei}) \}$$

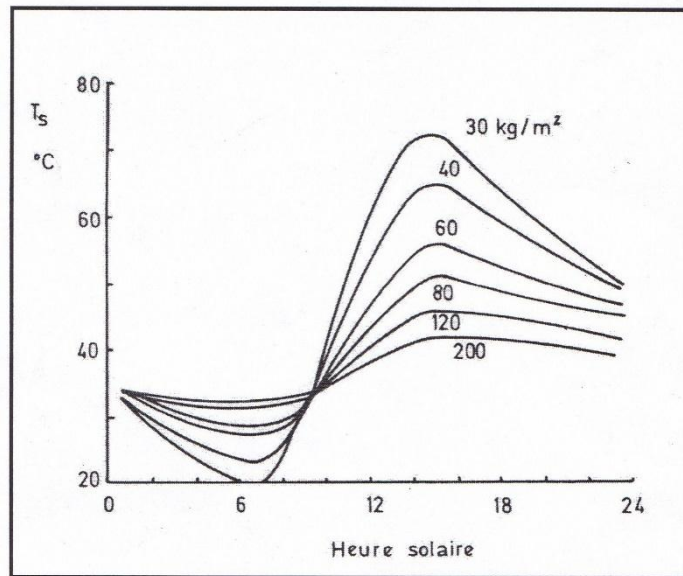
Ou l'indice  $i$  précise la valeur de la variable à l'instant  $i \Delta t$

La solution numérique de l'équation précédente, pour différent volume de stockage, donne les résultats de la figure 1111111

On remarque que :

- La variation de  $T_s$  sur un cycle de 24h diminue lorsque  $M$  augmente , le système à une inertie plus importante .
- La température de stockage est plus importante entre 7h – 17h ,càd la période pendant le fonctionnement des pompe du circuit capteur .

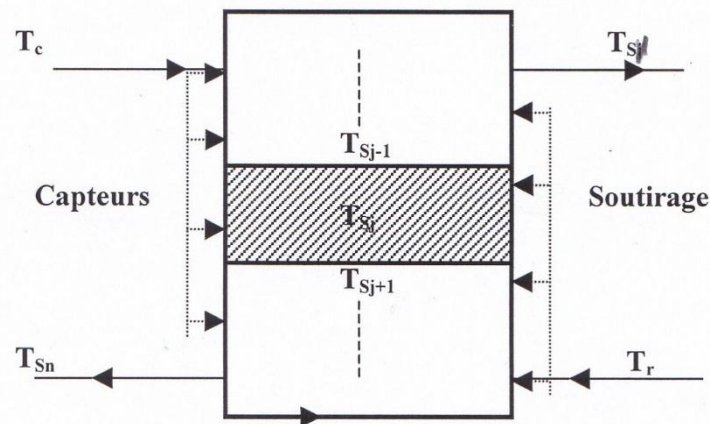




**Figure 11 Evolution de la température de stockage**

**B. On tient compte de la stratification thermique du stockage :**

Dans ce modèle on suppose le stockage divisé en plusieurs tranches horizontales ayant chacune une température homogène  $T_{sj}$



**Figure 12 : Stockage liquide stratifié.**

On introduit les fonctions de contrôle circuit capteur  $F_{cj}$  et les fonctions de contrôle circuit soutirage  $F_{sj}$  définies comme suit :

$$F_{cj} \begin{cases} 1 & \text{lorsque } T_{sj} < T_c < T_{sj-1} \\ 0 & \text{Dans les autres cas} \end{cases}$$

$$F_{sj} \begin{cases} 1 & \text{lorsque } T_{sj} < T_r < T_{sj-1} \\ 0 & \text{Dans les autres cas} \end{cases}$$

L'eau provenant des capteurs descendra jusqu'à la tranche j pour laquelle  $F_{cj}=1$ , c'est à dire jusqu'à la tranche telle que  $T_{sj} < T_c < T_{sj-1}$ . Aussi l'eau de retour du circuit de chauffage montera dans le ballon jusqu'à la tranche pour laquelle  $F_{sj}=1$ . Le liquide de la tranche j déplacé par le fluide capteur descendra dans la tranche j+1 et le liquide déplacé par le fluide du circuit de chauffage montera à la tranche j-1. Les circuits capteurs et chauffage sont continuellement aux températures  $T_{sn}$  et  $T_{sl}$  respectivement.

Le bilan thermique de la tranche j s'écrit à tout instant :

$$\begin{aligned} (\dot{m}C)_j \frac{dT_{sj}}{dt} = & (\dot{m}C)_c \left[ F_{cj}(T_c - T_j) + (T_{j-1} - T_j) \sum_{k=1}^{j-1} F_{ck} \right] \\ & + (\dot{m}C)_s \left[ F_{sj}(T_r - T_j) + (T_{j+1} - T_j) \sum_{k=j+1}^n F_{sk} \right] \\ & + \frac{HS}{nK_L} [(T_{j-1} - T_j) - (T_j - T_{j+1})] - K_{Sj}(T_{sj} - T_e) \end{aligned}$$

$$(\dot{m}C)_j \frac{dT_{sj}}{dt} \quad \text{Variation de l'énergie stockée dans tranche j .}$$

$$(\dot{m}C)_c [F_{cj}(T_c - T_j)] \quad \text{Energie provenant du capteur lorsque } F_{cj}=1$$

$$(\dot{m}C)_c [(T_{j-1} - T_j) \sum_{k=1}^{j-1} F_{ck}] \quad \text{Energie provenant de la tranche j-1}$$

$$(\dot{m}C)_s [F_{sj}(T_r - T_j)] \quad \text{Energie perdue lorsque la température de retour est telle que } F_{sj} = 1$$

$$(\dot{m}C)_s [(T_{j+1} - T_j) \sum_{k=j+1}^n F_{sk}] \quad \text{Energie perdue lorsque le liquide de retour déplace le liquide plus froid des tranches inférieures vers le haut c'est à dire lorsque } T_r < T_{sj+1}$$

$- K_{Sj}(T_{Sj} - T_e)$  Energie perdue vers l'espace environnement de stockage

$\frac{HS}{nK_L} [(T_{j-1} - T_j)]$  Energie gagnée par conduction à partir de la tranche supérieure

$-\frac{HS}{nK_L} [(T_j - T_{j+1})]$  Energie perdue par conduction à la tranche inférieure

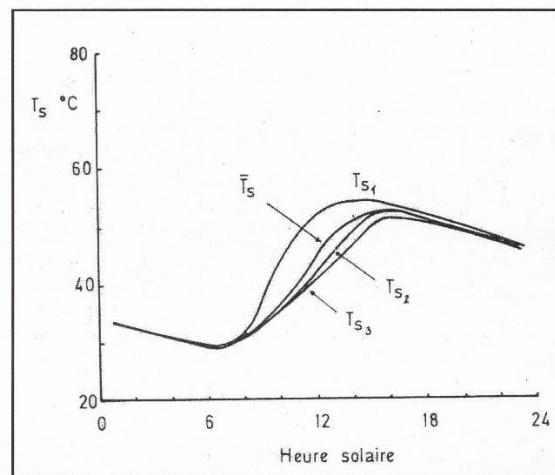
H, S Sont respectivement la hauteur et la section horizontale du ballon.

,n Nombre de tranches de ballon .

$K_L$  Conductivité du liquide stocké

$K_{Sj}$  Conductivité entre la tranche j et l'environnement

L'intégration numérique de système pour un stockage divisé en trois tranches donne l'évolution des températures  $T_{S1}$ ,  $T_{S2}$  et  $T_{S3}$  est représentée dans la figure 13.



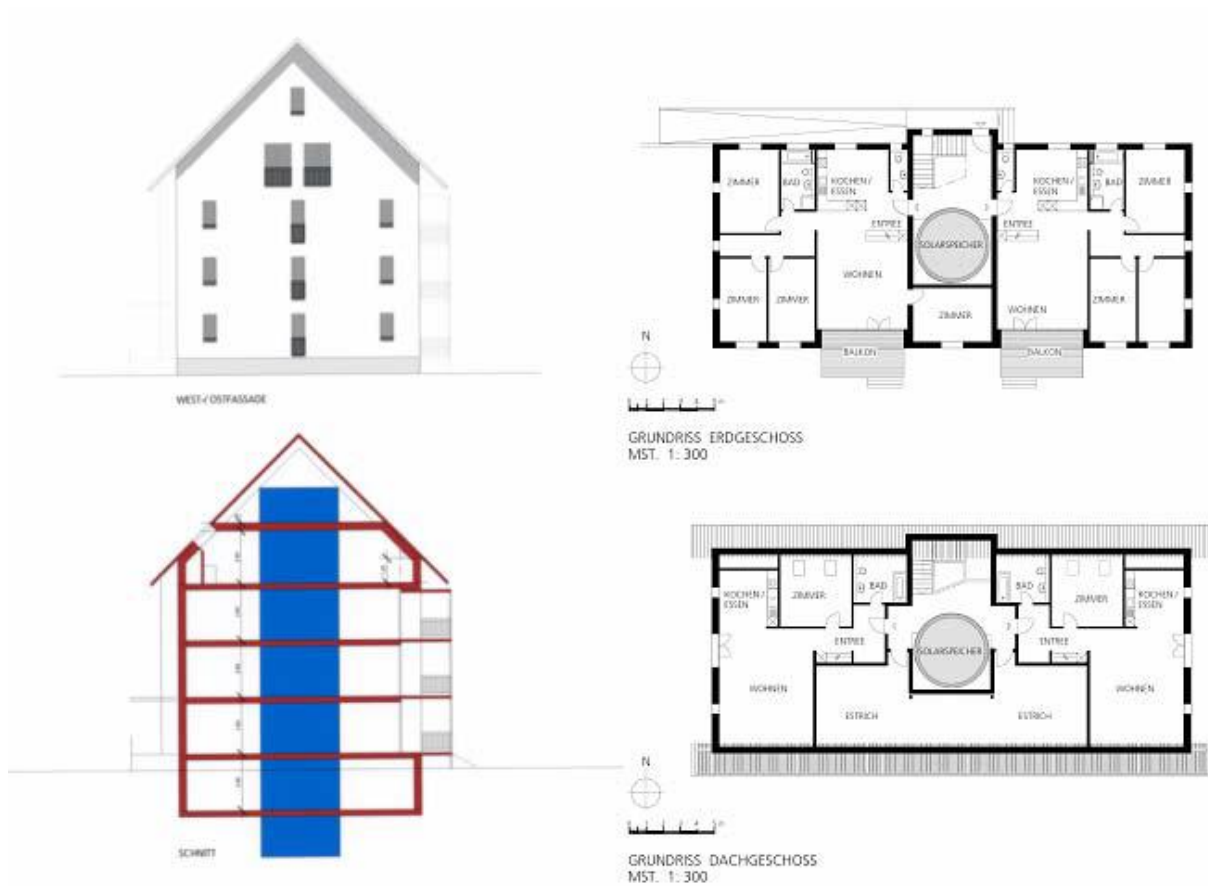
**Figure 13 : Température dans une cuve de stockage stratifiée**

