

## Le stockage stationnaire de l'énergie

**Technologies disponibles et recherches du CEA**

Jeudi 18 octobre 2012



---

Contact Presse : CEA / Service Information-Media

Tuline LAESER | T. +33 (0)1 64 50 20 97 | P. +33 (0)6 12 04 40 22

[tuline.laeser@cea.fr](mailto:tuline.laeser@cea.fr)

---

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

Direction de la Communication | Service Information-Média

91191 Gif-sur-Yvette Cedex | T. +33 (0)1 64 50 20 11 | F. +33 (0)1 64 50 28 92

Établissement public à caractère industriel et commercial | RCS Paris B 775 685 019

<b>Les enjeux du stockage stationnaire de l'énergie .....</b>	<b>3</b>
<b>Panorama des technologies disponibles.....</b>	<b>5</b>
STEP – Station de transfert d'énergie par pompage	8
CAES – Stockage par air comprimé	9
Volants d'inertie	10
Stockage sous forme d'hydrogène	11
Batterie Lithium-ion	12
Batterie à circulation ou « Redox-Flow »	13
Stockage thermique par chaleur sensible	14
Stockage thermochimique couplé à système solaire thermique	15
Stockage thermique par changement de phase	16
SMES – Stockage à inductance supraconductrice	17
Supercondensateurs	18
<b>Critères de choix d'une technologie de stockage.....</b>	<b>19</b>
Stockage d'énergie électrique	19
Stockage de chaleur	24
<b>Recherches menées au CEA sur les systèmes de stockage.....</b>	<b>26</b>
Stockage électrochimique	26
Stockage thermique	31
Stockage hydrogène	36
<b>Recherche fondamentale sur le stockage.....</b>	<b>38</b>
Accumulateurs Lithium-ion	38
Le combustible hydrogène	38
Thermoélectricité	39
<b>Conclusion.....</b>	<b>40</b>

## DOSSIER DE PRESSE

## LES ENJEUX DU STOCKAGE STATIONNAIRE DE L'ÉNERGIE

Les recherches du CEA sur les énergies répondent à deux grands objectifs partagés au niveau européen : limiter les émissions de CO<sub>2</sub>, principal gaz responsable de l'effet de serre contribuant au réchauffement climatique et réduire la dépendance aux ressources fossiles en raison de leur raréfaction inéluctable et de l'augmentation de leur coût. L'Union Européenne a d'ores et déjà fixé des objectifs pour 2020 avec la règle des « trois fois 20 » : diminuer la consommation d'énergie de 20%, réduire les émissions de CO<sub>2</sub> de 20% et atteindre une part d'énergies renouvelables dans la fourniture d'énergie primaire de 20%. Le stockage d'énergie est un enjeu technologique clé pour parvenir à ces objectifs.

Le concept de "stockage d'énergie" est d'apporter de la flexibilité et de renforcer la fiabilité des systèmes énergétiques. Il s'agit d'équilibrer dans le temps l'offre et la demande en énergie, aussi bien pour la fourniture d'électricité, de chaleur et de froid.

Dans le système actuel, le lissage des « pointes » de consommation, c'est-à-dire la régulation de la demande d'électricité aux heures pleines, est principalement réalisé par l'importation d'électricité, la mise en fonctionnement de centrales à gaz ou fioul et le stockage hydraulique (STEP). Le déploiement d'autres systèmes de stockage permettrait, d'une part d'abaisser le coût de l'électricité importée, d'autre part de diminuer, de manière significative, les émissions de CO<sub>2</sub> engendrées par l'utilisation de centrales thermiques et la dépendance de la France aux ressources fossiles.

Par ailleurs, le stockage stationnaire de l'énergie, aussi bien le stockage d'électricité que le stockage thermique, apparaît obligatoirement associé au développement des énergies renouvelables en garantissant un courant de « qualité » sur le réseau de distribution. En effet, la production intermittente d'électricité grâce aux énergies solaires et/ou éoliennes engendre des fluctuations importantes qui perturbent et détériorent les équipements de distribution. De plus, cette offre intermittente est souvent en inadéquation avec la demande : c'est, par exemple, au coucher du soleil que nous éclairons et chauffons nos habitations.

Les technologies de stockage de l'énergie font l'objet d'activités de recherche depuis de nombreuses années au CEA. L'organisme est présent sur la plupart des domaines applicatifs du stockage ainsi que sur les différents vecteurs énergétiques (électricité, hydrogène, chaleur), le plus souvent en réponse à des demandes industrielles. A travers de nombreux programmes, les chercheurs du CEA-Liten travaillent :

- à la mise au point de technologies de batteries stationnaires innovantes grâce aux recherches menées sur les matériaux, et sur leur gestion,
- au développement de l'énergie solaire et son intégration sur le réseau,
- à la conception de systèmes de stockage adéquats.



Les compétences transverses du CEA couvrent des applications et des technologies diversifiées, qui vont de la microélectronique à la thermique, en passant par l'électrochimie, l'hydrogène et la thermohydraulique<sup>1</sup>.

Ce dossier propose, dans une première partie, un panorama des différentes technologies de stockage existantes ou en cours de développement. Les premières planches présentent une illustration, le principe de fonctionnement et les caractéristiques de chacune d'entre elles.

Dans une deuxième partie, ce dossier fait un focus sur les recherches technologiques menées au CEA dans ce domaine.

---

<sup>1</sup> La thermohydraulique est l'étude du comportement des fluides sous l'effet de la température. Elle est notamment appliquée dans les centrales nucléaires au niveau de la chaîne d'extraction de la chaleur.

## 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 :

	Transformation 1	Stockage d'énergie	Transformation 2	
<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<sup>2</sup></b>	Pompage	Energie potentielle gravitaire	Turbinage	
<b>Air comprimé – CAES<sup>3</sup></b>	Compresseur	Air comprimé	Turbinage	

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

<b>Stockage par chaleur sensible</b>	Utilisation d'un matériau (liquide, solide) qui emmagasine la chaleur apportée pour la restituer ultérieurement
<b>Stockage thermochimique</b>	Utilisation d'un réactif dont la réaction chimique réversible est endothermique et exothermique <sup>4</sup> .
<b>Stockage par chaleur latente</b>	Utilisation d'un matériau dont l'apport de chaleur entraîne un changement de phase <sup>5</sup> et qui restitue cette chaleur en sens inverse

<sup>2</sup> Station de Transfert d'Energie par Pompage

<sup>3</sup> Compressed Air Electricity Storage

<sup>4</sup> Une réaction chimique peut consommer de la chaleur dans un sens (endothermique) et en produire dans l'autre (exothermique)

<sup>5</sup> La paraffine change de phase, c'est-à-dire passe de l'état solide à liquide, à 70°C environ. Elle est capable de restituer cette chaleur en repassant de l'état liquide à solide.



Enfin, le **stockage supraconducteur**, ou SMES<sup>6</sup>, est une technologie encore au stade de démonstration semi-industrielle qui consiste à stocker l'électricité sous la forme d'énergie magnétique grâce à l'utilisation de bobines supraconductrices. Elle est ensuite directement restituée sous forme électrique.

---

<sup>6</sup> Superconducting Magnetic Energy Storages



## PRESENTATION DES DIFFERENTES TECHNOLOGIES DISPONIBLES

Les pages suivantes 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.

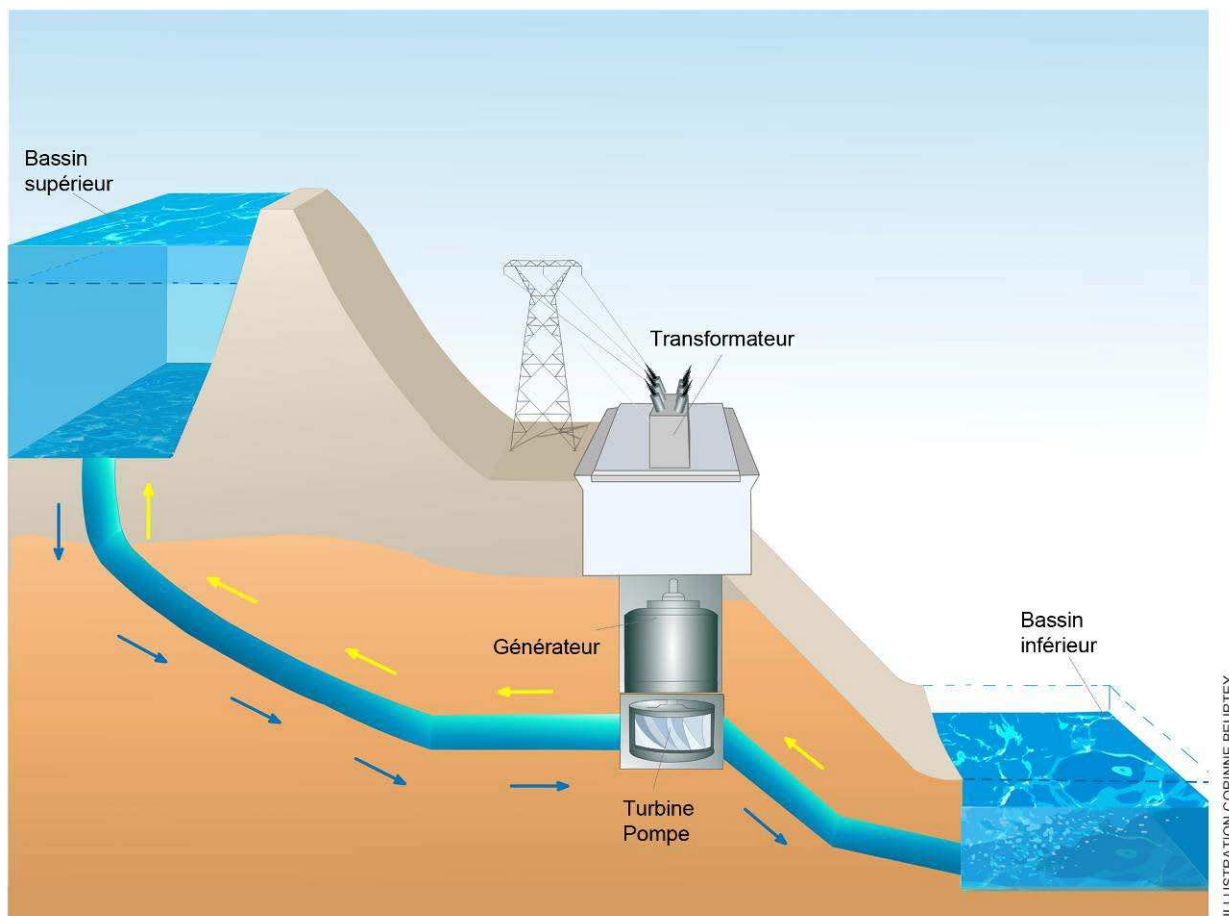


ILLUSTRATION CORINNE BEURTEY

## STEP – Station de transfert d'énergie 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.

Puissance cible	Rendement	Durée de vie (ans)	Coût d'investissement (€/kW)	Coût d'investissement (€/kWh)
Qq MW / qq GW	0,65 – 0,80	40-60	500-1500	70-150

Données Ademe

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mature</li> <li>- Bon rendement</li> <li>- Durée de vie (+40 ans), cyclage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contrainte d'emplacement</li> <li>- Impact environnemental / acceptabilité du public</li> </ul>



