

**UNIVERSITÉ ABOU BAKR BELKAÏD, TLEMCEM  
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE  
DÉPARTEMENT DE GENIE INDUSTRIEL**

**Matière : Energies et Environnement**

**Chapitre 4 : Stockage de l'énergie**

**Cours destiné aux :  
Etudiants du L2 Genie Industriel**

**Responsable de la matière :  
Dr H.KADRAOUI**



# Plan de cours

- Introduction
- C'est quoi le stockage de l'énergie ?
- Intérêt du stockage
- Technologies de stockage
- Critères de choix d'une technologie de stockage



# Introduction

- La nature stocke naturellement de l'énergie par exemple avec la **biomasse**, le cycle climatique de la Terre (pluie, neige...), les marées...
- Certains stockages naturels n'ont eu lieu qu'à l'échelle de temps géologique (création du charbon, du pétrole et du gaz, formation des éléments radioactifs dans les noyaux...). En retour, les stocks **d'énergies fossiles s'épuisent**, leur renouvellement étant difficile.
- À l'heure où la lutte contre le réchauffement climatique incite à augmenter le recours aux sources d'énergies renouvelables, le stockage de l'énergie se révèle l'un des enjeux majeurs de la transition énergétique.



# C'est quoi le stockage de l'énergie ?

- Le stockage de l'énergie est l'action qui consiste à « **accumuler** » une quantité d'énergie en un lieu donné pour une utilisation ultérieure.
- Le stockage électrique par exemple consiste à stocker l'énergie électrique sous forme d'énergie électrochimique par le biais d'une circulation d'ions et d'électrons entre deux électrodes : c'est le principe de **la batterie**.
- Stocker de l'électricité permet de stabiliser les réseaux énergétiques, au point de vu production/consommation

# Intérêt du stockage

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

# Intérêt du stockage

- Le stockage d'énergie répond à trois motivations principales :
  - ✓ Sécurisation de l'approvisionnement en énergie d'un pays ou d'un groupe de pays .
  - ✓ Ajustement de la production d'énergie en fonction de la demande .
  - ✓ Compensation de l'irrégularité de la production des énergies dites temporaires.

# Technologies de stockage

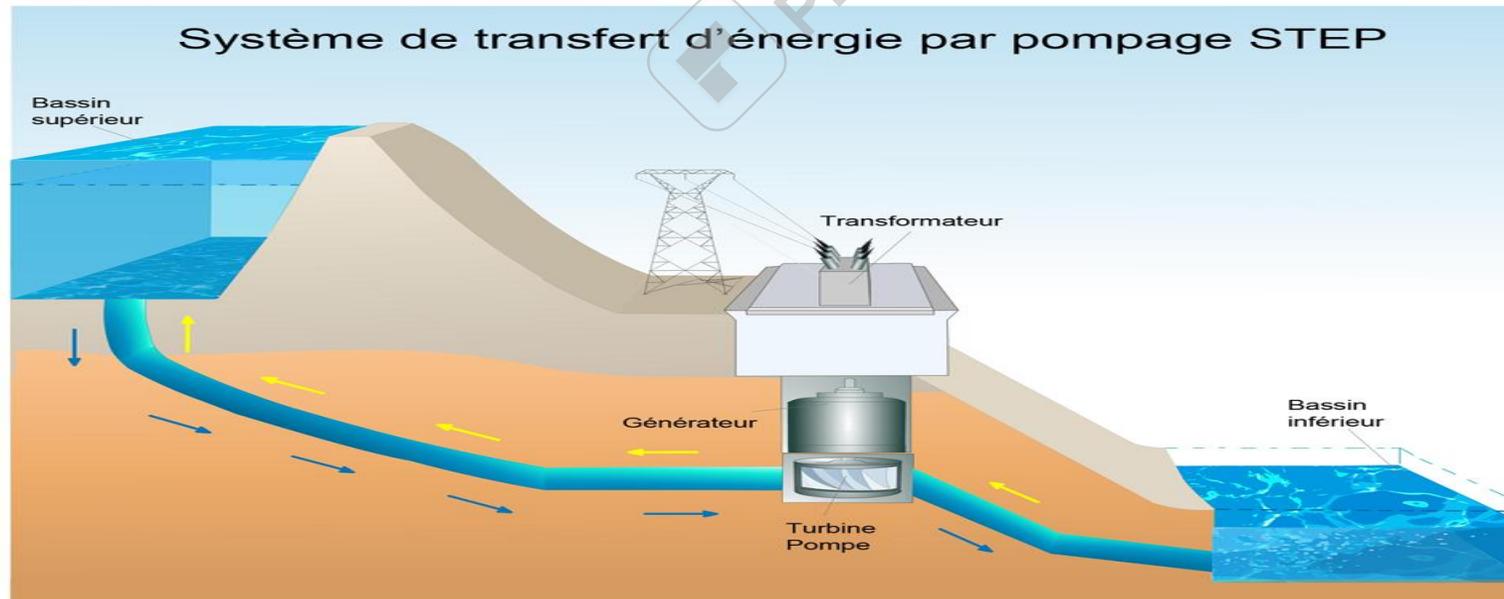
Les solutions de stockage d'énergie se divisent en **quatre catégories** :