On remarque que la stratification commence peu après démarrage des pompes , cette stratification s'intensifie jusqu'à midi puis diminue pour n'être pratiquement plus perceptible à la fin du cycle de 24 heures.

Si on compare la courbe  $T_s$  moyenne au résultats de la figure 12, on constate que pour les même masse de stockage  $80 \text{ Kg/m}^3$  on a une température moyenne légèrement plus élevé que dans le cas précédent. Donc la stratification a tendance à *améliorer le rendement du système*, car le liquide alimentant le capteur provient du bas de la cuve, il est plus froid que la température du stockage, donc les capteurs fonctionneront avec un liquide plus froid d'où un meilleur rendement.

### **Exemples d'applications**

La Figure 9 montre le projet de Jenni en Suisse. Un ballon de stockage de 205m<sup>3</sup>, chauffé par 276m<sup>2</sup> de capteurs solaires, est intégré au centre du bâtiment. Avec cette technique un stockage saisonnier est possible.



**Figure 9 : 100% solaire pour ce projet de bâtiments locatifs de Jenni avec une cuve centrale de 205m<sup>3</sup> et 276m<sup>2</sup> de capteurs solaires (**

Cependant, pour un fonctionnement optimisé, la charge et décharge de la cuve doit être géré afin de maximiser la stratification dans la cuve. Ceci est montré dans le Figure 10 sur l'exemple de Jenni en Suisse : le chargement de la cuve est géré par un ensemble de vannes hydrauliques pour éviter une dé-stratification du stock.

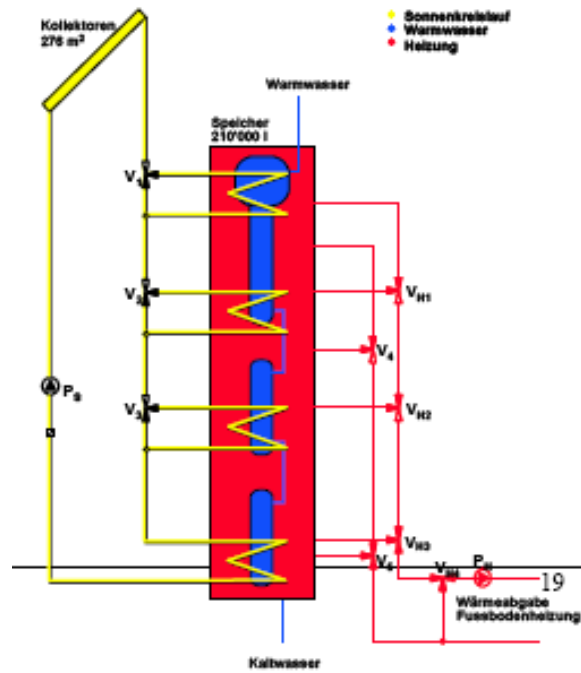
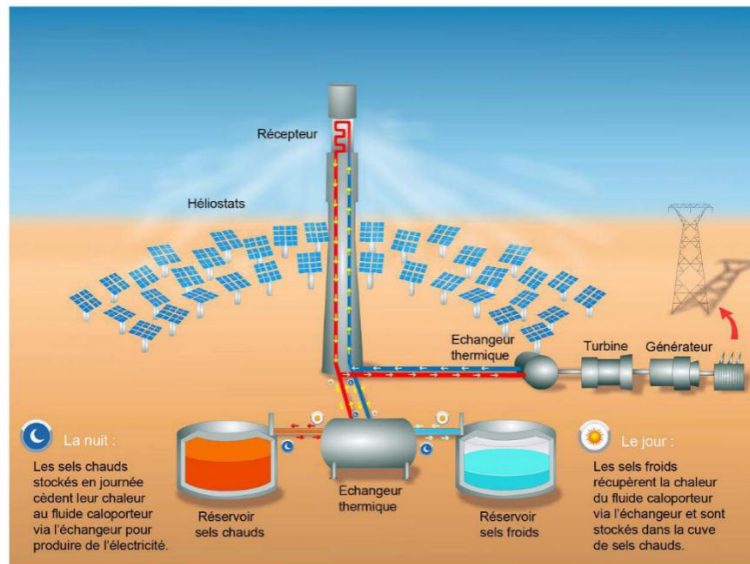


Figure 10 : Gestion de la stratification pour la charge/décharge d'un stock de 2057m3

### Stockage thermique par chaleur sensible



Le stockage par chaleur sensible a fait ses preuves depuis des milliers d'années. Il s'agit par exemple du simple fait de poser une pierre près d'un feu, de la déplacer et de profiter de la chaleur qu'elle restitue dans le temps. C'est aussi le principe que l'on

retrouve dans l'utilisation d'un ballon d'eau chaude ou d'une simple bouillote. Dans le cas d'une centrale thermodynamique, il s'agit de stocker la chaleur emmagasinée au cours de la journée d'ensoleillement. Le fluide caloporteur (qui transporte la chaleur) circule jusqu'à un échangeur thermique relié à deux réservoirs de sels fondus. Les sels fondus froids passent à travers l'échangeur et emmagasinent à leur tour la chaleur du fluide, ils sont ensuite stockés dans un réservoir de sels chauds. Au coucher du soleil, le circuit s'inverse et les sels chauds circulent, à travers l'échangeur, vers le réservoir à sels froids. La chaleur est ainsi cédée au fluide caloporteur (autour de 500°) et permet d'alimenter une turbine pour produire de l'électricité.

### **Stockage dans des champs de sondes :**

Le stockage diffusif est réalisé par l'installation d'un champ de sondes qui permet de stocker (ou de déstocker) l'énergie dans le sous-sol. Cette solution, moins performant en terme de « densité » de stockage que le stockage à eau du à la chaleur spécifique plus faible du sol que celle de l'eau, permet par contre une réduction des coûts par rapport au stockage dans des cuves. Il permet également le stockage simultané de chaud et de froid ce qui n'est pas possible en une seule cuve de stockage à eau. Les Figure 11 et Figure 12 montrent deux projets basés sur les champs de sondes en Allemagne et en Suisse. A part les champs de sondes, des cuves à eau pour un stockage à plus courte durée est intégré dans le système.



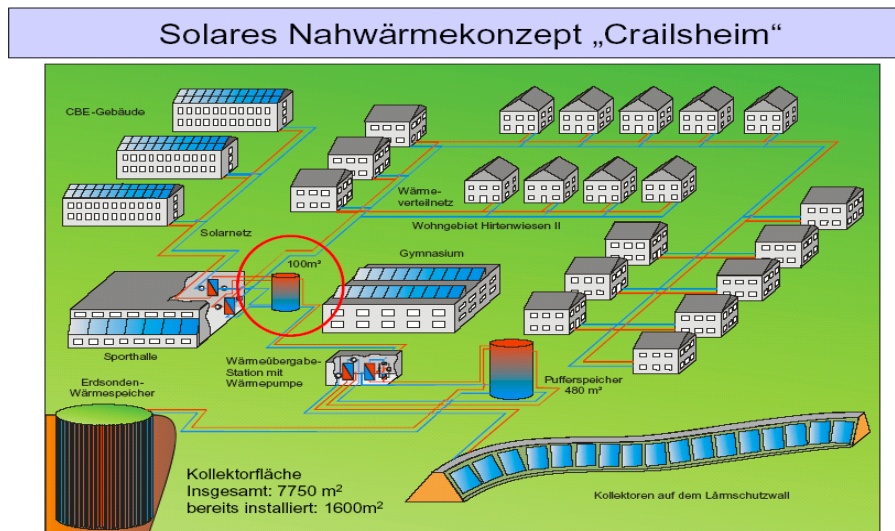


Figure 11 : Le projet de CSHPSS de Crailsheim en Allemagne

### Stockage dans des nappes aquifères :

Le stockage dans des nappes aquifères permet de stocker de l'énergie directement (sans intégration de sondes géothermiques) dans des nappes existantes. Cette technologie est assez courant aux Pays Bas et en Belgique pour le stockage de froid (Figure 13) et est maintenant aussi utilisé dans d'autres projets pour le stockage de chaleur. L'exemple le plus connu est celui du Reichstag à Berlin qui stocke de la chaleur et du froid dans deux nappes aquifères, situées à différentes profondeurs.