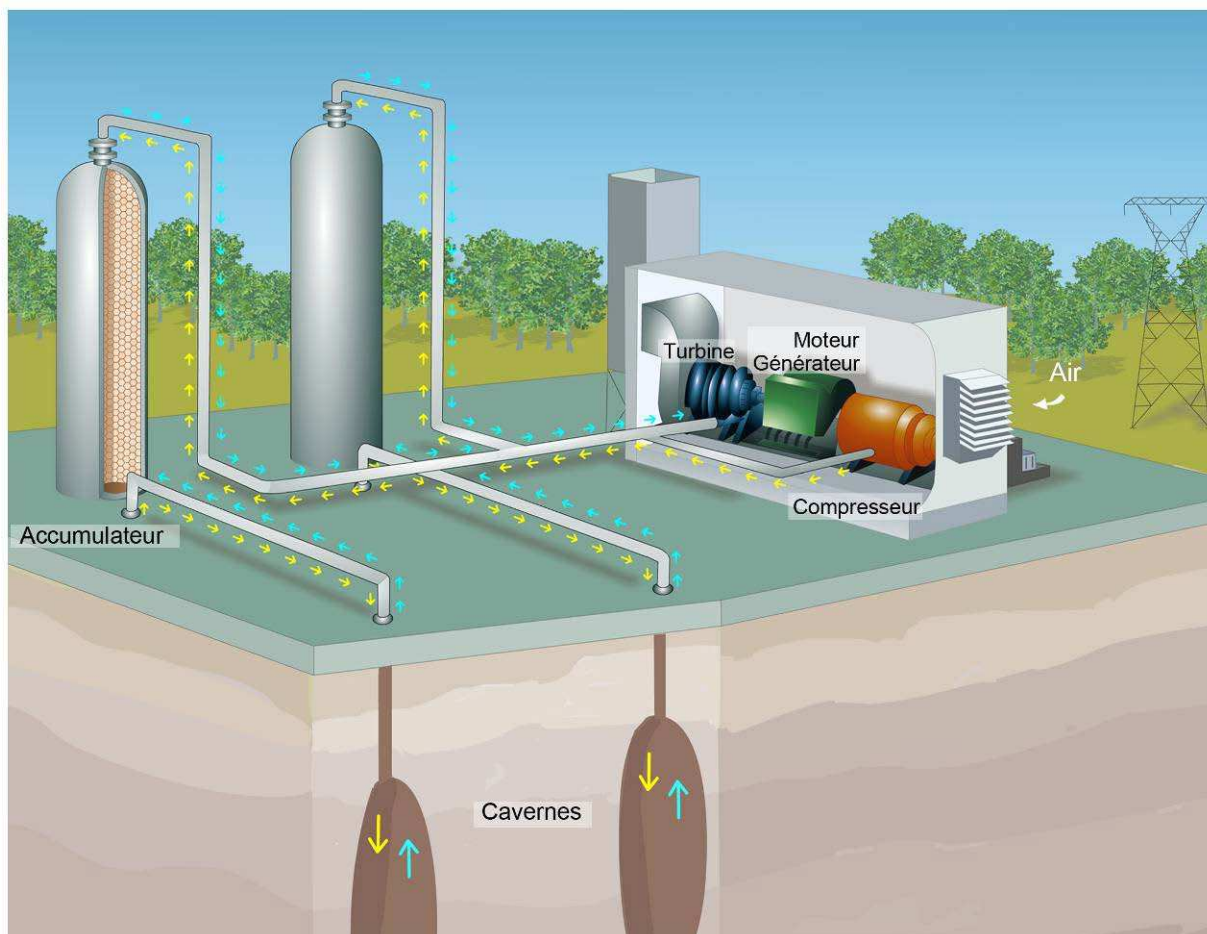


ILLUSTRATION CORINNE BEURTEY

## 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-terrain. 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)	Coût d'investissement (€/kWh)
100-500 MW	0,5	30-40	450-650	50-80

Données Ademe

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas d'émission CO<sub>2</sub> (CAES adiabatique)</li> <li>- Grandes puissances et très grandes capacités</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coût d'investissement</li> <li>- Site de stockage géologique adapté</li> </ul>

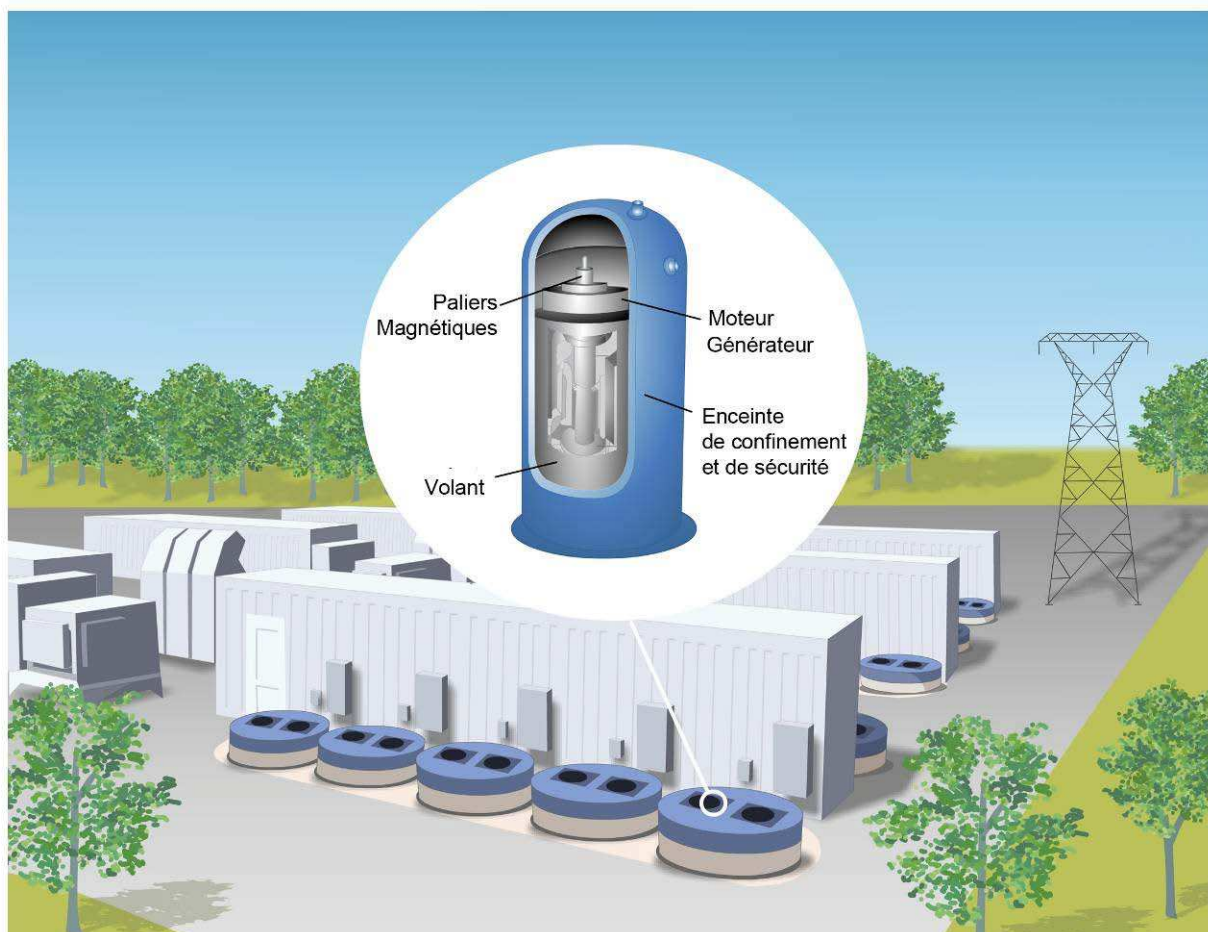


ILLUSTRATION CORINNE BEURTEY

## Volants d'inertie

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)	Coût d'investissement (€/kWh)
Qq kW / qq 10 MW	0,85 – 0,95	20	150 – 3000	

Données Ademe

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>- Problèmes de sécurité</li> <li>- Coût</li> </ul>

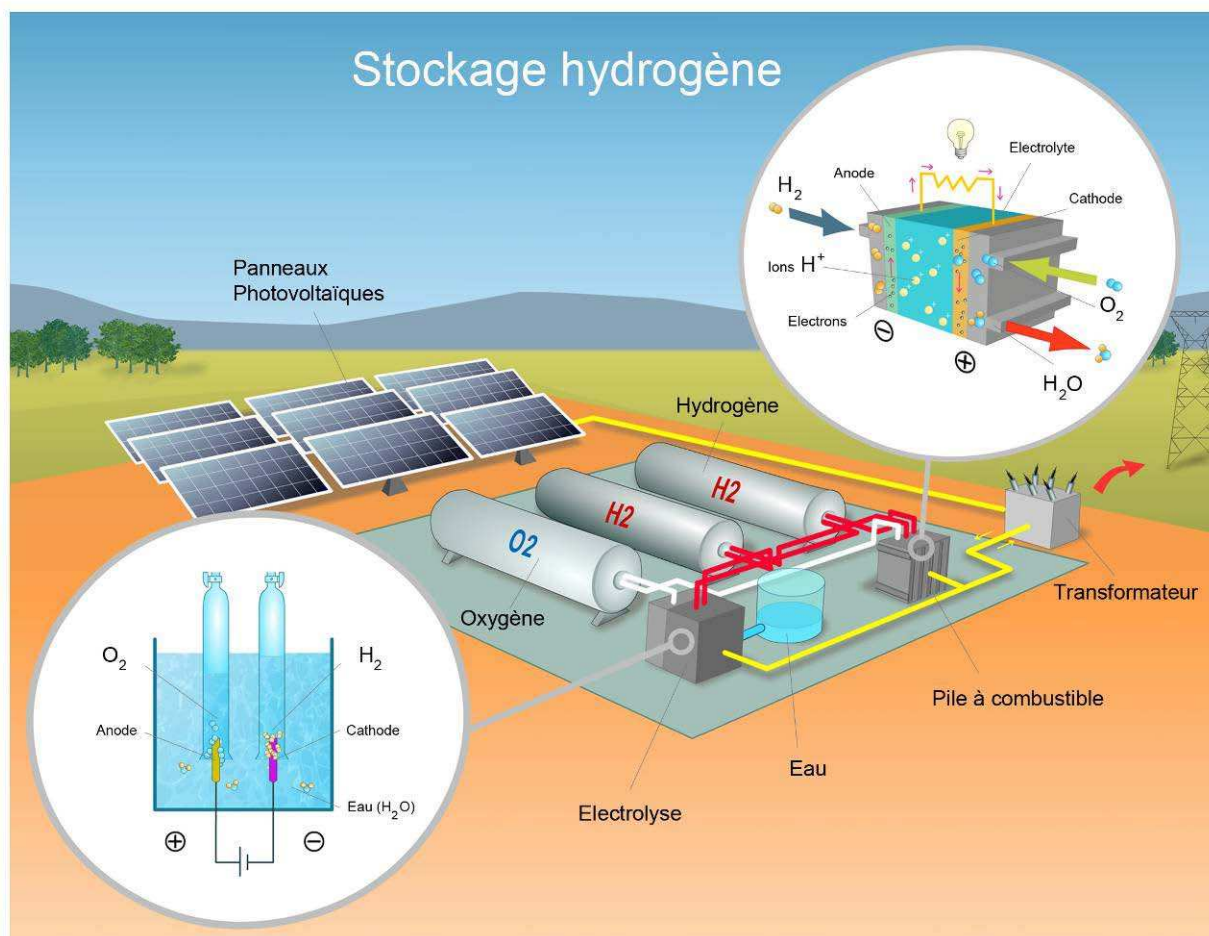


ILLUSTRATION CORINNE BEURTEY

## Stockage sous forme 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. ( $H_2O \rightarrow H_2 + \frac{1}{2} O_2$ ).
- Ensuite l'hydrogène est stocké dans un réservoir sous forme gazeuse, liquide ou solide.
- Il est enfin retransformé 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)	Coût d'investissement (€/kWh)
1 kW-10 MW	0,25 – 0,35	5-10	6 000	< 500

Données ENEA

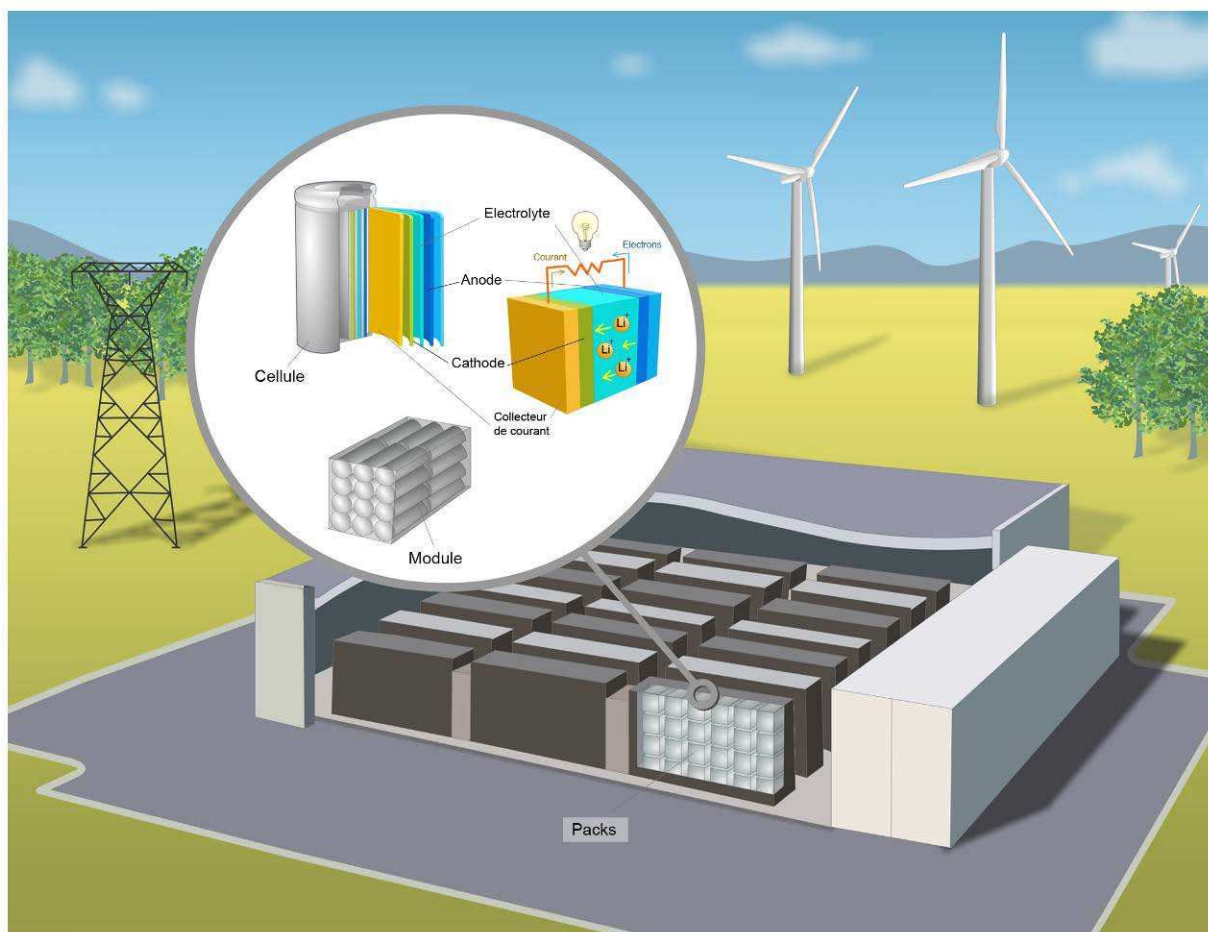


ILLUSTRATION CORINNE BEURTEY

## 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)	Coût d'investissement (€/kWh)
Qq kW / qq 100 kW	0,7 – 0,75	10-15	600 - 1500	