- **Mécanique** (barrage hydroélectrique, Station de transfert d'énergie par pompage - **STEP**, stockage d'énergie par air comprimé – **CAES**),
- **Électrochimique et électrostatique** (piles, batteries, vecteur hydrogène).
- **électromagnétique** (bobines supraconductrices, supercapacités).
- **Thermique et thermochimique** (chaleur latente ou sensible).

## Mode de stockage mécanique

### ❖ Station de pompage (STEP)

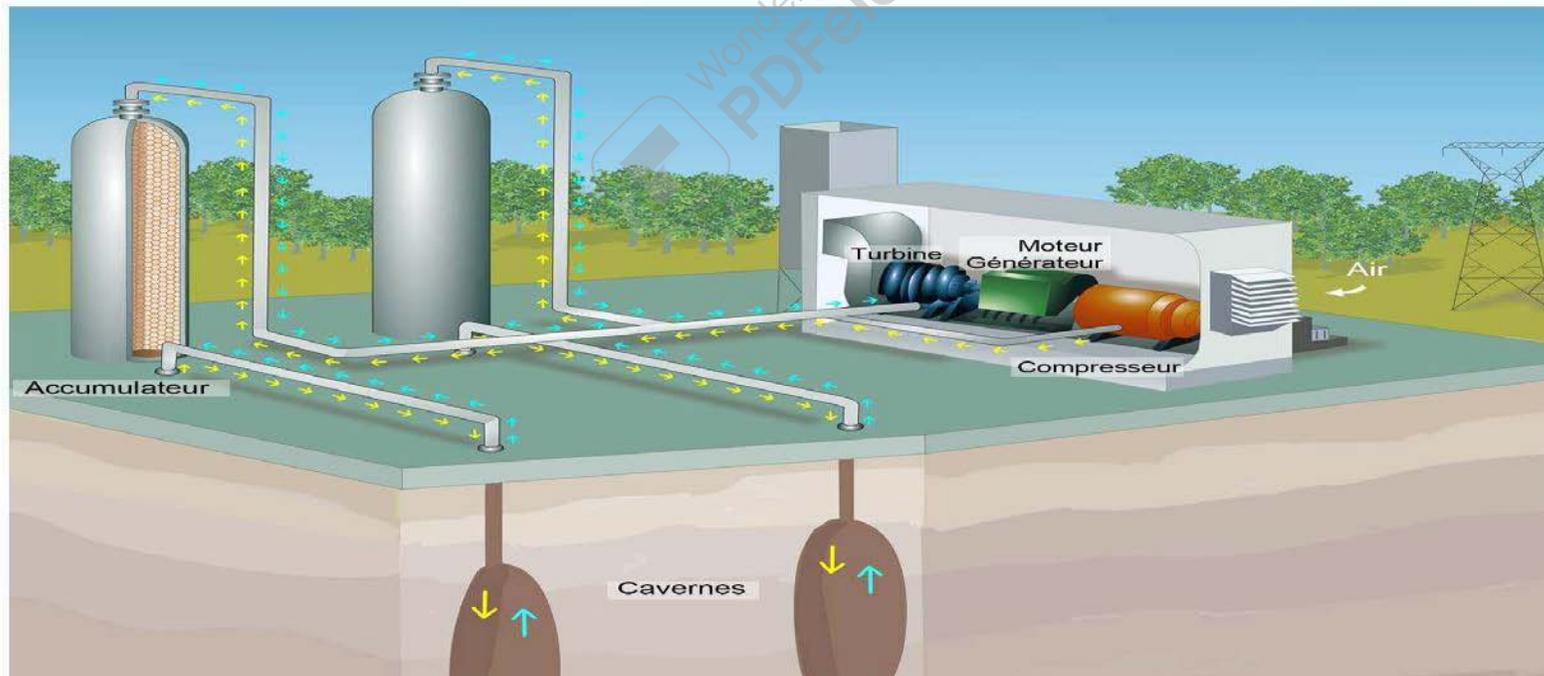
Le principe consiste en deux réservoirs d'eau situés à des altitudes différentes. Lors des périodes de faible consommation l'eau est pompée vers le réservoir le plus haut. Lors des périodes de forte demande, l'eau circule dans l'autre sens et rejoint, par gravitation, le réservoir le plus bas. Elle fait tourner lors de son passage une turbine qui alimente un alternateur et produit de l'électricité.