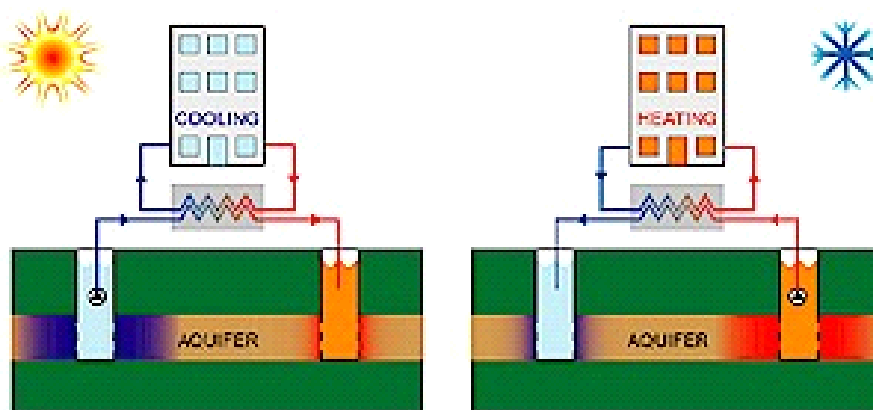
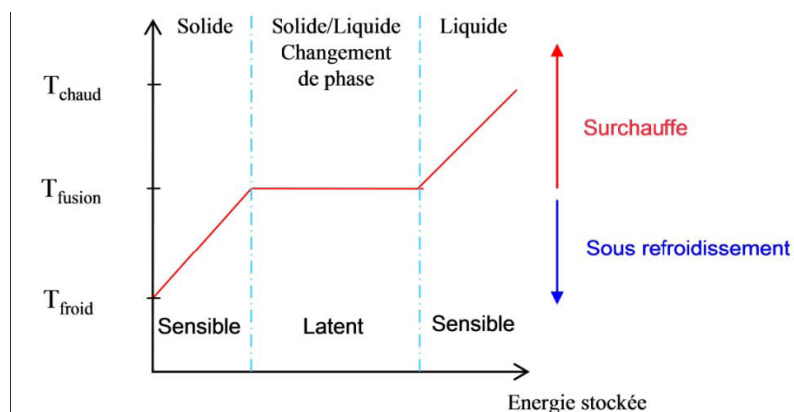


Figure 13 : Stockage de froid dans un aquifère

## 5/ Le stockage par chaleur latente

L'énergie thermique peut être stockée de façon isotherme grâce à un changement de phase des matériaux, solide/liquide ou liquide/vapeur. Durant l'étape de charge, l'énergie thermique fournie au média permet son échauffement, puis son changement de phase et éventuellement sa surchauffe. Celui-ci est ensuite stocké à la température de charge. Lors de la restitution de l'énergie celui-ci change de nouveau de phase pour restituer l'énergie stockée et reprendre son état initial. La Figure I-5 représente les différentes étapes d'un tel système de stockage.



La quantité d'énergie stockée dans le matériau à changement de phase est la somme des énergies sensibles et de l'énergie latente suivant la relation ( I-2 ). La majeure partie de l'énergie stockée est comprise dans l'enthalpie de changement de phase du matériau.

$$E = \int_{T_{froid}}^{T_{fusion}} m \cdot C_{p,s} \cdot dT + m \cdot \Delta L + \int_{T_{fusion}}^{T_{chaud}} m \cdot C_{p,l} \cdot dT$$

Où,  $E$  est la quantité d'énergie stockée (J),  $m$  est la masse du matériau de stockage (kg),  $C_{p,s}$  et  $C_{p,l}$  sont respectivement les chaleurs spécifiques des matériaux solide et liquide ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ),  $\Delta L$  est l'enthalpie de changement de phase ( $J \cdot kg^{-1}$ ) et  $dT$  est la variation de la température durant l'étape de charge (K).

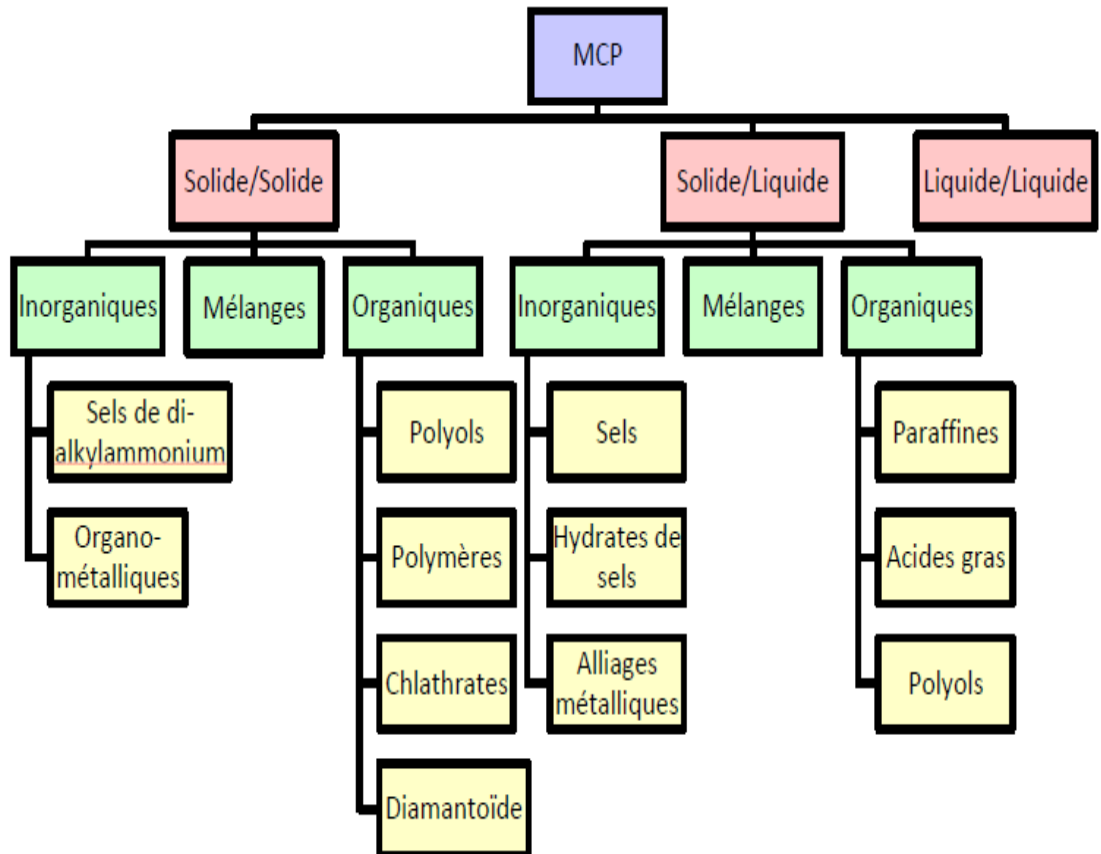
Les procédés de stockage d'énergie thermique par chaleur latente sont généralement des systèmes de stockage passifs. Le fluide caloporteur passe dans le stockage uniquement pendant les phases de charge et de décharge. Le matériau de stockage ne circule pas, il est séparé du fluide caloporteur. Pour assurer le transfert de chaleur entre les deux, des échangeurs de chaleur sont utilisés. La majorité des procédés utilisent des transitions solide-liquide. L'utilisation de stockage par chaleur latente permet de réduire les volumes de stockage par rapport au stockage par chaleur sensible et d'avoir des températures de travail isothermes, en charge et en décharge.

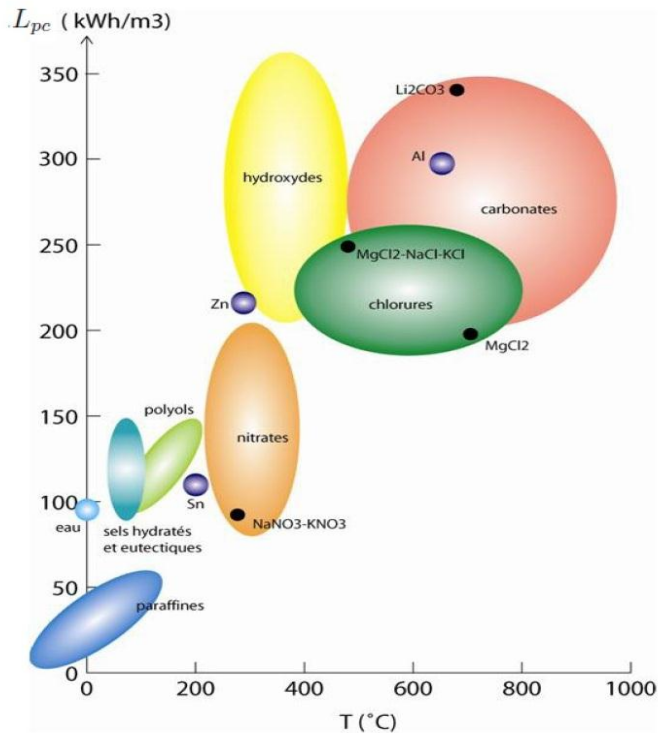
### **Matériaux à changement de phase (MCP)**

Les différents critères de sélection d'un matériau à changement de phase sont à la fois thermo physiques, chimiques et cinétiques, mais aussi économiques et écologiques.