Données Ademe

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Haute densité énergétique</li> <li>- Bon rendement</li> <li>- Durée de vie, cyclage (selon la nature chimique choisie)</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>

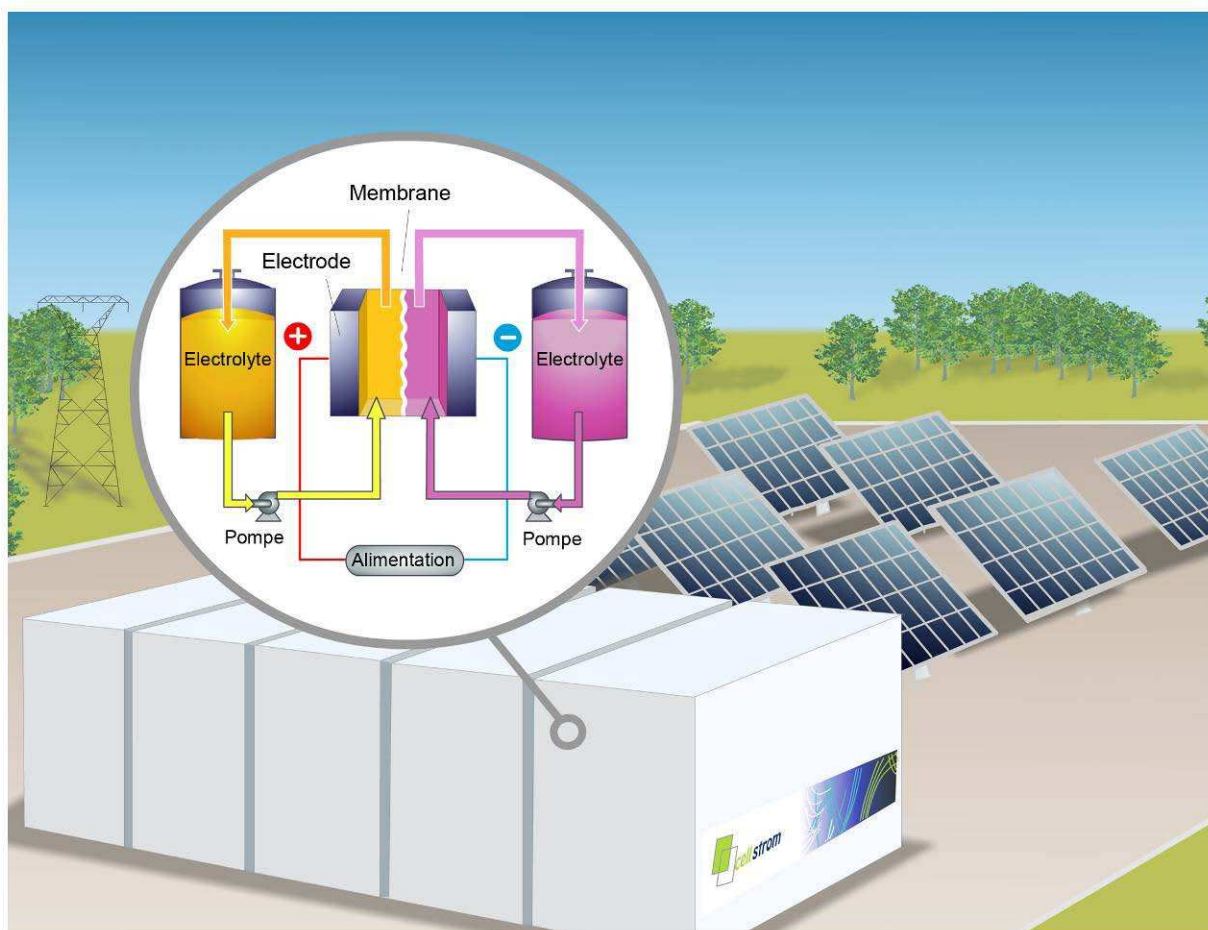


ILLUSTRATION CORINNE BEURTEY

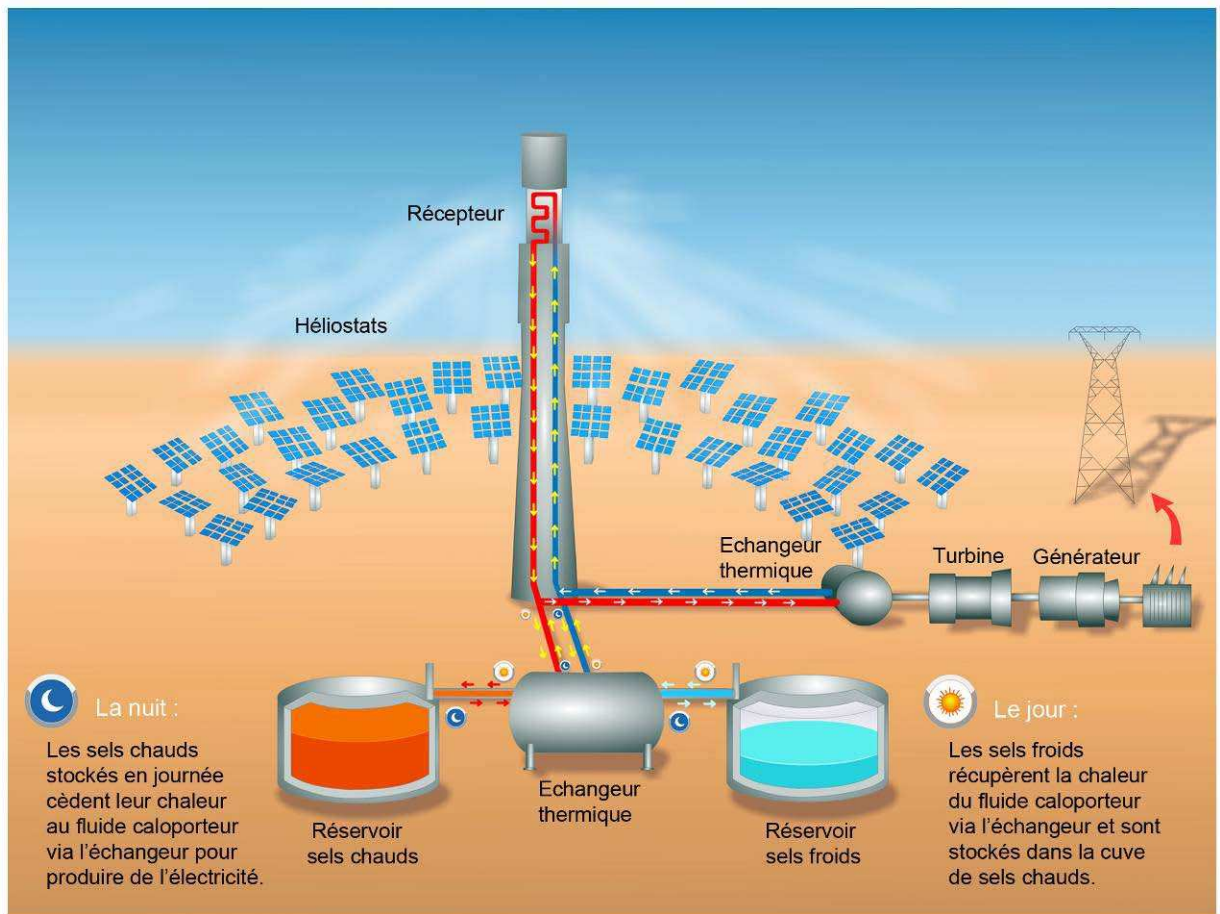
## Batterie à circulation ou « Redox-Flow »

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)	Coût d'investissement (€/kWh)
Qq MW	0,65 – 0,75	15-20	1000-3000	100-400

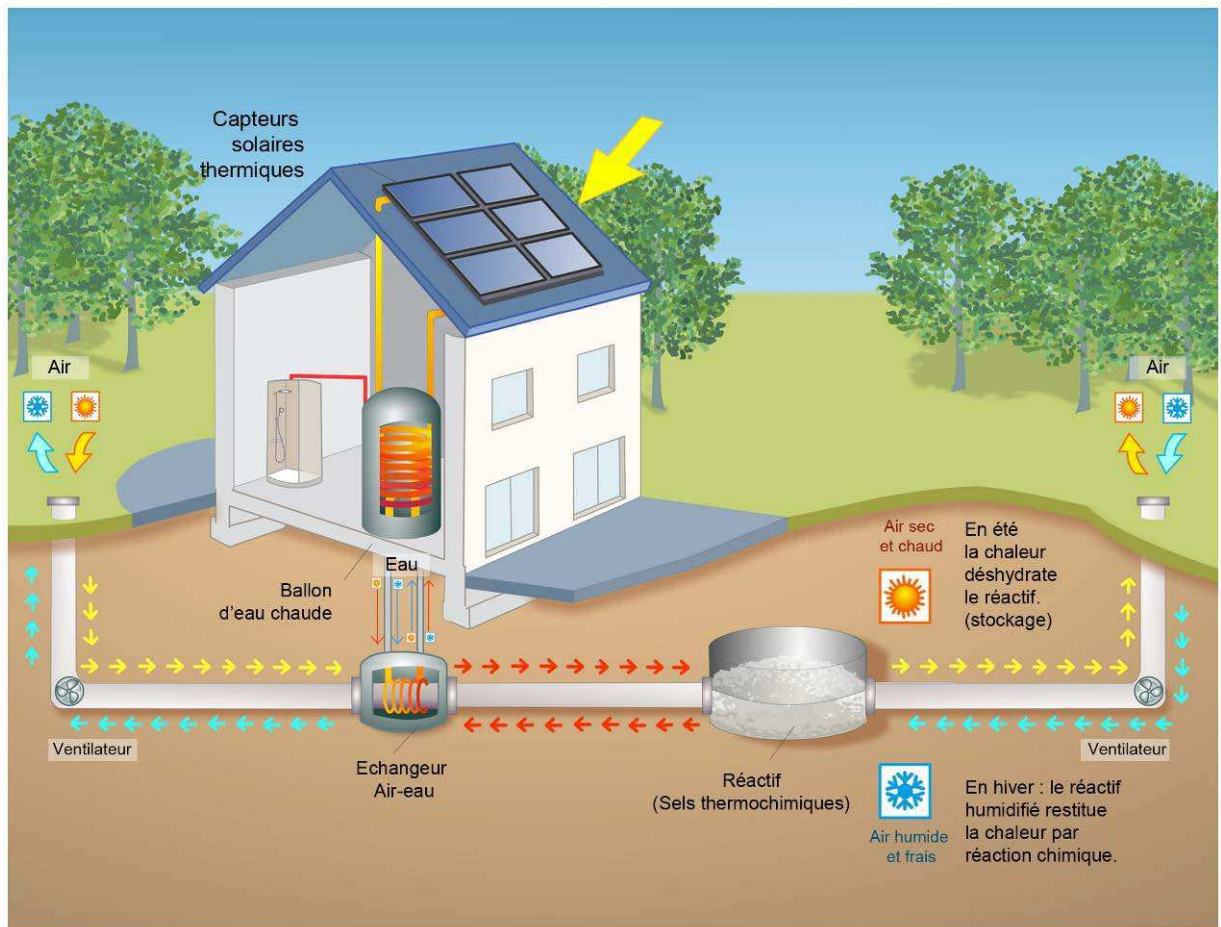
Données Ademe

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Haute modularité</li> <li>- Large plage des ratios Puissance/Energie</li> <li>- Durée de vie</li> <li>- Faible autodécharge</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Architecture compliquée (surtout lorsqu'il y a deux cuves)</li> <li>- Risque de fuite de l'électrolyte</li> <li>- Coût de maintenance</li> <li>- Faible densité énergétique</li> </ul>