## Mode de stockage mécanique

### ❖ Stockage d'énergie par air comprimé (CAES) Compressed Air Energy Storage

- Le principe du CAES repose sur l'élasticité de l'air : l'air est d'abord comprimé via un système de compresseurs, à très haute pression (100 à 300 bar) pour être stocké dans un réservoir (cavités souterraines par exemple).



# Technologies de stockage

## Mode de stockage électrochimique et électrostatique

Ce mode de stockage, dont le principe repose sur la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique, concerne principalement les batteries, piles et accumulateurs.

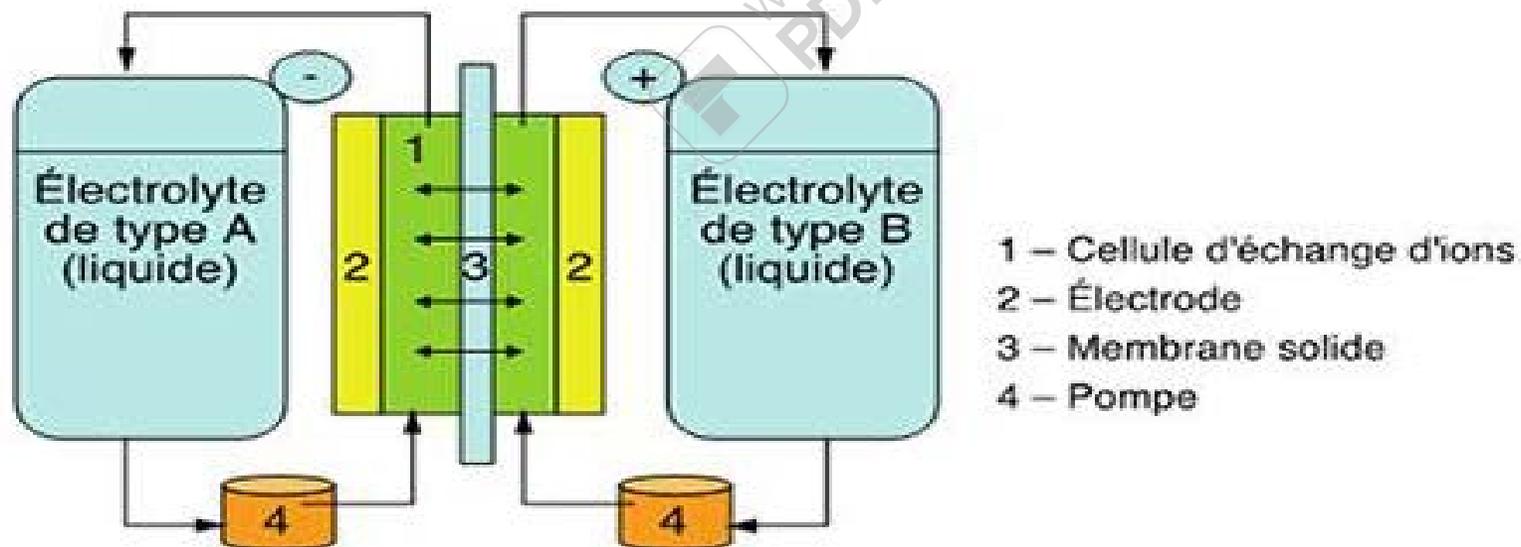
- Les batteries utilisées comme réserve massive d'énergie peuvent délivrer une puissance pendant quelques heures ou sur plusieurs jours et résister à un certain nombre de cycles de charge/décharge. Leur utilisation se situe plutôt à l'échelle d'un bâtiment ou d'une petite collectivité où elles permettent d'optimiser la gestion de sources d'énergie renouvelables, solaire ou éolienne (ou autre), En effet, la notion de durée de vie liée au nombre de cycles de charge/décharge
- Les systèmes de stockage électrochimique sont généralement composés d'un ensemble de batteries qui cumule la puissance de chaque unité.