- Une importante chaleur latente de fusion qui permet de réduire le volume du stockage.
- Une température de fusion située dans la plage requise par l'application.
- Un changement de phase réversible qui empêche la succession des cycles charge-décharge d'altérer les qualités de stockage.
- L'absence du phénomène de surfusion. En effet la surfusion empêche le restitution de la chaleur à température constante et d'autre part, le système est plus difficile à contrôler. Cependant, la surfusion peut être exploitée dans les stockages à long terme le matériau liquide est conservé à une température inférieure à la température de fusion et les dissipations thermiques sont ainsi réduites.
- Une conductivité thermique élevée qui améliore la cinétique du système.
- Un prix d'achat le plus bas possible.

D'où la classification des MCP:





Une première distinction se fait selon la transition de phase ciblée : ou bien le MCP passe d'un état solide à un état liquide et vice-versa (MCP solide/liquide), ou alors le MCP passe d'une phase solide déterminée à une seconde phase solide (MCP solide/solide). Il existe également des MCP qui passent d'une phase liquide à une seconde phase liquide (MCP liquide/liquide ou cristaux liquides). Ces derniers ne seront pas abordés dans la suite car les enthalpies de changement de phase sont faibles et parce que le niveau de maturité est bas (la première preuve de concept en laboratoire vient de paraître [46]). Le changement de phase liquide/gaz n'est pas abordé dans la suite pour les raisons précédemment avancées, au sujet des volumes mis en jeu par une telle transition. La seconde distinction se fait en fonction de la composition atomique. Sont alors distinguées, entre autres, les organiques et les inorganiques [45].

### **1.1. Les composés organiques**

Ils présentent une conductivité thermique faible qui est toutefois susceptible d'être améliorée par l'introduction au cœur du matériau d'un maillage métallique. La fusion présente les avantages d'être congruente et réversible et sa température peut être ajustée dans une large gamme en modifiant la longueur des chaînes. Par contre, elle s'accompagne d'une grande variation de volume de l'ordre de 20%.

Quant au refroidissement, il s'effectue pratiquement sans surfusion. Dans l'application du stockage de l'énergie solaire, le caractère semi-transparent des paraffines permet de s'affranchir du fluide caloporteur de charge puisque l'énergie solaire peut pénétrer au cœur du matériau et le transformer en profondeur.

### **1.2. Les sels hydratés**

Leur refroidissement passe par une surfusion qui peut être contrée par l'adjonction d'un agent nucléant. D'autre part une séparation des phases due à une différence de densité peut conduire à des cycles irréversibles. Certains de ces sels sont corrosifs et doivent être conservés dans des récipients en PVC. La principale qualité des sels hydratés réside dans leur prix très bas.

### **1.3. Les matériaux à transformation solide-solide**

Ces matériaux sont intéressants à plus d'un titre la transformation cristalline se situe bien en-dessous de la température de fusion avec une libération ou absorption de chaleur et la température de transformation peut être ajustée dans une large gamme température (10 à 160<sup>0</sup> C) en faisant varier les proportions des différents composants. Ceci permet de choisir un matériau dont la température de transformation optimise l'application et puisque le matériau reste solide, son domaine d'application est très large, par exemple, le M.C.P (matériau à changement de phase) peut être absorbé dans les matériaux poreux : le composite résultant ayant une grande capacité de stockage.

## **2. Les différents types d'échangeurs**

On distingue deux types d'échangeurs : les échangeurs avec surface d'échange et ceux à contact direct. Dans le premier type, les F.C.P (fluides caloporteurs) de charge et de décharge sont isolés du M.C.P par une paroi et le transfert de chaleur se fait par conduction à travers cette dernière. Dans le second type, le M.C.P fondu est directement injecté dans le F.C.P de décharge et les gouttelettes du matériau de stockage se cristallisent durant l'écoulement. La compatibilité entre le F.C.P et le M.C.P représente la contrainte fondamentale des échangeurs à contact direct. Ce type d'échangeur est d'une réalisation technologique complexe et coûteuse.

### **3. Optimisation des échangeurs**

Les performances de la chaîne thermodynamique sont directement liées au comportement de l'accu-

Ces facteurs limitatifs font penser qu'il doit exister une adaptation optimale de la géométrie des éléments de stockage conduisant à une thermocinétique imposées par les conditions de fonctionnement.

### **4. Les recherches en cours**

Dans le domaine du stockage par chaleur latente, les instituts de recherche, dont la F.UL concentrent leur activité essentiellement dans l'intégration des modules de stockage à une application thermique. Cette intégration peut être réalisée par l'optimisation d'un échangeur utilisé par exemple, comme tampon au condenseur d'une pompe à chaleur par un choix idéal du volume du matériau d'encapsulation dans le but de réaliser des éléments modulaires pour le chauffage de l'habitat ou encore par incorporation du M.C.P à un matériau de construction. Cette dernière application qui permettrait de réaliser des panneaux de garnissage à l'intérieur d'une maison posséderait l'avantage d'être d'une mise en œuvre facile, tout en favorisant une surface d'échange pour le flux d'utilisation les matériaux à changement de phase solide-solide sont à cet égard particulièrement intéressants.

Mulateur dont la réalisation est sujette à de nombreuses limitations d'ordre économique.

Différents facteurs limitent la cinétique des processus de charge et de décharge.

- La pénétration de la chaleur dans le matériau est freinée par les processus de conduction et de convection s'y déroulant. De ce fait, la durée limitée de la charge empêche d'utiliser au maximum les capacités de stockage.
- Les transferts de chaleur F.C.P – M.C.P n'étant pas parfaits la température superficielle du matériau restera toujours inférieure à celle du F.C.P.
- Lors de la décharge, le matériau liquide se solidifie sur la surface de l'échangeur et la croûte ainsi formée constitue une résistance thermique qui ralentit l'échange de chaleur dès lors..à débit de F.C.P constant la température de ce dernier diminue au cours de la décharge et on ne dispose plus d'une source de chaleur à température constante.

## 6/ Le stockage thermochimique

Le stockage thermochimique repose sur deux types de réactions : les réactions chimiques endothermiques réversibles et les réactions de sorption. Réactions chimiques endothermiques réversibles. De par sa nature endothermique la réaction va permettre de stocker de la chaleur, et étant donné que cette réaction est réversible, cette chaleur sera restituée lorsque la réaction inverse (exothermique) sera réalisée.

Soient  $A$ ,  $B$  et  $C$  trois composés chimiques distincts et  $Q$  une quantité d'énergie thermique, la réaction s'écrit :  $A+Q\rightleftharpoons B+C$

Les produits de la réaction peuvent être conservés à température ambiante et, s'ils sont isolés, ils ne subiront pas ou peu de détérioration chimique. Dans le cas du stockage « sensible » et « latent », les pertes thermiques ramènent invariablement le système dans son état initial, déchargé. Le stockage sous forme thermochimique est peu contraint par la durée de stockage, c'est pourquoi il est essentiellement destinée à du stockage longue durée (intersaisonnier).

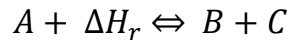
### 2.7.2. Principe de fonctionnement

La voie thermochimique exploite la réversibilité des réactions chimiques pour stocker l'énergie. De façon générale, les réactions sont de la forme :

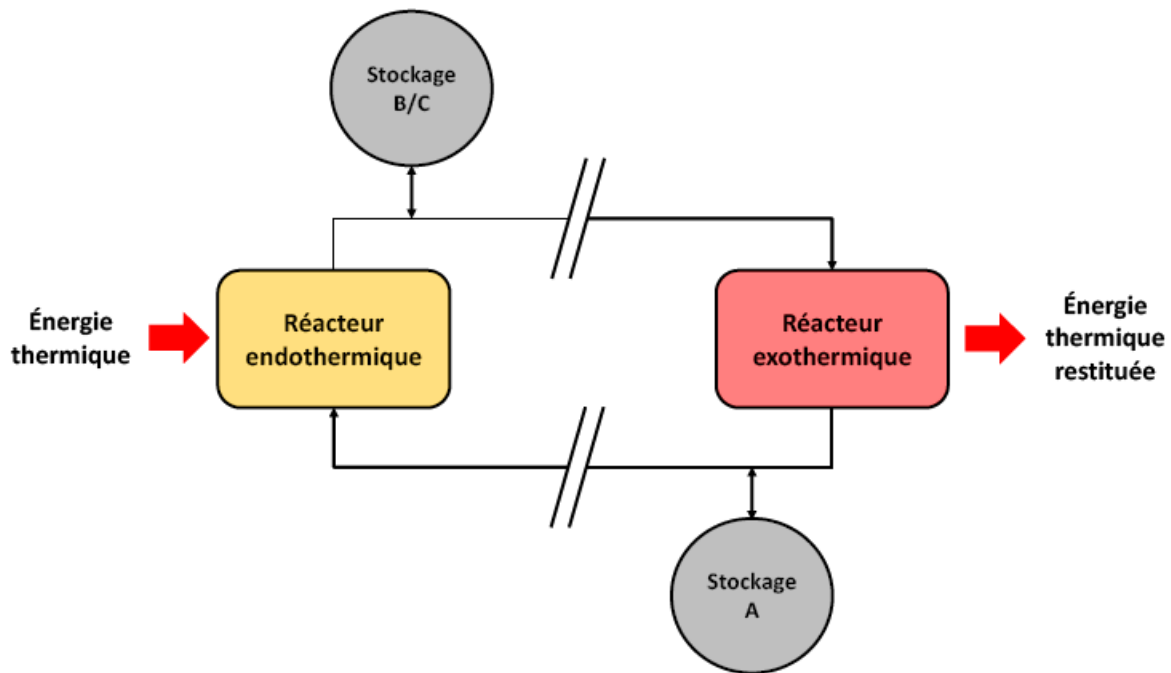


Les réactions les plus couramment rencontrées sont de la forme suivante :





Pour ce type de stockage, la réaction mise en jeu doit être totalement réversible afin que le procédé ne perde pas sa capacité de stockage au cours des cycles. Le schéma de principe du stockage de chaleur par voie thermochimique est présenté sur la Figure I-7.