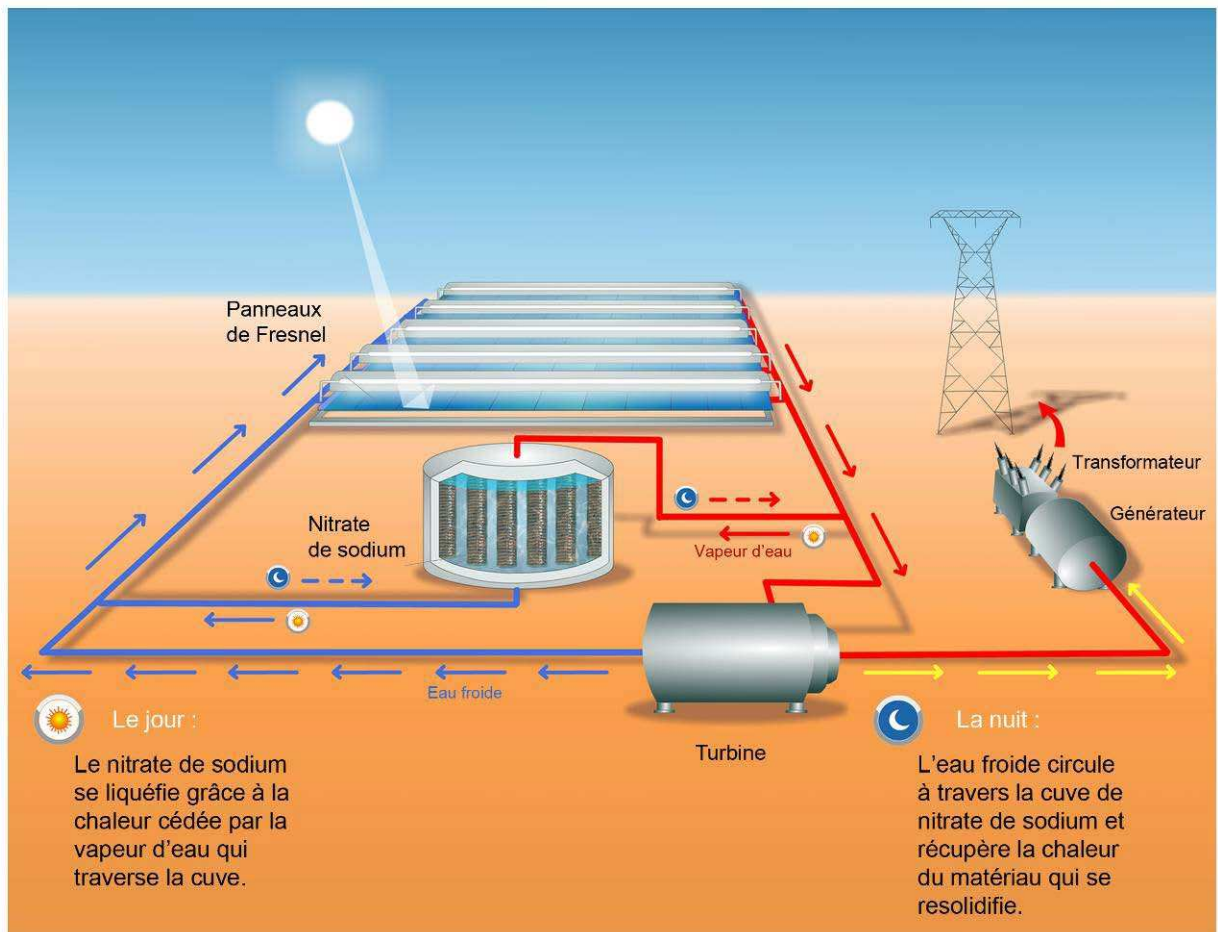
## Stockage thermique par chaleur sensible

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 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.

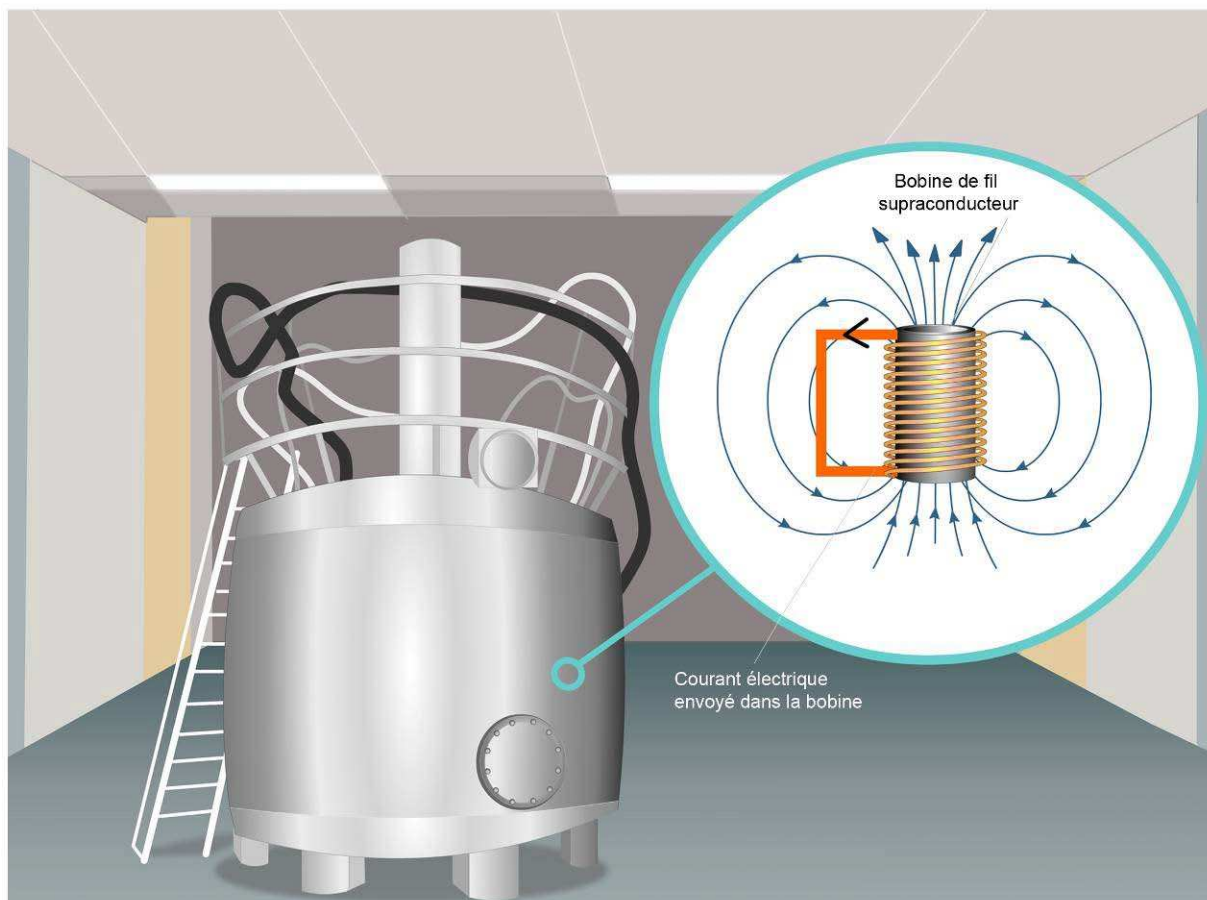


## Stockage thermique par changement de phase

Le principe du stockage via des matériaux à changement de phase (MCP) consiste à utiliser des matériaux qui passent d'un état solide à liquide lors d'un apport de chaleur. Par exemple, la paraffine. Placée dans une cuve de stockage sous forme solide à température ambiante, elle est traversée par des tuyaux en cuivre dans lesquels circule de l'eau. Lorsque l'eau chaude arrive, la paraffine se réchauffe et passe de la forme solide à liquide. A l'inverse, la paraffine va céder sa chaleur en se resolidifiant si c'est de l'eau froide (autour de 15°C) qui circule dans le tube.

Une installation classique consiste à mettre le MCP dans un grand réservoir au milieu duquel passent des tubes pour transporter le fluide caloporteur. Le MCP et le fluide peuvent être différents suivant la production de chaleur qui lui est associée, et donc la température ou quantité de chaleur que l'on souhaite stocker.





## 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>

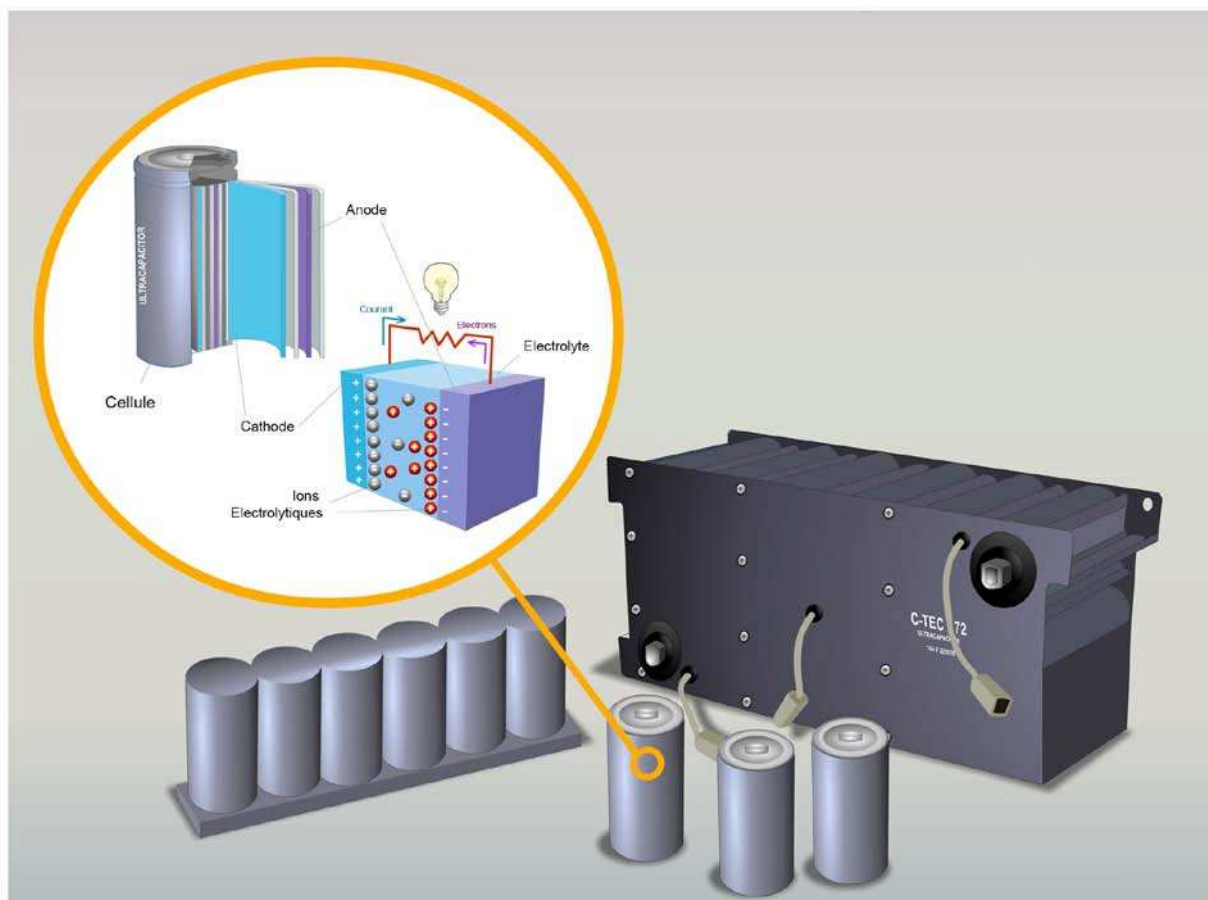


ILLUSTRATION CORINNE BEURTEY

## 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

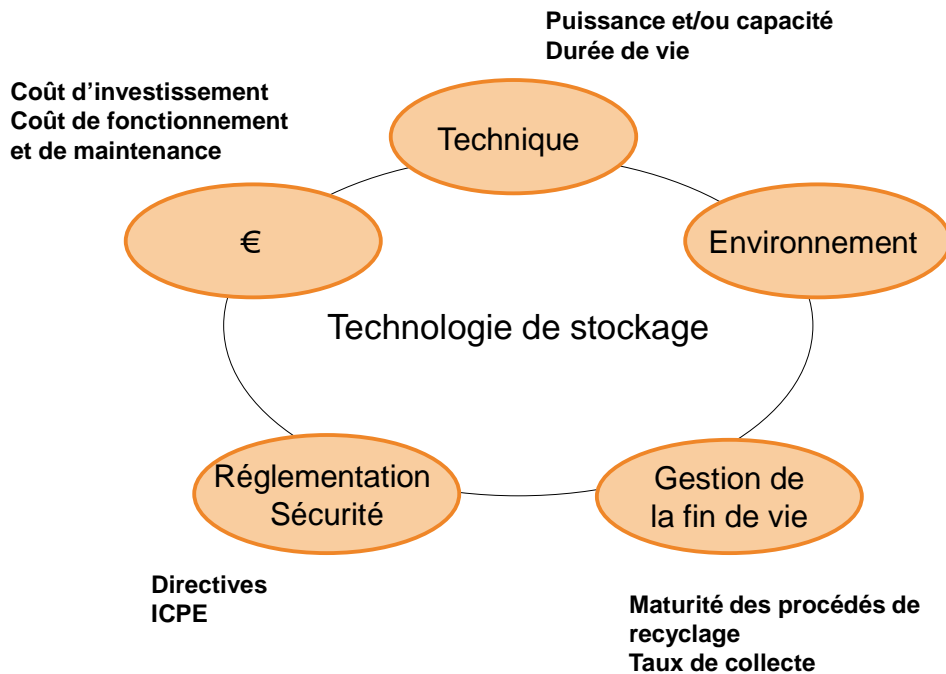
Données ENEA

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>

## CRITERES DE CHOIX D'UNE TECHNOLOGIE DE STOCKAGE

Il existe différentes technologies de stockage stationnaire capables de s'adapter au mieux au système de production d'énergie, au besoin, à l'investissement... L'ensemble de ces technologies se complètent et doivent permettre de réfléchir en terme de réseau de stockage. Chaque réseau (thermique, électrique, production d'hydrogène) peut se développer en parallèle et ainsi couvrir l'ensemble des besoins.