# Technologies de stockage

## Mode de stockage électrochimique et électrostatique

### A- Batteries à flux

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.



# Technologies de stockage

## Mode de stockage électrochimique et électrostatique

### B- Vecteur hydrogène

- Le gaz d'hydrogène peut être directement utilisé « comme combustible » ou bien stocké et converti de nouveau en électricité « par une **pile à combustible** ».
- Le principe de **la pile à combustible**, est de convertir l'énergie chimique en énergie électrique à partir de l'hydrogène qui sera utilisé comme carburant. Cette pile ne rejette que de l'eau, donc **ne pollue pas**.
- L'électrolyse de la pile exige des métaux rares et précieux en plus les difficultés d'industrialisation augmentent le prix du dispositif, qui reste trop élevé. Le rendement global est moins de 50% et leur durée de vie s'avère insuffisante dans le cadre d'applications couplées au réseau électrique.

# Technologies de stockage

## Mode de stockage électrochimique et électrostatique

### Pile à combustible

Dans la pile, une réaction d'oxydoréduction se forme permettant de créer l'électricité et la chaleur.

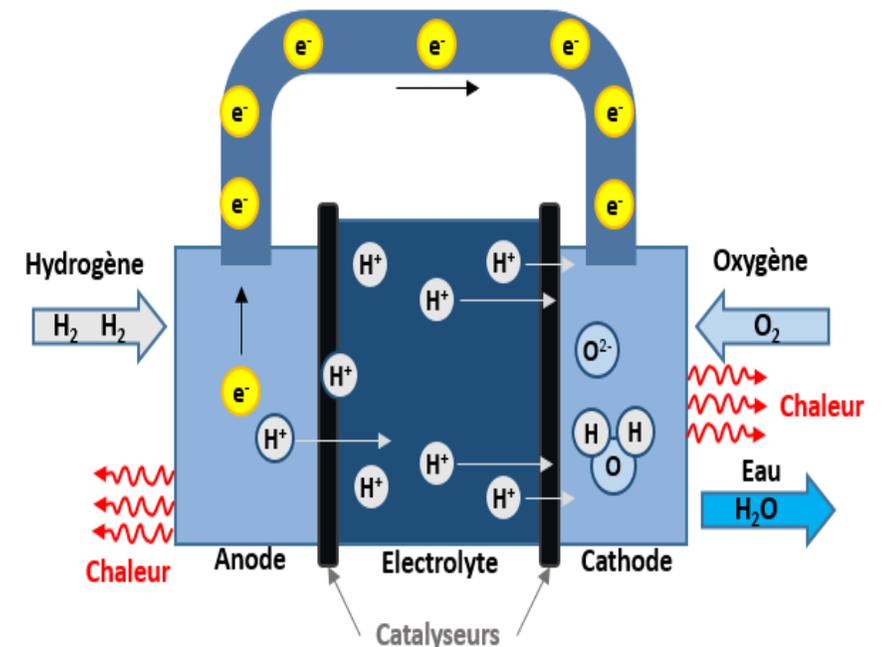
- Au niveau de l'anode, la molécule d'hydrogène, au contact d'un catalyseur, se décompose et libère des électrons qui vont créer le courant électrique. **C'est l'oxydation.**