Lors de l'étape de charge, l'énergie thermique issue du champ solaire permet de mettre en oeuvre la réaction endothermique. Les produits de cette réaction (B et C) sont séparés et stockés. Lorsque l'énergie thermique doit être restituée, les produits stockés (B et C) sont mis en contact afin de réaliser la réaction exothermique réversible et ainsi restituer la chaleur et régénérer le produit initial (A).

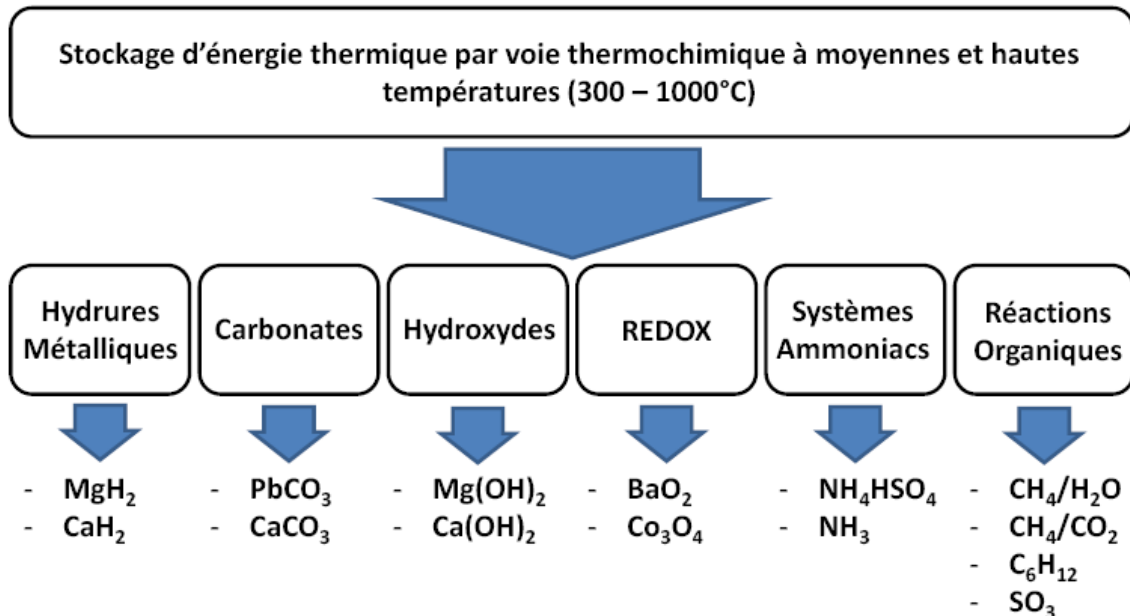
La quantité d'énergie qui peut être stockée dans une réaction chimique de type  $A + \Delta H_r \Leftrightarrow B + C$  est la somme des énergies sensibles des matériaux et de la chaleur de réaction. La quantité d'énergie stockée est exprimée selon la relation ( I-5 )

$$E = \sum_{i=1}^N \int_{T_i}^{T_f} m_i \cdot C_{pi} \cdot dT + n_A \cdot \Delta H_r$$

Où,  $E$  est la quantité d'énergie stockée (J),  $n_A$  est le nombre de moles du produit A (mol),  $\Delta H_r$  est l'enthalpie de la réaction ( $J \cdot mol^{-1}_A$ )

### Choix de la réaction

Les réactions sont classées dans six catégories : les hydrures métalliques, les carbonates, les hydroxydes, les réactions d'oxydo-réduction, les systèmes ammoniacs et les réactions organiques. Dans chacune de ces catégories, les différentes réactions mises en jeu sont présentées, comme résumé dans la Figure I-10 :



### Critères de sélection des réactions

Les critères de sont divisés en 6 catégories :

#### 1. Les exigences d'exploitation du procédé

- le système réactionnel doit présenter une solution économique saine en ce qui concerne la disponibilité du matériau et son exploitation ;
- les produits du système réactionnel utilisés doivent être exploitables avec des technologies connues ou peu complexes ;
- la réaction doit être stable durant le transport et le stockage ;
- les produits doivent se séparer facilement ;
- le système doit avoir une enthalpie de réaction importante et un petit volume molaire afin de maximiser la densité énergétique ;
- les conditions opératoires de pressions ne doivent pas être excessives ;
- si un catalyseur est utilisé, celui-ci doit avoir une efficacité importante et ne doit pas limiter les transferts thermiques et matières.

#### 2. Les exigences de la cinétique de la réaction

- la réaction doit être rapide afin de minimiser le temps de séjour dans le réacteur et donc son volume et son prix ;
- la cinétique des réactions endothermique et exothermique doivent être du même ordre afin que les puissances à fournir ou à récupérer le soient aussi.

### 3. Les exigences de cyclabilité

- les produits utilisés ne doivent pas se dégrader avec le temps ;
- pas de réaction secondaire.

### 4. Les exigences de vieillissement

- les réactions catalytiques devraient être évitées, si possible, car elles introduisent des facteurs indésirables tel que la dégradation du catalyseur par l'encrassement et la pollution chimique des sites actifs et donc son éventuel vieillissement prématuré ;
- les réactifs ne doivent pas être corrosifs ou susceptibles de réagir avec le matériau de construction.

### 5. Les exigences de stockage

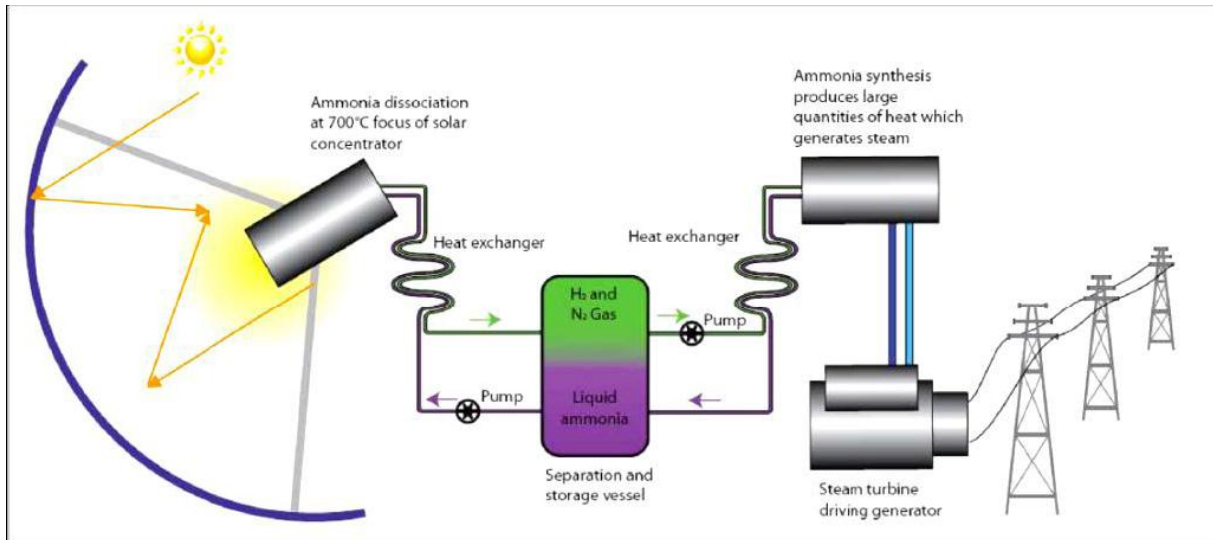
- les cycles étant intermittents, les produits gazeux doivent être facilement condensables pour garder un volume de stockage faible et pour faciliter leur manutention (si stockage inter-saisonnier).

### 6. Les exigences de sécurité

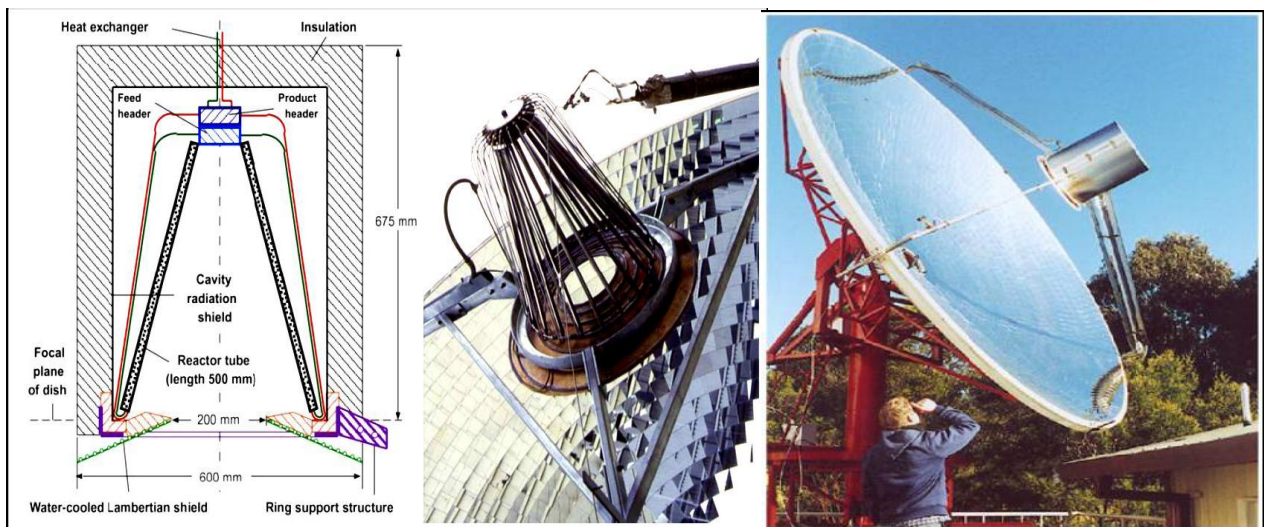
- les produits ne doivent pas être toxiques ;
- les produits ne doivent pas s'enflammer ;
- pas de risques d'explosion.