Les critères de choix d'une technologie de stockage dépendent du besoin, auquel on associe un cahier des charges, des contraintes de réglementation, de coût et d'environnement...



### Stockage d'énergie électrique

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

- quantité et nature d'énergie disponible ;
- puissances disponibles ;
- densité de stockage en énergie et puissance, qui conditionne le volume et le poids du système ;
- coût et maintenance qui sont liés à la maturité de la technologie ;
- nombre de cycles et profondeur de décharge ;
- sécurité.

## Caractéristiques et coûts d'investissement des principaux moyens de stockage d'électricité

	Puissance cible	Rendement	Durée de vie (ans)	Coût d'investissement par unité de puissance (€/kW)	Coût d'investissement par unité d'énergie (€/kWh)	Acteurs industriels français
Batteries classiques	10 kW-10 MW	0,7	10-12 (3 000 cycles)	250-350	500-1500	EXIDE, ENERSYS
Batteries à base de lithium	Qq kW/ Qq 100 kW	0,7-0,75	10-15	600-1 500	-	SAFT, VATSCAP, SVE, JV (RENAULT, CEA)
Batteries <i>redox-flow</i>	Qq MW	0,65-0,75	15-20	1 000-3 000	100-400	-
Batteries NaS	Qq 50 kW/ qq 10 MW	0,7-0,75	10-15	1 000-2 500	-	-
STEP	Qq MW/ qq GW	0,65-0,8	40-60	500-1500	70-150	ALSTOM, SIEMENS, EDF
CAES adiabatique en caverne	100-500 MW	0,5	30-40	450-650	50-80	ALSTOM, SIEMENS, SAINT-GOBAIN
CAES avec réservoir	Qq 1-10 MW	0,5	30-40	500-700	150-200	
Hydro-pneumatique	Qq 1 MW	0,75	20-30	600-1 000	200-500	
SMES (électro-magnétisme)	Qq kW/ qq 100 MW	0,75-0,8	20-30	100-500	-	
Volants d'énergie	Qq kW/ qq 10 MW	0,85-0,95	20	150-3 000	-	SEVIL ( <i>start-up</i> ), ALSTOM, THALES, AES, EADS

Source : ADEME

*Le coût d'investissement par unité de puissance représente le coût correspondant à la quantité de puissance que peut absorber le système de stockage. Tandis que le coût d'investissement par unité d'énergie représente le coût correspondant à l'énergie (la puissance délivrée dans un temps donné) que peut stocker le système. Par exemple, une batterie délivre beaucoup de puissance mais dans un temps assez court.*

### MATURITE DES TECHNOLOGIES

Parmi les différentes technologies de stockage disponibles, certaines ont atteint un stade plus abouti et plus mature. Le stockage hydraulique, via des STEP, est actuellement la plus répandue. Cette technologie de stockage est éprouvée, fiable, de bon rendement (jusqu'à 80%) et comparativement peu coûteuse ce qui lui permet d'être compétitive par rapport à l'utilisation de centrales thermiques au gaz lors des périodes de forte demande d'électricité. En France, les stations hydrauliques sont principalement installées dans les Alpes et les Pyrénées, pour une puissance installée de 4,3 GW et une production annuelle de 6TWh. Les sites d'installations sont toutefois limités et le développement de cette technologie est estimé à 3 GW en France. Pour palier au manque de sites, les innovations portent

sur l'installation de STEP en façade maritime, par exemple l'installation d'Okinawa au Japon, ou en sous-terrain.

Le stockage par air comprimé (CAES) apparaît également comme une technologie économiquement mature, en particulier pour les installations combinées à un système de stockage thermique, dites de deuxième génération ou encore CAES adiabatique. Il existe deux sites de stockage par air comprimé de première génération dans le monde, en Allemagne (280 MW) et aux Etats-Unis (110 MW). Des projets d'installation de deuxième génération sont en cours de développement, notamment en Europe avec le projet ADELE. Les autres pays s'orientent vers les CAES de surface et du stockage électrochimique.

### **IMPACT ENVIRONNEMENTAL ET GESTION DE FIN DE VIE**

L'impact sur l'environnement et la gestion de fin de vie, qui peuvent induire sur l'investissement global, contribuent également aux choix d'une technologie.

L'aspect environnemental est concerné pour l'ensemble des systèmes que ce soit pour :

- l'encombrement de l'installation. L'implantation de certains ouvrages, dont l'emprise au sol est importante, nécessite des mises à disposition par les collectivités territoriales ;
- Les risques de ruptures d'ouvrages type STEP qui nécessite une qualité d'ingénierie et de surveillance sans défaut ;
- Les risques de pollution par les composants des systèmes de stockage électrochimique.

Très peu d'études sont disponibles sur l'analyse des impacts environnementaux. Les quelques travaux réalisés concernent essentiellement les batteries. Une analyse de cycle de vie conduite sur les batteries à circulation au vanadium et les batteries plomb-acide a montré que le fonctionnement et le recyclage de l'accumulateur vanadium nécessite environ 3 fois moins d'énergie que l'accumulateur au plomb. Les émissions de CO<sub>2</sub>, CO et NOx sont en moyenne 5 fois moins élevés pour le vanadium que pour le plomb.

En ce qui concerne la gestion de fin de vie, la réglementation impose des taux de recyclage pour tous les accumulateurs.

Notons que parmi les accumulateurs étudiés, ceux qui ont le plus d'impact sur l'environnement sont ceux au plomb et nickel-cadmium pour lesquels il existe des réglementations spécifiques. Par exemple, les taux de recyclage sont de :

- 65% en masse pour les accumulateurs au plomb,
- 75% pour le Ni-Cd,
- 50% pour les autres systèmes.

En France en 2008, 223 424 tonnes d'accumulateurs au plomb ont été traitées (dont 184 325 valorisées) et 4008 tonnes d'accumulateurs au Ni-Cd ont été traitées (dont 2790 valorisées).

## ASPECT ECONOMIQUE

Tableau comparatif des coûts d'investissement des principaux moyens de stockage d'électricité

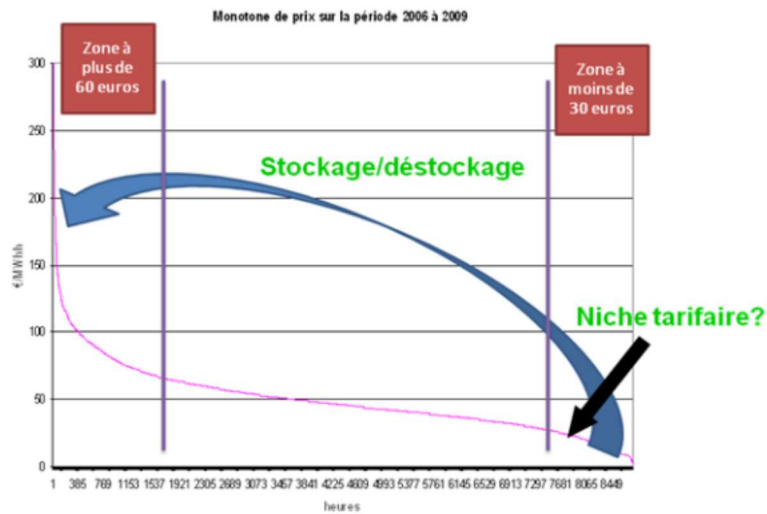
	STEP	CAES	Hydrogène	Batterie NaS	Batterie Li-ion	Batterie Redox-Flow	Volant d'inertie	SMES
<b>Coût d'investissement par unité de puissance (€/kW)</b>	500 – 1500	700 – 1000	6000	1000 – 2500	600 – 1500	1000 – 3000	150 – 3000	100 – 500

Les coûts d'investissement en stockage restent élevés aujourd'hui, même si ces coûts doivent diminuer dans les 20 ans à venir, grâce, notamment, au développement de nouveaux matériaux et procédés. Des modèles doivent permettre de valoriser le stockage face à la concurrence des moyens classiques de gestion des pointes, dont l'effacement et les cycles combinés à gaz, en prenant notamment en compte les investissements évités par la présence de moyens de stockage (moins de coupures, moins de perte sur les réseaux grâce à une consommation plus locale...).

En France, il n'existe à ce stade pas d'incitation particulière au recours à un système de stockage. Au contraire, l'achat d'électricité en vue de son stockage est soumis au tarif d'accès au réseau (10-20 €/MWh), ce qui est assez dissuasif.

Pour se développer et être économiquement viable, le stockage d'énergie peut compter, en partie, sur la volatilité des prix de l'électricité : il s'agit de stocker l'électricité au cours des périodes de l'année où elle est la moins chère pour la redistribuer lors des pics de consommation.

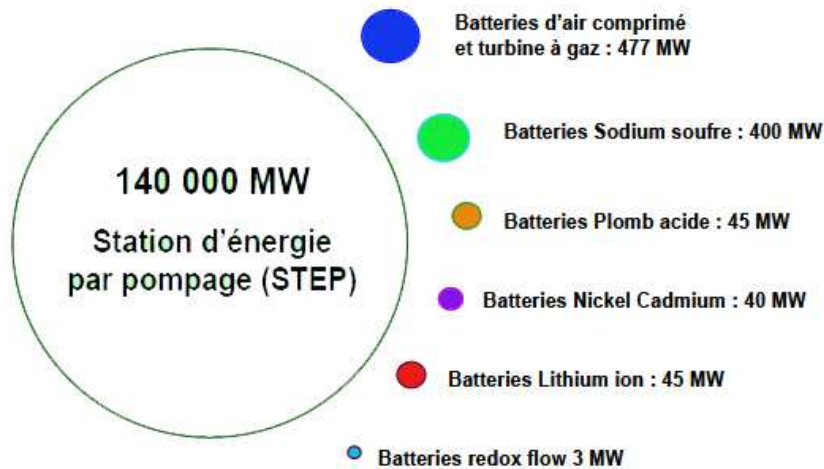
## Volatilité des prix et positionnement du stockage



*La courbe rose représente le prix du MW/h pour une heure, au cours d'une année.  
L'abscisse correspond au nombre d'heures dans l'année (environ 8740).  
L'ordonnée correspond au coût pas MWh*

Le marché mondial du stockage en 2010 était compris entre 1,5 et 4,5 milliards de dollars, largement dominé par les STEP et de 400 à 600 millions de dollars pour les batteries, super-capacités et volants d'inertie.

Les projections pour 2020 sont comprises entre 16 et 35 milliards de dollars pour de nouvelles capacités installées (de 7 à 14 GW par an). L'Agence internationale de l'énergie prévoit le développement des capacités de stockage mondial qui passerait de 100 GW actuel à 200 GW en 2050 si le taux d'insertion de l'éolien était de 15%, voire 300 GW pour 30% d'éolien (60 GW pour 15% d'éolien et 100 GW pour 30% d'éolien en Europe).



Source : Fraunhofer Institute, EPRI, EDF R & D

### Capacité mondiale installée pour le stockage d'électricité

## Stockage de chaleur

La production d'énergie sous forme de chaleur est principalement associée au solaire thermique mais aussi aux sites industriels qui, dans leur activité, produisent du chaud ou du froid. Les températures atteintes peuvent être très variables d'une technologie à une autre : une centrale thermodynamique peut porter la vapeur d'eau à plus de 500°C, tandis qu'un panneau solaire installé sur le toit d'une maison porte l'eau autour de 80°C. Lors de l'étude du besoin, se pose également la question de la durée de stockage :

- de quelques heures à une journée, pour la gestion des sources intermittentes productrices de chaleur en journée et restituée le soir ;
- de plusieurs mois, stockage saisonnier du surplus de chaleur produit en été et restitué en hiver.

Parmi les trois principes de stockage thermique (sensible, latent ou thermo chimique) le choix porte donc sur des critères :

- thermodynamiques (température de fusion, capacité calorifique, conductibilité thermique...)
- physiques et chimiques (stabilité chimique, absence de décomposition et corrosion...)

Parmi les critères de choix, la prise en compte de l'impact environnemental est également importante, notamment sur la nature des sels fondus utilisés dans certaines technologies de stockage qui peuvent être polluants et difficilement retraités.

La maturité de la technologie de stockage peut également faire partie des critères de sélection. La technologie du chauffe-eau sanitaire est particulièrement mature et ne nécessite donc plus d'effort public de R&D, contrairement au stockage





associé aux centrales thermodynamiques ou encore au stockage par réaction chimique qui, pour l'instant, n'existe qu'au stade de démonstrateur.