- Au niveau de la cathode, l'oxygène, au contact avec les électrons libérés par la précédente réaction réagit. **C'est la réduction.**



- Enfin, les protons hydrogène, lorsqu'ils arrivent à la cathode, se recombinent avec les ions d'oxygène et forment de l'eau.



# Technologies de stockage

## Mode de stockage thermique

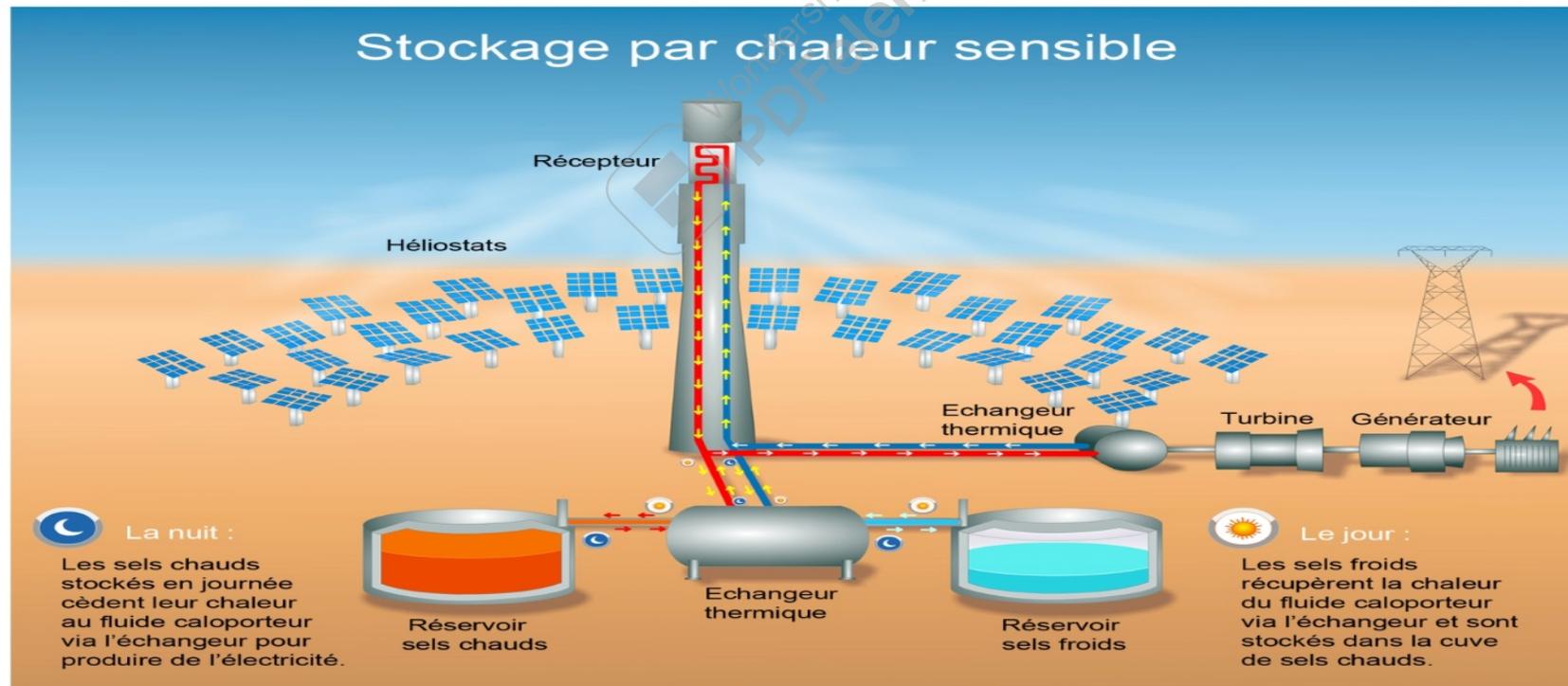
- Le stockage de chaleur concerne principalement le chauffage (ou la climatisation) des bâtiments.
- Les sources de chaleur proviennent en premier lieu du solaire pour lequel le stockage permettrait de réduire les effets de son intermittence et du décalage entre les périodes les plus productives (le jour/l'été) par rapport aux périodes de plus grandes demandes (le soir/l'hiver).
- Tout matériau possède la capacité de libérer ou de stocker de la chaleur via un transfert thermique. Ce transfert peut être :  
par **chaleur sensible** ou par **chaleur latente**