## EXEMPLE

Le premier concept de stockage d'énergie thermique utilisant la réaction réversible  $\text{NH}_3 \rightleftharpoons \text{N}_2 + \text{H}_2$  a été proposé par Carden, 1977 de l'Australian National University (ANU). La Figure I-23 présente le schéma de fonctionnement du procédé de stockage.

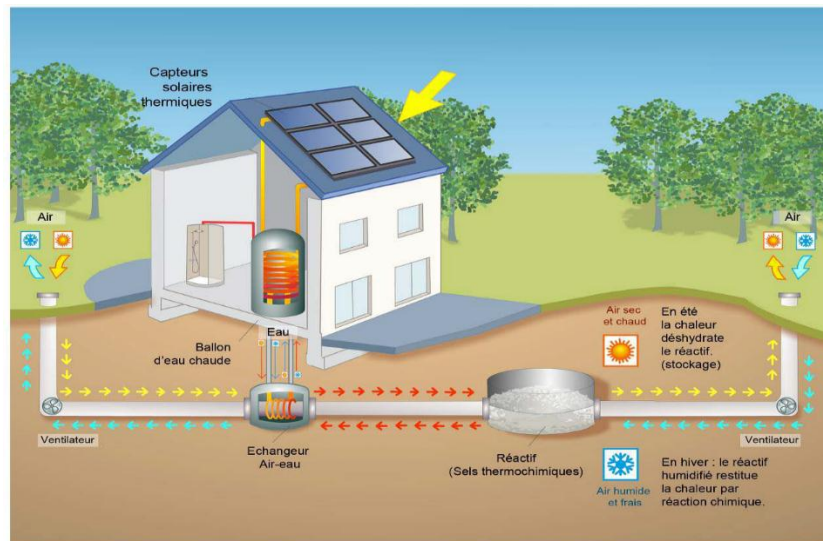


**Figure I-23 : Schéma de principe du procédé de stockage d'énergie thermique développé par l'ANU (Dunn et al., 2011).**



**Figure I-24 : Réacteur solaire de dissociation de l'ammoniac: a) schéma du réacteur solaire de dissociation de l'ammoniac (15 kW) ; b) photographies du réacteur installé sur la parabole de 20 m<sup>2</sup> (Lovegrove et al., 2004).**

## Stockage thermochimique couplé à un système solaire thermique

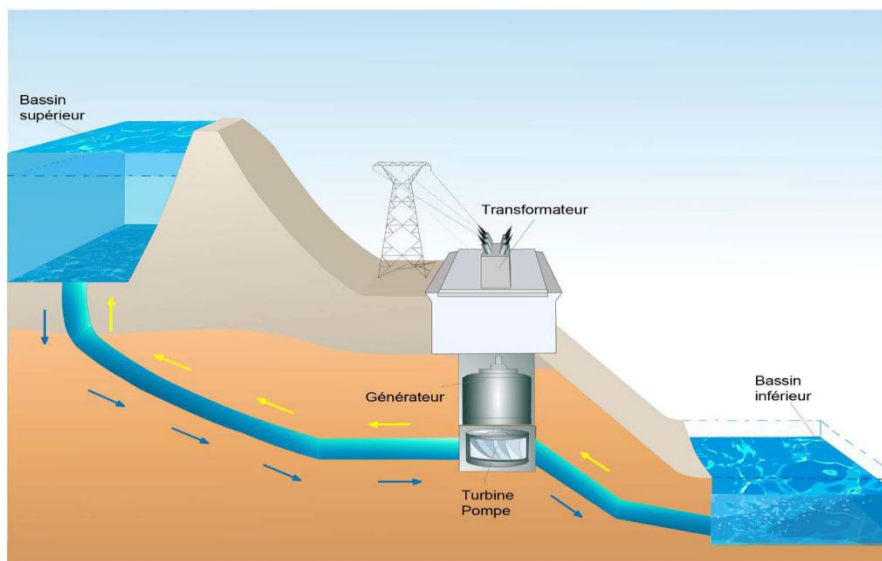


Le principe repose sur l'utilisation d'un réactif (bromure de strontium pour des installations dans l'habitat), stocké dans une cuve. En période estivale, l'eau chaude apportée par le système solaire combiné va céder sa chaleur à l'air apporté de l'extérieur via l'échangeur eau-air. Cet air chaud va ensuite permettre d'assécher le réactif. Le réactif peut être conservé sec pendant plusieurs mois. En période hivernale, le circuit est inversé, l'air extérieur frais et humide circule à travers le réactif qui, en se réhumidifiant, va dégager de la chaleur grâce à une réaction chimique exothermique. L'air ainsi chauffé (autour de 70°C) passe dans l'échangeur et cède sa chaleur à l'eau qui va circuler jusqu'au ballon et permettre une utilisation sanitaire.

## Autre types de stockage

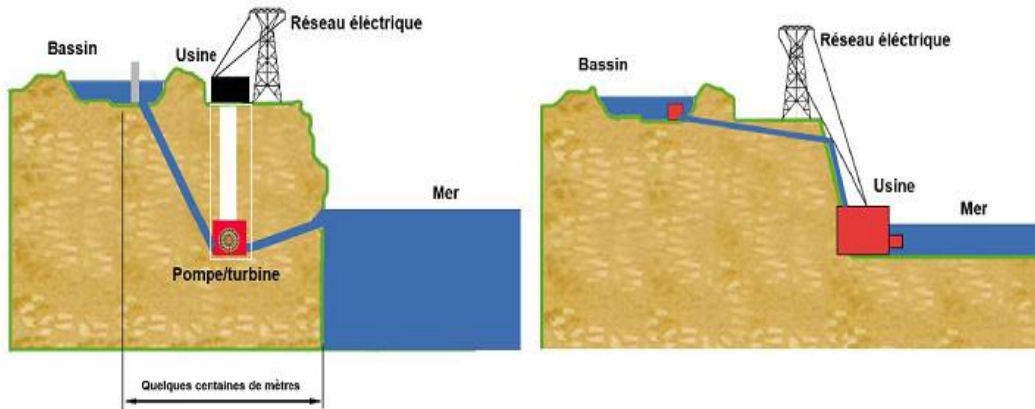
Les chapitres suivants proposent une présentation détaillée de chacune des technologies de stockage stationnaire disponibles ou en cours de développement. Le principe de fonctionnement, illustré, est rappelé ainsi que les données techniques, les avantages et inconvénients de chacune d'entre elles.

### STEP - Station de transfert par pompage



Le principe consiste en deux réservoirs d'eau situés à des altitudes différentes. Lors des périodes de faible consommation (durant laquelle la demande - et donc le coût - de l'énergie sont moins élevés) l'eau est pompée vers le réservoir le plus haut. Lors des périodes de forte demande, l'eau circule dans l'autre sens et rejoint, par gravitation, le réservoir le plus bas. Elle fait tourner lors de son passage une turbine qui alimente un alternateur et produit de l'électricité. C'est la solution de stockage à grande échelle la plus répandue et dont le coût d'investissement est parmi les plus bas. La contrainte réside dans la nécessité de trouver des sites appropriés qui se font de plus en plus rares. De nouveaux types de STEP sont envisagés notamment en bord de mer (STEP marine), la mer représentant le réservoir inférieur et un réservoir supérieur étant installé sur la côte.