D'un point de vue économique, comme pour le stockage d'électricité, l'évaluation nécessite de prendre en compte le coût d'investissement mais aussi les coûts d'exploitation, de maintenance et de recyclage. Le volume du système de stockage est souvent la variable prépondérante de cette évaluation, parce qu'il induit des coûts en termes d'isolation et en raison de la quantité de matériaux mobilisés. Le stockage saisonnier par chaleur sensible présente malgré tout des pertes thermiques assez importantes du fait de la longue durée de stockage qui engendre un surcoût de l'énergie stockée. Le stockage thermochimique sera alors particulièrement adapté au stockage saisonnier car il n'entraîne pas de perte avec le temps. Il ne sera en revanche pas envisagé pour le stockage à court terme car moins rapidement réversible qu'un système sensible.

# RECHERCHES MENEES AU CEA SUR LES SYSTEMES DE STOCKAGE

## Stockage électrochimique

Le stockage par voie électrochimique, du fait de sa flexibilité de dimensionnement, s'impose dans les applications de faible puissance/énergie (installation dans les sites isolés, dans les cas d'autoconsommation).

Désormais, il est aussi envisagé dans des applications de grandes dimensions. Les batteries sont étudiées pour le stockage semi-massif en appui à l'intégration des énergies renouvelables ou à la stabilisation du réseau. Leur puissance, selon la technologie et les matériaux envisagés, peut varier de quelques dizaines de kW (batterie Zinc-Air – ZnAir – entre 20 kW et 10 MW) jusqu'à quelques dizaines de MW (batterie Sodium Soufre – NaS – environ 35 MW).

Les chercheurs du laboratoire du Stockage de l'Electricité (LSE), au CEA-Liten, travaillent à des systèmes de stockage pour trois grandes applications :

- les véhicules électriques :
- le stockage connecté au réseau ;
- les systèmes photovoltaïques autonomes.

### Caractéristiques d'une batterie

Dans un élément électrochimique le courant électrique restitué est généré par un transport d'ions au sein d'une cellule élémentaire formée de deux électrodes, l'une positive (la cathode) l'autre négative (l'anode), baignant dans un électrolyte.

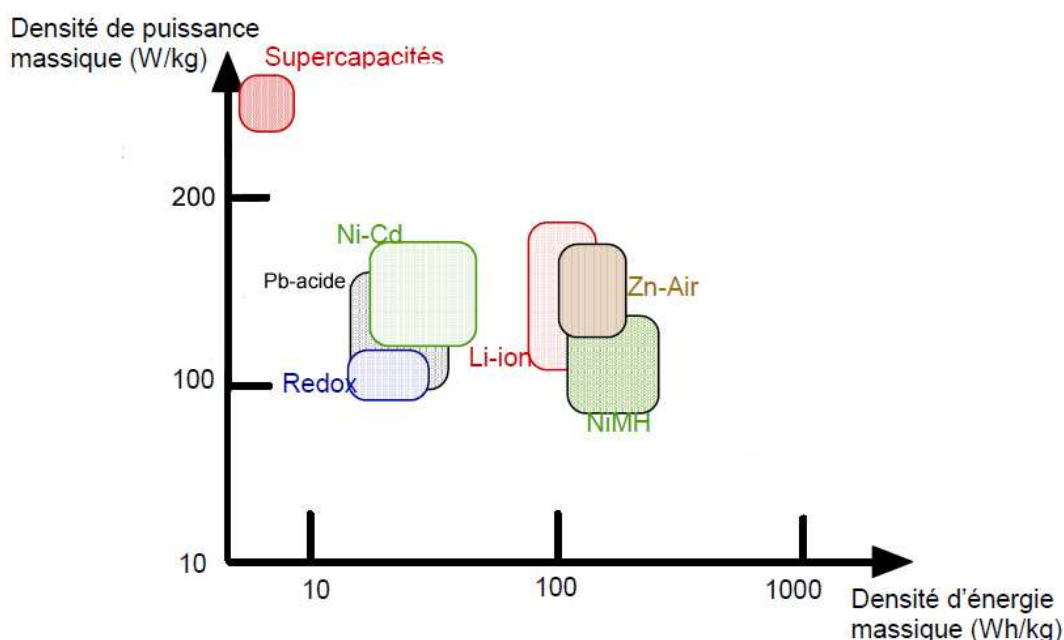
Si la transformation électrochimique est réversible on parle d'accumulateurs qui peuvent ainsi être alternativement chargés ou déchargés. Le cas inverse est la pile. L'anode, la cathode et l'électrolyte sont les trois éléments qui déterminent, en fonction de leur composition, le type de la batterie.

Le principe physique de stockage, le choix des matériaux, et leur bonne association définissent les caractéristiques de la batterie en termes :

- de capacité électrique massique (Ah/kg) et de tension (V) ;
- d'énergie spécifique ou densité d'énergie massique (Wh/kg) ;
- de puissance spécifique ou densité de puissance massique (W/kg) ;
- de densité d'énergie ou de puissance volumique (Wh/l ou W/l) ;
- de durée de vie et de cyclabilité ;
- de sécurité ;
- de coût (€/kWh).

Les compétences du laboratoire ciblent le dimensionnement, l'évaluation, la modélisation et la gestion des systèmes de stockage, avec notamment le développement d'algorithmes de charge/décharge, d'indicateurs d'état de charge, d'état d'énergie ou encore d'état de santé des batteries (suivi de leur vieillissement).

Les chercheurs développent des technologies sur plusieurs couples électrochimiques : Li-ion, Pb-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Pb-AMS... Ensuite, lorsqu'une technologie est à maturité, les équipes du LSE travaillent à son exploitation dans les meilleures conditions de fonctionnement en développant des indicateurs de gestion. La plate-forme expérimentale STORE permet de caractériser les performances et le vieillissement de différentes technologies de stockage d'électricité, principalement électrochimiques.



## DEVELOPPEMENT D'UNE BATTERIE PB-ACIDE METHANESULFONIQUE (PB-AMS)

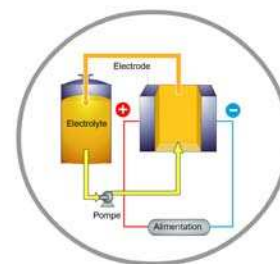
L'accumulateur au plomb-acide méthanesulfonique à circulation d'électrolyte (Soluble Lead Flow Battery, SLBF) est une nouvelle alternative à la batterie au plomb-acide sulfurique, pour toutes les applications de stockage « gros volume » comme les installations photovoltaïques et les installations de support du réseau. Le système plomb-acide méthane sulfonique présente les avantages suivants :

- Un compartiment de réaction unique, d'où un seul ; réservoir d'électrolyte et un seul système de pompage ;
- L'absence de membrane, ce qui permet un fonctionnement à forte puissance ;
- Des électrodes de grande surface active avec un

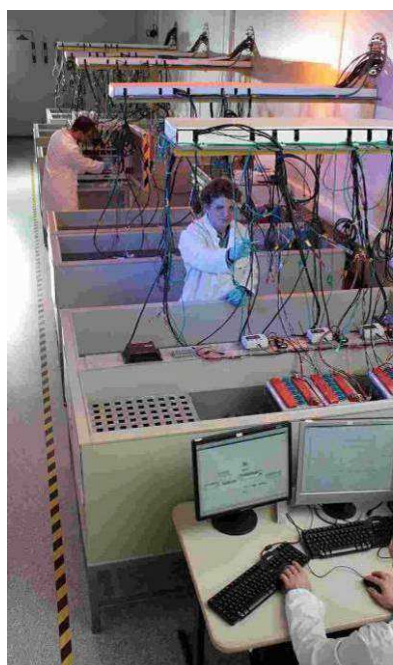


©P.Avavian/CEA

- seul pôle ce qui améliore fiabilité et étanchéité du système ;
- L'éco-conception en amont de la technologie et l'utilisation d'un électrolyte non toxique, l'AMS ;
- Un faible coût grâce à l'utilisation d'un électrolyte unique, d'un couple électrochimique basé sur le plomb et l'acide méthane sulfonique qui est un acide organique, biodégradable, qui peut être produit, à terme, par des micro-organismes. L'objectif est inférieur à 150€/kWh installé (coût moyen pour les batteries au plomb acide) ;
- Alternative à la batterie vanadium.



## SYSTEMES DE GESTION DES BATTERIES ET ORGANES DE SECURITE



©P.Avavian/CEA

Le Laboratoire du stockage de l'électricité travaille également à la mise au point d'intelligence pour les systèmes de gestion des batteries (ou « Battery Management System » - BMS). Ce système électronique permet à la fois :

- de garantir la sûreté des batteries,
- d'optimiser leurs performances,
- de permettre la maintenance éventuelle du système,
- d'informer l'utilisateur en continu.

Connaître l'état de charge d'une batterie permet :

- de contrôler sa consommation,
- d'assurer une meilleure utilisation et
- d'allonger la durée de vie de la batterie.

Il est alors nécessaire de connaître les cycles de charge et décharge les mieux adaptés à l'accumulateur grâce à la caractérisation électrique de batteries, et ensuite de développer des algorithmes de gestion.

Les accumulateurs subissent divers tests (échauffement, cyclage à froid, charge et décharge lentes ou rapides, ...). Ils sont ensuite « autopsiés » afin d'étudier les dommages causés selon les expériences et les profils de sollicitation.

Outre le choix des matériaux dans l'optique de permettre des réactions chimiques plus performantes, se pose également la question de la sécurité des batteries. Des systèmes sont installés afin de surveiller d'éventuelles réactions dangereuses, entraînant une surchauffe notamment, qui pourraient avoir lieu au sein de la batterie.



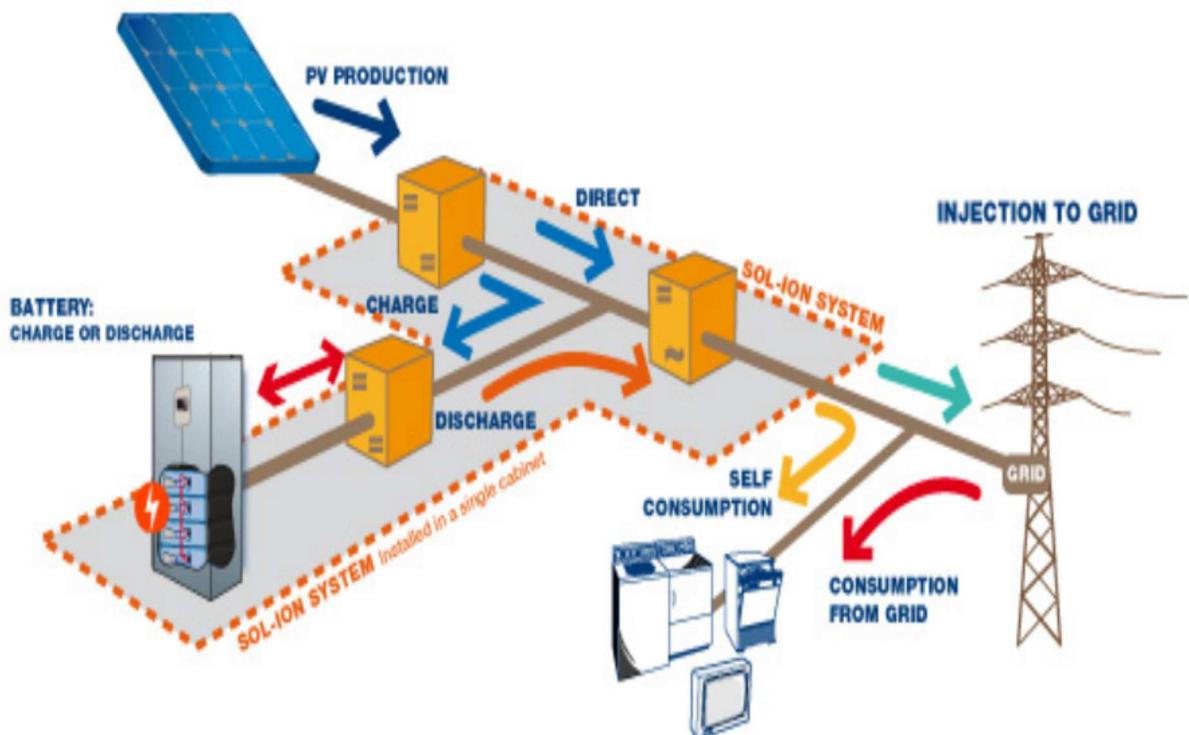
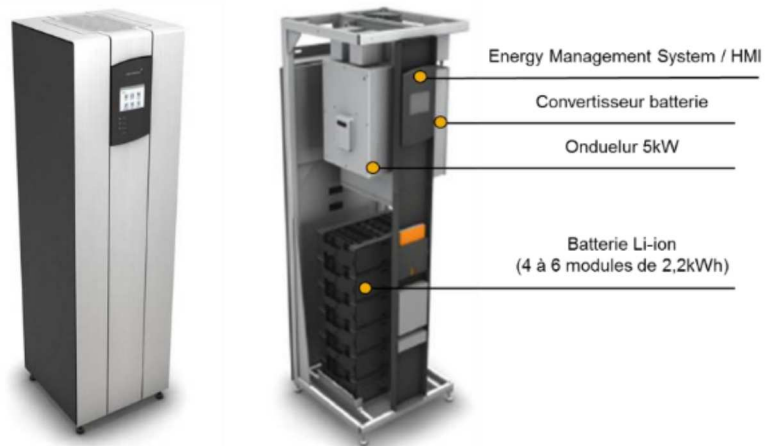
© P.Avavian/CEA

## AUTOCONSOMMATION DU PHOTOVOLTAÏQUE DANS L'HABITAT

Les habitations équipées de panneaux solaires photovoltaïques peuvent consommer directement l'électricité qu'elles produisent et stocker le surplus de la journée dans des batteries. Un système de gestion permet de régulariser l'offre et la demande avec les réseaux de distribution nationaux.