# Technologies de stockage

## Mode de stockage thermique

### A- Stockage par chaleur sensible

- Le stockage par chaleur sensible qui consiste à chauffer un fluide caloporteur ou un solide. La chaleur est ensuite récupérée en chauffant un autre fluide. C'est le principe du **ballon d'eau chaude**, couplé à un panneau solaire thermique.



# Technologies de stockage

## Mode de stockage thermique

### A- Stockage par chaleur latente

- Ce mode de stockage est basé sur les matériaux à changement de phase « **MCP** ». Il consiste à utiliser des matériaux qui passent d'un état solide à liquide lors d'un apport de chaleur.
- Ces matériaux sont de plusieurs types : **métaux**, matériaux organiques (**acides gras et paraffines**) ou inorganiques (**sels hydratés**). Ils sont souvent utilisés dans les matériaux de construction pour tempérer les bâtiments.

Il y a deux facteurs clés pour les matériaux de stockage étudiés :

- ✓ L'inertie thermique (sables, bétons, céramiques).
- ✓ La capacité à supporter de très hautes températures.

# Technologies de stockage

## Mode de stockage électromagnétique

- Enfin, le stockage électromagnétique fait également partie des solutions envisagées qui consiste à créer, grâce à l'électricité, un champ magnétique dans une bobine. L'électricité peut ensuite être récupérée dans un laps de temps très court.

## Résumé des chiffres de stockage massif d'énergie

	Capacité (MWh)	Temps de décharge (en heures)	Efficacité (%)	Nombre de cycles	Durée de vie (en années)
STEP	1 000-20 000	6 - 24	70-85	>13 000	> 40
CAES	120-1 800	5- 24	50-70	>13 000	> 35
Chaleur sensible	40000	6 - 12	75	>10 000	
Chaleur latente	100		85		> 15
Batteries Li-ion	< 100	0.2-4	85-95	10000	
Batteries à flux	< 200	Quelques secondes à 5h	70-80	14000	10-20
Hydrogène	10 à10000	Quelques heures	40		25

# Critères de choix d'une technologie de stockage

La sélection d'un système de stockage sur un site donné dépend de plusieurs critères de choix :

- **La puissance disponible (en MW) et la capacité énergétique (en MWh) :** le ratio énergie/puissance correspondant au temps de décharge réalisable.
- **Le temps de réaction :** est un indicateur de la réactivité du moyen de stockage.
- **L'efficacité énergétique :** définie comme rapport entre l'énergie stockée et l'énergie restituée.
- **La durée de vie :** qu'il est parfois préférable de définir en nombre de cycles de charge/décharge.
- **Le rendement :** Rapport de l'énergie restituée sur l'énergie emmagasinée.
- **Le coût d'installation :** Coûts d'investissement (en DA/kW) et Coûts de fonctionnement (en DA/kWh)