### Schéma de principe d'une STEP marine



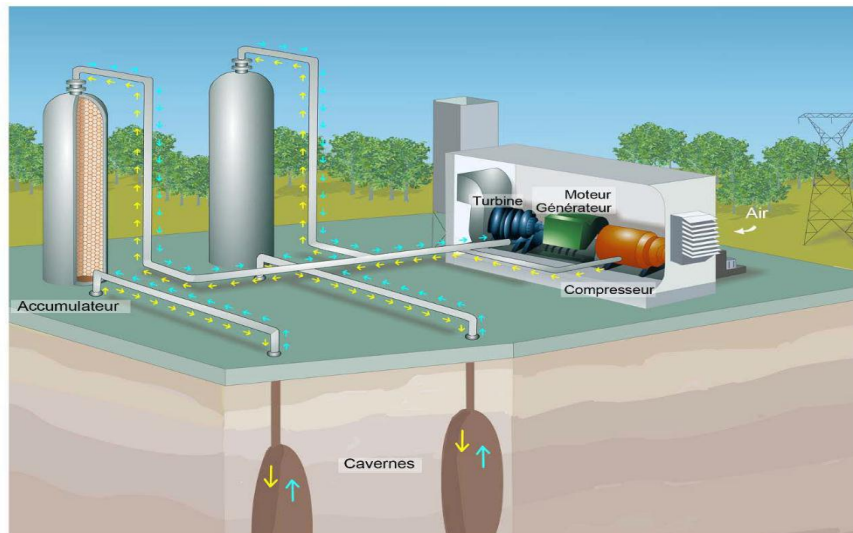
Puissance cible	Rendement	Durée de vie (ans)	Coût d'investissement (€/Kw)
Qq kW/ qq Gw	0.65 – 0.80	40 - 60	500 - 1500

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mature</li> <li>- Bon rendement</li> <li>- durée de vie plus 40 ans</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contrainte d'emplacement</li> <li>- impact environnemental</li> </ul>

### CAES - Stockage par air comprimé

Grâce à un compresseur, alimenté pendant les heures creuses de demande d'électricité, de l'air comprimé est produit puis stocké dans une cavité sous-terrainne. Lors des périodes de pointe, l'air comprimé passe dans une chambre de combustion où il est réchauffé grâce à l'apport de gaz naturel avant d'être détendu dans une turbine. Sans cette étape de réchauffement, la température atteinte lors de la détente de l'air serait beaucoup trop basse et la turbine serait vite endommagée. Celle-ci est reliée à un alternateur qui produit de l'électricité. Si le rendement n'est pas très bon, il reste

meilleur qu'une turbine à gaz classique. Une des améliorations en cours d'étude, le CAES adiabatique, vise à stocker la chaleur produite lors de la compression de l'air pour la restituer lors de la détente du gaz, ce qui permet l'utilisation de turbines à air pour régénérer de l'électricité sans aucune émission directe.



Puissance cible	Rendement	Durée de vie (ans )	Coût d'investissement (€/Kw)
100 - 500 Mw	0.50	30 - 40	450 -650

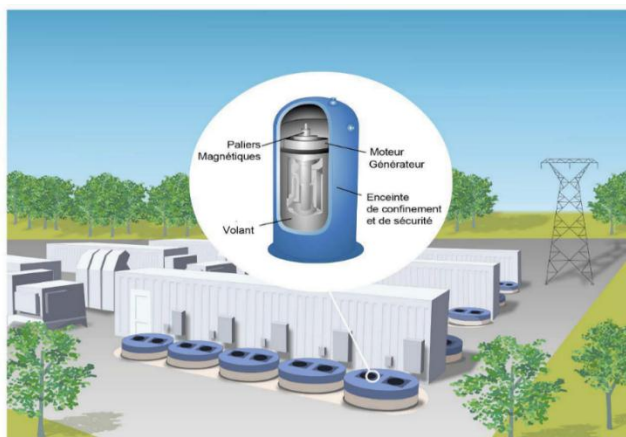
Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas d'émission de Co2</li> <li>- Grande puissance et très grande capacité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- coût d'investissement élevé.</li> <li>- Site de stockage géologique adapté</li> </ul>

### Volant d'énergie

Ce système de stockage repose sur le principe physique qui consiste à emmagasiner de l'énergie cinétique en faisant tourner à très grande vitesse une masse autour d'un axe. Le volant d'inertie est accéléré ou freiné par un moteur-générateur électrique qui



permet ainsi d'effectuer les charges et décharges du système. Pour éviter les frottements, les parties tournantes sont guidées par des paliers souvent magnétiques. L'ensemble du système est logé dans une enceinte de confinement sous basse pression, afin de limiter les pertes aérodynamiques sources d'auto-décharge. Les volants d'inertie sont principalement utilisés dans le stockage stationnaire pour répondre à des demandes de puissance importantes sur de courtes durées. Ce type de stockage est aussi testé dans le domaine du transport sur rails.



Puissance cible	Rendement	Durée de vie (ans )	Coût d'investissement (€/Kw)
Qq kW/ qq 10 Mw	0.85 – 0.95	20	150-3 000

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Temps de réponse très court</li> <li>- très bon rendement</li> <li>- longue durée de vie</li> <li>- Peu de maintenance</li> <li>- Nombreux constructeurs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Forte autodécharge</li> <li>- Problemes de securité</li> <li>- coût</li> <li>.</li> </ul>

## Stockage d'hydrogène

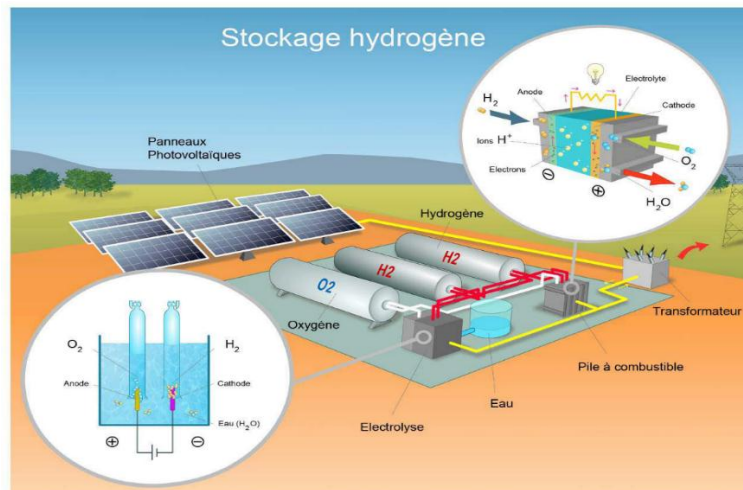
Les trois étapes du processus de stockage par le vecteur hydrogène sont : l'électrolyse de l'eau, le stockage de l'hydrogène produit et la pile à combustible.

- Tout d'abord la production d'hydrogène lors des périodes creuses grâce à la décomposition de l'eau par électrolyse.

L'apport d'électricité permet à l'électrolyseur de décomposer l'eau H<sub>2</sub>O en oxygène et hydrogène. (H<sub>2</sub>O → H<sub>2</sub> + ½ O<sub>2</sub>).

- Ensuite l'hydrogène est stocké dans un réservoir sous forme gazeuse, liquide ou solide.

- Il est enfin re transformé dans une pile à combustible. Selon la réaction inverse de l'électrolyse, l'hydrogène s'associe avec l'oxygène (les ions traversent une membrane tandis que les électrons circulent dans un circuit créant un courant électrique), la réaction ne rejette que de l'eau et de la chaleur.

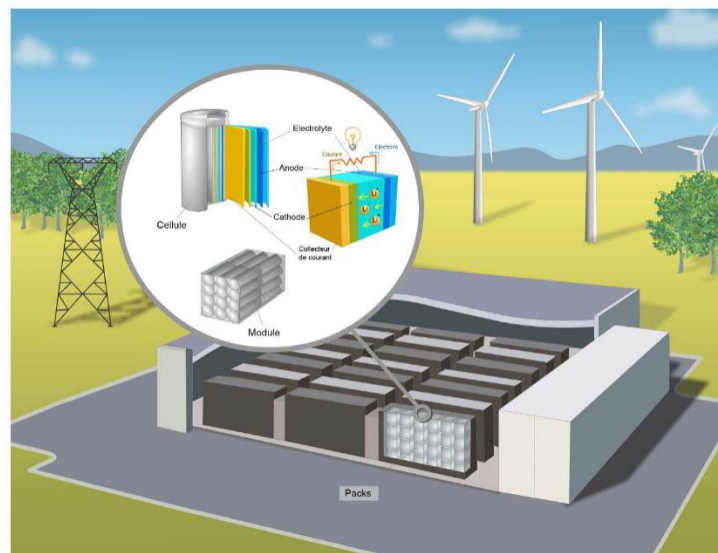


Puissance cible	Rendement	Durée de vie (ans )	Coût d'investissement (€/Kw)
1Kw – 10 Kw	0.25 – 0.35	5 - 10	6 000

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Produit par électrolyse à partir d'une grande variété d'énergie éolien, photovoltaïque, nucléaire, d'hydrocarbures, charbon, biomasse, ou biogaz par reformage gazéification.</li> <li>- Produit de l'eau pendant la combustion.</li> <li>- très forte densité énergétique rapporté à la masse. (120 MJ / kg comparé à 55 MJ / kg au gaz naturel)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- production de CO<sub>2</sub> lors de la transformation.</li> <li>- rendement faible.</li> <li>- coût d'investissement élevé.</li> </ul>

## Batterie Lithium-ion

La batterie est un assemblage d'accumulateurs qui stocke l'énergie électrique issue de la circulation des ions entre deux électrodes à travers un électrolyte, et des électrons qui se déplacent à travers un circuit extérieur. Il existe différentes batteries selon les matériaux utilisés pour la conception de l'anode, de la cathode et de l'électrolyte. Dans le cas des batteries Lithium-ion, l'état de charge consiste en une réaction d'oxydation dans l'électrode positive (cathode) qui va libérer des ions  $\text{Li}^+$  dans l'électrolyte. Une réaction de réduction va ensuite avoir lieu au niveau de l'électrode négative (anode), recombinant les ions  $\text{Li}^+$  avec les électrons qui ont traversé le circuit extérieur. En mode décharge, c'est la réaction inverse qui a lieu. Cette réaction est réversible et donc reproductible sur un nombre limité de cycles.