L'autoconsommation dans l'habitat permet :

- d'éviter des investissements lourds dans les réseaux grâce à la consommation locale de l'électricité ;
- de rendre l'approvisionnement en énergie de l'habitat plus fiable en cas de coupure du courant par exemple et de minimiser l'impact de l'habitat sur le réseau lié à la fluctuation de la production.



## PHOTOVOLTAÏQUE GARANTI

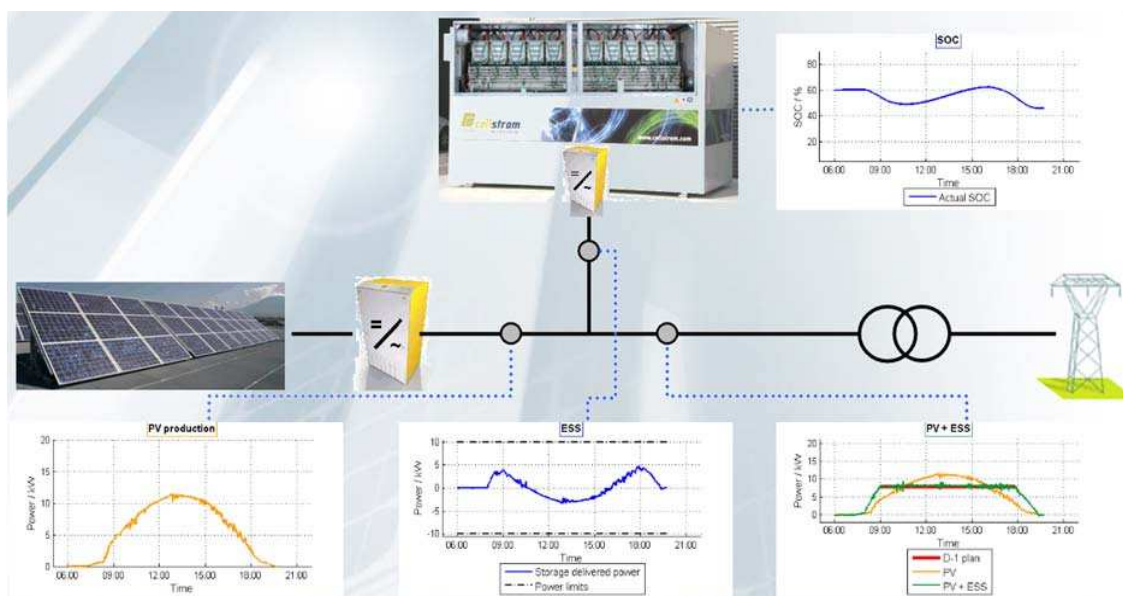
L'énergie photovoltaïque est en partie caractérisée par :

- une faible prédiction,
- une forte variabilité,
- un contrôle difficile de la production d'électricité.

Ce qui a pour conséquence des risques pour les réseaux de distribution et donc une intégration du photovoltaïque complexe. Parmi les recommandations faites par la Commission de régulation de l'énergie (CRE), des technologies doivent être développées pour garantir la sécurité des réseaux, en particulier en assurant une puissance constante délivrée sur une période de la journée définie la veille. Pour résoudre ce problème, il est nécessaire de coupler la production d'électricité photovoltaïque à un système de stockage. Le LSE met au point des systèmes électroniques de gestion de ce couple grâce à des algorithmes qui permettent:

- d'évaluer au mieux le système de stockage à associer à une production photovoltaïque ;
- de simuler en temps réel le système combiné production photovoltaïque et système de stockage.

L'objectif étant de compenser la variabilité au cours de la journée de la production d'électricité photovoltaïque grâce au système de stockage et de proposer une production « lissée » sur la période la plus longue possible. Ce qui permet d'éviter les surcharges et les creux dans le réseau de distribution.



## Stockage thermique

Le stockage thermique peut répondre à plusieurs besoins qui vont du logement d'un particulier aux usages industriels, en passant par le stockage massif associé aux énergies renouvelables. En effet, le stockage de chaleur est un élément particulièrement intéressant en association d'une installation solaire thermodynamique (CST), puisqu'il permet de gérer l'efficacité de la production électrique tout au long de la journée. La production de chaleur en journée peut ainsi être stockée et restituée en fin de journée pour produire de l'électricité.

Cette technologie est aussi très prometteuse pour le stockage massif d'électricité dans une installation CAES ou pour la valorisation énergétique de rejets industriels. Chez le particulier, le stockage thermique se présente déjà depuis longtemps avec les ballons d'eau chaude. L'eau est chauffée au cours des heures creuses et restituée en heure pleine. C'est une technologie très mature. Des innovations existent toutefois pour améliorer les rendements, la durée et l'efficacité de stockage.

Il existe trois phénomènes physiques de stockage de la chaleur :

- 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 chaud couplé à un panneau solaire thermique. C'est aussi tout simplement le cas d'une pierre que l'on poserait près d'une cheminée. Une fois qu'elle a emmagasiné la chaleur elle peut être déplacée et céder sa chaleur.
- Le **stockage de chaleur par changement de phase** grâce à l'utilisation de matériaux dont la chaleur entraîne le passage d'un état solide à un état liquide. Ces matériaux sont dits « à changement de phase ». C'est le cas par exemple de la paraffine dont la température de fusion environne les 70°C. Elle restitue cette chaleur lorsqu'elle repasse à l'état solide.
- Le **stockage de chaleur par réaction chimique**, qui consiste à utiliser la réaction chimique réversible d'un matériau : apport de chaleur dans un sens (endothermique) et dégagement de chaleur dans le sens opposé (exothermique). Parmi les réactifs envisagés, la chaux. La chaleur apportée permet de l'assécher (c'est-à-dire retirer l'eau du mélange). La chaux sèche est ensuite conservée à l'abri de l'humidité. Lorsqu'elle est ré humidifiée, se produit alors un dégagement de chaleur qui peut être utilisé notamment dans l'habitat. La stabilité de ce système peut permettre un stockage saisonnier.

## LES AXES DE RECHERCHE

### Les matériaux

Les travaux de recherche du CEA-Liten sur les matériaux utilisés pour le stockage thermique portent sur la détermination de leurs propriétés physiques thermiques,

sur leur compatibilité avec les fluides caloporteurs et leur tenue dans le temps. Les aspects transfert de chaleur sont également très importants car l'énergie, solaire par exemple, est toujours absorbée par un fluide avant d'être cédée à un solide pour être stockée. Les capacités de stockage ou le temps de réponse du système sont en effet conditionnés par la qualité des échanges thermiques.

## Le stockage massif d'électricité sous forme thermique

### Le procédé de Stockage d'Electricité par Pompage Thermique (SEPT)

Projet ANR Stockage d'Electricité sous forme THERmique à haute température (SEETHER)

La technologie SEPT, en rupture avec les systèmes existants, repose sur un cycle thermodynamique qui consiste à stocker dans deux enceintes, de l'électricité transformée en chaleur. En mode stockage, l'électricité apportée via le réseau permet de faire fonctionner une pompe à chaleur qui va transférer le gaz caloporteur de l'enceinte basse pression vers l'enceinte haute pression en le chauffant. En mode déstockage, le gaz chaud passe au travers d'une turbine, du fait de la différence de pression entre les deux enceintes, qui va restituer de l'électricité.

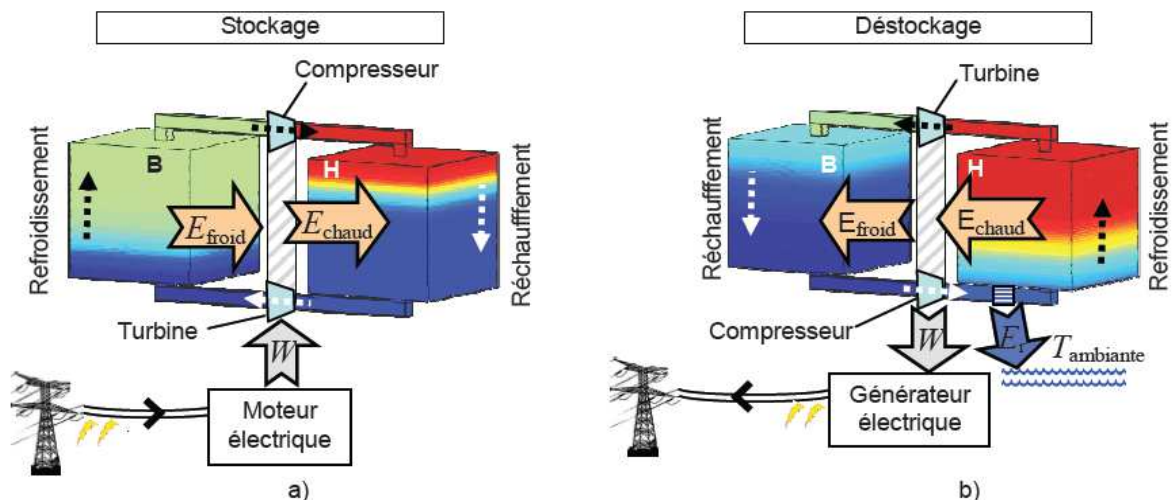


Figure I-12 : Illustration du fonctionnement en stockage et en déstockage.

A la fin des trois ans et demi du projet, les résultats obtenus sont encourageants, prouvant la faisabilité du procédé de stockage. Le projet SETHER a permis de réaliser la modélisation détaillée de l'ensemble du système de stockage, d'avancer sur la définition des matériaux de stockage, entre réfractaires hautes performances et matériaux naturels, et des turbomachines adaptées. Enfin des études technico-économiques de conception industrielle et de valorisation du système ont été effectuées.

Un projet de démonstration à une échelle semi-industrielle (1MW) a été déposé dans le cadre de l'Appel à Manifestation d'Intérêt Stockage de l'ADEME. Cette technologie se pourrait être particulièrement adaptée pour le stockage de grande capacité connecté au réseau, avec une densité de stockage élevée, un très bon rendement, aucune contrainte géographique et un coût de stockage limité.





Le projet SETHER, coordonné par l'opérateur intégré d'électricité et de gaz POWEO, est basé sur un partenariat public-privé associant la société SAIPEM ainsi que le CEA, le Groupe d'Etude des Matériaux Hétérogène (GEMH) à Limoges, l'Office Nationale d'Etudes et de Recherches Aérospatiales (ONERA), le Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM) de Paris et Armines.

### **Le stockage par air comprimé associé à du stockage thermique - CAES adiabatique**

Projet ANR Stockage d'Electricité par Air comprimé avec Récupération de la CHaleur de compression (SEARCH)

Le système de stockage d'électricité par compression de l'air entraîne un dégagement de chaleur important lors de la phase de compression. L'air doit par contre être chauffé avant d'être détendu sinon la température atteinte dans la turbine serait beaucoup trop basse (-100°C). Cette phase de réchauffement de l'air entraîne sur les installations existantes la consommation de gaz et donc des émissions de CO<sub>2</sub>.

Le projet ANR SEARCH, en partenariat avec GDF Suez, Saint Gobain et les Mines de Paris, se déroule sur 4 ans (2009 à 2013) et propose d'associer un système de stockage de chaleur sensible aux stockages par air comprimé classique. L'air, comprimé et chaud, traverse des accumulateurs dans lesquels la chaleur va être stockée. L'air est ensuite transporté et stocké dans des cavernes souterraines. En mode déstockage, l'air froid traverse de nouveau les accumulateurs dans lesquels la chaleur lui est restituée. Il est ensuite directement dirigé vers la turbine pour produire de l'électricité. Ce système de stockage, dit CAES adiabatique, n'émet aucun CO<sub>2</sub>.

Les équipes du CEA travaillent notamment à l'étude des matériaux utilisés pour le stockage thermique. Les enceintes de stockage de chaleur sont remplies de briques en céramique au travers desquelles passe l'air chaud dans un sens, et froid dans l'autre sens.

## LES INSTALLATIONS EXPERIMENTALES AVANT PREINDUSTRIALISATION

Le CEA-Liten dispose de systèmes expérimentaux de stockage de chaleur, depuis l'installation simple pour étudier les phénomènes localement, jusqu'à la boucle de test à échelle semi-industrielle.