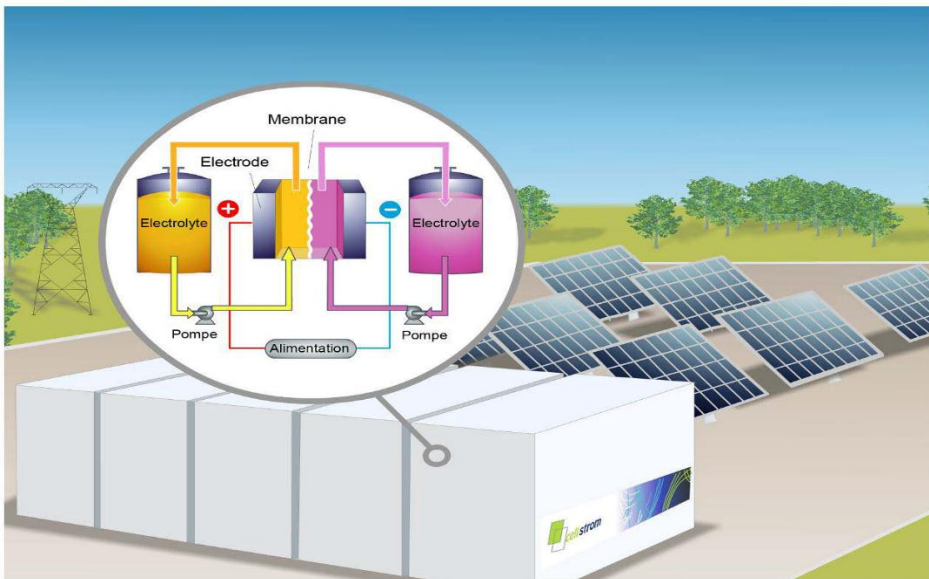


Puissance cible	Rendement	Durée de vie (ans)	Coût d'investissement (€/Kw)
Qq kW/ qq 100 kw	0.7 – 0.75	10 - 15	600 - 1500

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Haute densité énergétique</li> <li>- bon rendement</li> <li>- longue durée de vie ( selon la nature chimique )</li> <li>- Faible impact environnemental</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sécurité</li> <li>- Besoin d'une régulation thermique</li> <li>- coût</li> </ul>

## Batterie à circulation ou "Redox-Flow"

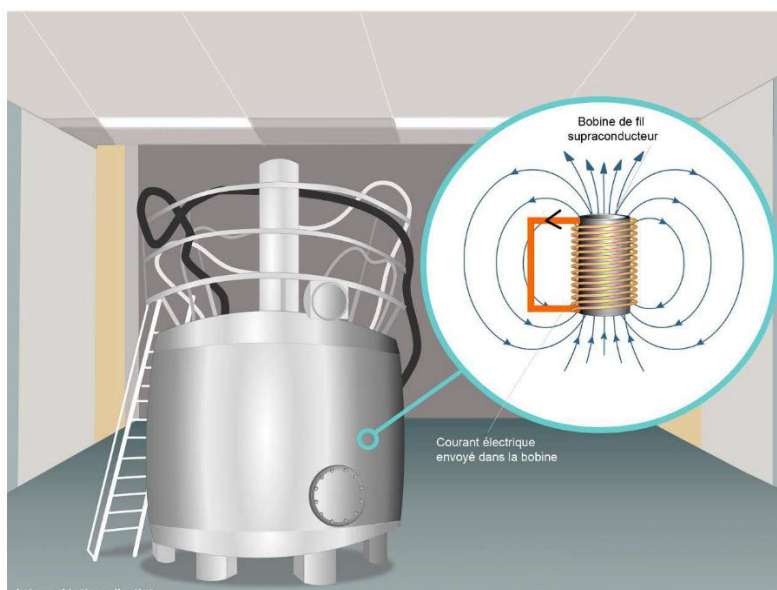
Le principe repose sur une réaction d'oxydation et une réaction de réduction au niveau de chacune des électrodes. La spécificité de la batterie redox-flow vient du fait que les réactifs sont en solution dans un électrolyte différent pour l'anode et la cathode, ils sont donc stockés dans deux réservoirs séparés et circulent dans deux demi-cellules. Ces dernières sont séparées par une membrane semi-perméable qui autorise le passage des ions communs au deux électrolytes. Des pompes assurent la circulation des électrolytes afin de renouveler chaque réactif à la surface de l'électrode correspondante. Le principal avantage de cette technologie repose sur le fait que la séparation électrolyte/cellule électrochimique permet un découplage entre la puissance disponible (dimensionnement de la cellule électrochimique) et la capacité énergétique du système (taille du réservoir d'électrolyte).



Puissance cible	Rendement	Durée de vie (ans)	Coût d'investissement (€/Kw)
Qq kW	0.65 – 0.75	15 - 20	1 000 - 3000

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Haute Modularité</li> <li>- Large plage des ratios puissance / energie</li> <li>- longue durée de vie</li> <li>- Faible autodécharge</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Architecture compliquée</li> <li>- Faible densité énergétique</li> <li>- Besoin d'une régulation thermique</li> <li>- coût</li> </ul>

### Stockage à inductance supraconductrice – SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage)



L'énergie est stockée par l'intermédiaire d'un courant électrique envoyé dans une bobine constituée d'un fil supraconducteur. Une fois la bobine court-circuitée (fermée), le courant circule sans perte d'énergie car il n'y a pas de frottement (les électrons circulent en continu). Il y a alors production d'un champ magnétique dans les bobines. L'énergie est donc stockée dans la bobine sous une forme magnétique et électrique, et peut être récupérée dans un très court laps de temps. Les rendements peuvent être très élevés et les principales pertes sont localisées dans les connexions et dans le

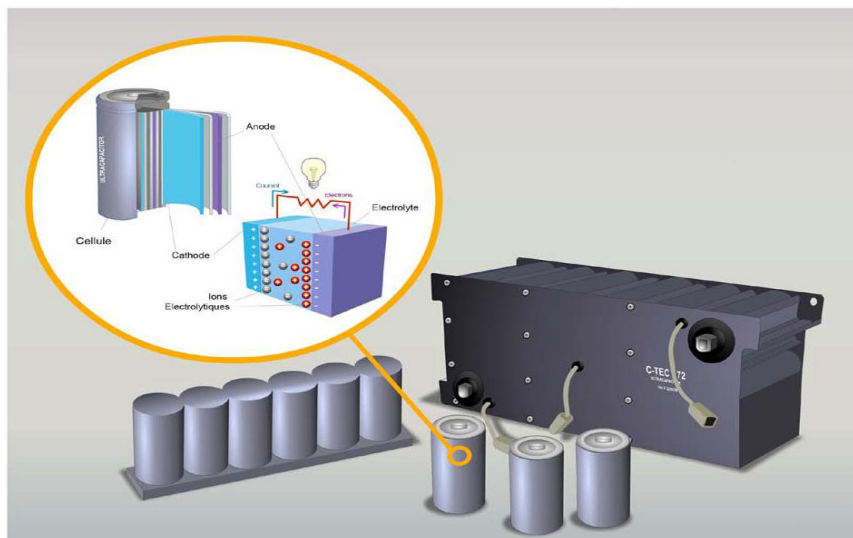
convertisseur électronique de puissance. Le rendement instantané en puissance peut dépasser les 95%.

Puissance cible	Rendement	Durée de vie (ans)	Coût d'investissement (€/kW)	Coût d'investissement (€/kWh)
Qq kW / qq 100 MW	0,75 – 0,80	20-30	100-500	

*Données Ademe*

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Excellent temps de réponse</li> <li>- Haut rendement</li> <li>- Adapté pour fournir de l'énergie rapidement</li> <li>- Durée de vie</li> <li>- Charge et décharge rapide</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faible densité énergétique</li> <li>- Processus cryogénique nécessaire (pénalise par conséquent le bilan énergétique)</li> <li>- Autodécharge</li> <li>- Ondes électromagnétiques</li> </ul>

## Supercondensateurs



Le supercondensateur est un moyen de stocker l'énergie sous forme électrostatique. Il est constitué de 2 électrodes poreuses, généralement en carbone activé, plongées dans un électrolyte liquide et séparées par un séparateur laissant circuler les ions mais pas les électrons.

L'interaction des électrodes et de l'électrolyte entraîne l'apparition spontanée d'une accumulation de charges aux interfaces, on parle de formation d'une double couche électrochimique : une couche de charges positives et une couche de charge négatives, l'ensemble étant électriquement neutre.

Les plus gros supercondensateurs ont été développés majoritairement pour une utilisation dans le domaine des transports.

Puissance cible	Rendement	Durée de vie (cycles)	Coût d'investissement (€/kW)	Coût d'investissement (€/kWh)
10 kW – 5 MW	0,90 – 0,95	500 000	100-500	10000-20000

*Données ENEA*

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Temps de réponses courts</li> <li>- Grande durée de vie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coût</li> <li>- Capacité limitée</li> </ul>

## Conclusion

Face au développement rapide des énergies renouvelables intermittentes et non pilotables, le stockage pourrait devenir incontournable pour assurer la continuité de l'alimentation et garantir la qualité de la fourniture en électricité des consommateurs.

Batteries électrochimiques, stockage gravitationnel ou stockage d'air comprimé, les technologies se multiplient pour répondre à des besoins très variés et font l'objet de nombreuses initiatives partout dans le monde.

Si le stockage d'énergie constitue un levier technique difficilement contournable pour intégrer les moyens de production intermittents et les nouveaux usages, des incertitudes d'ordre technique, réglementaire et surtout économique demeurent.

Afin de parvenir à des modèles économiques acceptables, il faudra renforcer les efforts des recherches scientifiques dans la plupart des familles technologiques. Selon les choix politiques et réglementaires de développement du stockage de grande capacité et/ou du stockage diffus émergeront des business modèles multiples et complexes, déclinés pour chaque acteur du marché.