Pour le stockage thermique par chaleur sensible, la boucle CLAIRE, dédiée aux hautes températures (supérieures à 500 °C) avec de l'air comme fluide caloporteur, est déjà à échelle semi-industrielle avec des dimensions (10 m<sup>3</sup> de volume de stockage) et des puissances thermiques (1 MW) tout à fait significatives.



©CEA

Pour le stockage thermique dédié aux centrales solaires à concentration de type Fresnel à huile, l'installation STONE permet d'étudier en détail le fonctionnement d'un lit de roche grâce à une instrumentation fine (220 mesures de température pour 3 m<sup>3</sup> de stockage). Une fois chauffée dans la centrale thermique, l'huile circule jusqu'à un réservoir qui contient un lit de roche (cf. photos ci-contre), et chauffe progressivement ces roches de haut en bas. Cette chaleur est restituée lorsque l'huile froide circule de bas en haut. Pour fixer un ordre de grandeur sur une installation industrielle, le volume de stockage devrait varier entre quelques dizaines à quelques centaines de mètres cube. Ce type d'installation est d'ores et déjà envisagé en association d'une centrale thermique à concentration.



©CEA

En ce qui concerne l'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP), le montage expérimental est un tube de 4 centimètres de diamètre et de 40 centimètres de long, transparent. 40 mesures de température sont effectuées le long du tube pour permettre le suivi précis du front de fusion et la validation des simulations. Le tube est rempli de paraffine et traversé par un serpentin de cuivre dans lequel circule de l'eau chaude. Plus l'eau chaude parcourt le tuyau de cuivre (de gauche à droite) plus la paraffine se liquéfie. Les mouvements de convection naturelle conduisent à un début de liquéfaction de la paraffine à l'extrémité opposée de l'arrivée d'eau chaude (voir ci-dessous).



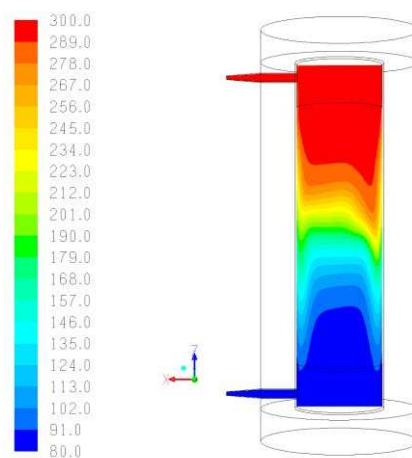
©CEA

MEDIA

## LA SIMULATION

En parallèle aux travaux expérimentaux, le Liten utilise la simulation numérique, tant pour des modèles simples, destinés aux dimensionnements d'installations industrielles, que pour des simulations de phénomène de transfert de chaleur et d'écoulement des fluides. Il est ainsi possible de simuler le stockage thermique :

- dans le lit de roche ;
- de visualiser le « remplissage » en chaleur du réservoir (figure ci-dessous) ;
- de valider par comparaison aux mesures de température de la boucle STONE.



*Simulation de la production du front de chaleur dans un lit de roches ©CEA*

## Stockage hydrogène

Le stockage de l'hydrogène fait également partie des axes de recherche actuels du CEA pour pallier à l'intermittence des énergies renouvelables. Pour ce type d'application, le but est de mettre au point un système très peu cher par rapport au kilogramme d'hydrogène stocké, avec un rendement énergétique élevé. Entre sa production, grâce à l'électrolyse de l'eau, et sa consommation, dans une pile à combustible pour fournir de l'électricité, l'hydrogène peut être stocké sous différentes formes. Les solutions actuelles s'orientent vers un stockage à basse pression afin d'éviter le coût énergétique de compression du gaz, ou vers un stockage solide mettant en œuvre des hydrures.

### LE STOCKAGE SOLIDE DANS DES « HYDRURES », PRIVILEGE POUR LES APPLICATIONS STATIONNAIRES



Un réservoir de stockage d'hydrogène sous forme d'hydrures métalliques de conception Liten.  
© P.Avavian/CEA

Il s'agit d'exploiter la capacité de certains matériaux (dits hydrures) à absorber et désorber de l'hydrogène de manière réversible.

Dans les hydrures métalliques (alliage de nickel, de titane, de magnésium), les atomes du dihydrogène gazeux entrent dans le matériau et forment une nouvelle « phase » de ce matériau.

Les matériaux hydrures se présentent sous forme de poudre, forme vers laquelle les atomes d'hydrogène migrent naturellement. Cela comporte deux avantages :

- l'hydrogène accède au matériau de manière uniforme
- la porosité constitue un tampon qui permet d'encaisser le gonflement de matière lorsque l'hydrogène est absorbé.

Le stockage dans les hydrures est le moyen le plus efficace pour obtenir une forte densité volumique d'énergie : le volume occupé peut se réduire à **0,25 litre/kWh** dans les conditions normales de température et de pression. Ceci se fait par contre au détriment du poids, puisque au bilan il faut ajouter le poids du matériau dans

lequel l'hydrogène s'insère.

### LES PREMIERES DEMONSTRATIONS PRE-INDUSTRIELLES

Sur son centre de Grenoble, le CEA travaille avec la société McPhy Energy afin de concevoir et tester des réservoirs sous forme d'hydrures à visées industrielles. Le principal marché ciblé est celui du stockage d'énergies renouvelables. Les installations du CEA permettent de tester et mesurer les performances des réservoirs en les couplant avec des électrolyseurs (en entrée) ou des piles à combustible (en sortie). Le partenariat avec McPhy porte sur des réservoirs utilisant des hydrures de magnésium, qui réagissent avec l'hydrogène à un peu plus de 300°C pour une pression de 10 bars. Les réservoirs testés jusqu'à présent

se présentent sous forme de cartouches pouvant stocker chacune 4 kg d'hydrogène, soit l'équivalent de 132 kWh. L'hydrogène est relâché sous forme gazeuse en diminuant la pression, avec un rendement de 97%. Le CEA-Liten a testé récemment avec succès une version de 15 kg (500 kWh).



La société McPhy présente une stratégie originale de démonstration des réservoirs à hydrures. En attendant le déploiement de systèmes combinant hydrogène / ENR, l'idée est de rentabiliser ces réservoirs sur des marchés existants. McPhy proposera ainsi aux industriels des dispositifs couplant un électrolyseur basse température avec un réservoir McPhy, dédiés à leurs besoins en hydrogène et implantés sur leurs sites d'activité. Le stockage serait donc assuré par un réservoir à hydrures de 250 kg d'hydrogène, pour un coût de revient de 10€/kg.

Réservoir de stockage de 15kg d'hydrogène de McPhy implanté sur la plateforme de tests du Liten.  
© P.Avavian/CEA

### Le projet de plateforme MYRTE



Plateforme MYRTE à Ajaccio ©Université de Corse

Le CEA a participé, avec Hélion et l'Université de Corse, au développement de la plateforme de R&D MYRTE (*Mission hYdrogène Renouvelable pour l'inTégration au réseau Electrique*) pour l'étude de la production d'électricité photovoltaïque couplée à un système de stockage par le vecteur hydrogène. Ce test « grandeur nature », installé en Corse, est équipé d'une centrale photovoltaïque d'une puissance installée de 560 KWc sur 3 700 m<sup>2</sup>, reliée directement à une chaîne hydrogène, utilisée comme un moyen de stockage.

Le CEA apporte un soutien scientifique au développement de la plateforme par des études spécifiques sur la production photovoltaïque et le stockage de l'hydrogène. Il participe à l'élaboration du programme scientifique et au retour d'expérience sur la centrale photovoltaïque et le stockage de l'énergie.

## RECHERCHE FONDAMENTALE SUR LE STOCKAGE

Plus en amont, le CEA mobilise ses moyens et compétences en recherche fondamentale, notamment au CEA-Iramis (Institut Rayonnement Matière de Saclay) et au CEA-Irfu (Institut de Recherche sur les lois Fondamentales de l'Univers), pour améliorer la compréhension des phénomènes physiques et apporter des innovations de rupture. Ces avancées de la connaissance irriguent les technologies utilisées en R&D appliquée et proposent de nouveaux concepts innovants.

### Accumulateurs Lithium-ion

Des chercheurs du CEA-Iramis travaillent notamment à l'amélioration de la technologie lithium-ion. Ils se penchent sur l'évaluation par faisceau d'ions de la distribution du lithium au sein des différents éléments d'un accumulateur. Ce qui permet d'identifier la localisation et l'importance de l'interface suivant les conditions de réalisation et d'exploitation de l'assemblage. En effet, l'un des enjeux majeurs dans la recherche sur les batteries li-ion concerne le maintien des performances pendant leur période d'utilisation. L'un des facteurs limitant est la constitution d'une interface solide entre les électrodes et l'électrolyte due à une fixation du lithium, réduisant la part de lithium disponible pour les réactions électrochimiques.

D'autres chercheurs travaillent à améliorer les propriétés de conduction des électrolytes cristallins/semi-cristallins à température ambiante. Ils utilisent un matériau de confinement de l'électrolyte constitué de membranes céramiques isolantes dont la porosité est formée de pores cylindriques de diamètres nanométriques. En effet, le confinement nanométrique permet d'abaisser significativement la température de fusion de l'électrolyte, et ainsi d'améliorer la puissance et/ou la vitesse de charge des accumulateurs Lithium-ion.

### Le combustible hydrogène

Une des solutions envisagées pour le stockage de l'énergie solaire consiste à produire de l'hydrogène grâce à la photo-électrolyse de l'eau. Des chercheurs s'intéressent à l'optimisation des électrodes, à base hématite dopée par du titane, habituellement utilisées dans ce mode de production d'hydrogène.

Une autre équipe travaille à la conception et à la fabrication de catalyseurs sans métal noble (le platine étant couramment utilisé) ainsi qu'à la mise au point de membranes innovantes pour les électrolyseurs et les piles à combustible. Ces électrodes à bas coût atteindraient des performances approchant celles du platine dans certaines conditions, sans présenter de sensibilité à ses poisons classiques comme l'oxyde de carbone (CO).



## Thermoélectricité

Des recherches portent également sur les matériaux dits « thermoélectriques », c'est-à-dire dans lesquels se crée une migration d'électrons entre une partie chaude et une partie froide. C'est « l'effet Seebeck », qui permet de transformer de la chaleur en énergie électrique, et se retrouve dans certains matériaux semi-conducteurs. Le but de certains chercheurs est d'envisager de charger un supercondensateur ou une batterie en utilisant une différence de température entre les deux électrodes.

## CONCLUSION

Notre système énergétique a recours, depuis longtemps, au stockage stationnaire de l'énergie, notamment pour gérer des périodes de forte demande au cours de la journée. Dans les années à venir, Le besoin de stockage massif d'énergie va être amplifié par le déploiement des énergies renouvelables, la gestion de leur intermittence (phases jour/nuit, aléas météorologiques...) et pour prévenir les perturbations générées sur les réseaux de distribution par les nouveaux usages. Ainsi, le développement des véhicules électriques devrait également accroître les variations de demande d'électricité au cours de la journée.

Si certaines technologies de stockage sont d'ores et déjà matures et largement utilisées (STEP, ballon d'eau chaude), d'autres sont en cours d'industrialisation et conservent une phase de recherche et développement en vue d'apporter les améliorations nécessaires. Enfin, d'autres pistes ne sont encore qu'à l'étude en laboratoire, c'est le cas notamment du stockage thermo-chimique.

Le foisonnement des technologies présentées dans ce dossier pourrait, à terme, permettre de couvrir la majeure partie des besoins identifiés d'un mix énergétique intégrant une part importante d'énergies renouvelables. Mais les coûts de la plupart de ces technologies constituent à ce jour un frein à leur développement à un stade industriel. Une part importante des recherches du CEA vise donc à réduire les coûts de ces technologies ou à rendre ces dernières plus « polyvalentes ». En effet, l'intérêt économique d'un système de stockage augmente si son utilisation répond à plusieurs besoins : par exemple intégration

### Répartition des technologies de stockage, par fonctionnalité

	mécanique	électro-chimique	chimique (H2)	thermique	magnétique
<b>Secours</b>		Batteries			
<b>Qualité courant</b>	Volant inertie	Batteries Super capas			SMES
<b>Lissage des pointes de demande</b>	STEP CAES	Redox flow Bat. Zn		Chaleur sensible Chaleur latente	
<b>Lissage production intermittente (éolien, PV)</b>		Zebra Li ion Redox flow	H2		
<b>Stockage local Bâtiment, Quartier</b>		Bat. Pb, Li-ion Redox flow		Chauffe eau Thermo-chimique	





des ENR (lissage production intermittente) et soutien à la qualité du réseau (adaptation tension/fréquence).

Le contexte économique contraint ne favorise pas le développement rapide des systèmes de stockage massif de l'énergie. Ainsi, le prix d'achat des combustibles fossiles les rend encore attractifs pour répondre aux demandes d'énergie en période de pointe. S'il existe encore des verrous technologiques importants à lever pour rendre ces technologies plus faciles à industrialiser, les paramètres économiques nécessitent également d'être étudiés. La mise en place de systèmes de régulation, de réglementations incitatives et l'invention de nouveaux modèles de valorisation du stockage pourraient s'avérer également plus déterminants.