

## Stockage de l'énergie

### Ed01

---

Le stockage d'énergie joue un rôle clé dans la transition énergétique et l'optimisation de la consommation d'énergie en général. Il s'agit de stocker de l'énergie sous une forme quelconque (électricité, chaleur, etc.) pour une utilisation ultérieure. Voici ses principaux avantages :

- **Gestion de l'intermittence des énergies renouvelables** : les sources d'énergie comme le solaire et l'éolien ne produisent pas continuellement. Le stockage permet de pallier ce manque en conservant l'énergie produite pendant les pics de production pour l'utiliser plus tard lors des périodes de moindre production.
- **Sécurisation de l'approvisionnement** : le stockage aide à répondre aux pics de consommation et évite le recours aux centrales thermiques polluantes. Il renforce également la sécurité du réseau électrique en cas de coupure.
- **Optimisation du réseau électrique** : stocker l'énergie permet de réduire les pertes sur le réseau et d'améliorer son efficacité globale.
- **Autoconsommation** : le stockage permet aux particuliers et aux entreprises qui produisent leur propre énergie renouvelable (panneaux solaires par exemple) de l'autoconsommer plus facilement.

## 1 – Notion d'énergie

Le mot « **énergie** » vient du Grec Ancien « **énérgéia** », qui signifie « La force en action ». Ce concept scientifique est apparu avec Aristote et a fortement évolué au cours du temps. Aujourd'hui, l'énergie désigne « la capacité à effectuer des transformations ». Par exemple, l'énergie c'est ce qui permet de fournir du travail, de produire un mouvement, de modifier la température ou de changer l'état de la matière. Toute action humaine requiert de l'énergie : le fait de se déplacer, de se chauffer, de fabriquer des objets et même de vivre.

### 1 – 1 – Formes d'énergies libres

#### 1 – 1 – 1 – L'énergie de gravitation

**L'énergie de gravitation** naît de l'attraction directe et réciproque entre deux corps massifs. Elle est négligeable pour de petits objets entre eux mais devient majeure à une plus grande échelle. C'est elle qui met en mouvement vers le sol un objet rendu libre ou qui génère le mouvement des planètes autour du Soleil. Elle est utilisée par exemple dans des barrages hydrauliques où, en faisant s'écouler de l'eau dans des canalisations, elle permet de mettre en mouvement des turbines.

#### 1 – 1 – 2 - L'énergie cinétique dont l'énergie éolienne

**L'énergie cinétique** naît du mouvement d'un corps massif. C'est elle qui caractérise l'énergie d'une voiture lancée sur la route ou celle du vent. Elle est omniprésente dans ses effets microscopiques car ce sont les énergies cinétiques des molécules et atomes d'un corps qui déterminent son niveau de température. La température est ainsi une

mesure indirecte du degré d'agitation des particules. L'énergie cinétique permet de mettre en mouvement les pales des éoliennes qui elles-mêmes actionnent des générateurs d'électricité.

### **1 – 1 – 3 - L'énergie thermique ou calorique**

**L'énergie thermique** naît de la température d'un corps qui, selon les cas, peut diffuser de la chaleur pour des cuissons, pour accélérer des réactions chimiques mais aussi pour générer des mouvements. Cette génération de mouvement n'est possible que si la température d'un corps peut être confrontée à la température d'un corps plus froid. Cette loi physique a été précisée dans le deuxième principe de la thermodynamique. L'énergie thermique a eu un rôle essentiel dans la révolution industrielle permettant notamment la production d'acier et la mise en mouvement des locomotives à vapeur. Elle actionne aujourd'hui les turbines et alternateurs générant de l'électricité. La géothermie, chaleur provenant du globe terrestre, est un cas particulier de l'énergie thermique.

### **1 – 1 – 4 - L'énergie radiative dont l'énergie solaire**

**L'énergie radiative** naît des rayonnements reçus. Ceux-ci sont, suivant leur longueur d'onde, de natures différentes (ondes radio, lumière visible, rayons Ultra-Violets, rayons X, etc.) mais ont en commun de pouvoir se déplacer même dans le vide et ceci à la vitesse de la lumière. C'est l'énergie radiative qui permet à une ampoule électrique d'éclairer, à un four à micro-ondes de cuire les aliments, à un radar de mesurer une vitesse.

Le Soleil est une source importante de radiation reçue sur Terre. Il nous envoie un niveau important d'énergie par petits paquets dits photons, présentant des longueurs d'ondes différentes. C'est cette énergie qui est récupérée directement en électricité dans les centrales photovoltaïques, ou encore en chaleur, qui peut ultérieurement être transformée en électricité dans les centrales thermodynamiques.

### **1 – 1 – 5 - L'énergie chimique dont les énergies fossiles**

**L'énergie chimique** naît des forces de liaison regroupant des atomes dans une molécule. Dans des réactions chimiques où se reconstituent de nouvelles molécules fréquemment plus stables chimiquement que les molécules initiales, se dégage une quantité de chaleur. C'est elle qui est utilisée dans un accumulateur ou une pile électrique en libérant de l'énergie récupérée en mouvement d'électrons, c'est-à-dire en électricité.

C'est elle qui est libérée dans la combustion d'une bûche par exemple dans un foyer. Les énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon) sont une forme particulière d'énergie chimique. L'énergie issue de la biomasse est également d'origine chimique.

### **1 – 1 -6 - L'énergie nucléaire**

**L'énergie nucléaire** naît de l'utilisation des forces de liaison des protons et des neutrons au sein du noyau des atomes. En transformant par fission des atomes lourds tels que l'uranium 235 ou par fusion des atomes légers tels que les isotopes d'hydrogène, une réaction nucléaire libère de la chaleur, des neutrons, des rayons alpha,

beta, gamma... La chaleur de fission est utilisée dans les centrales nucléaires pour actionner les générateurs d'électricité au travers de fluides caloporteurs

## 1 – 1 – 7 -L'électricité

**L'électricité** naît du déplacement des électrons dans un conducteur. Sa production est issue de la consommation d'autres formes d'énergie. C'est elle qui actionne les moteurs électriques, fait fonctionner les circuits électroniques intégrés et les différents types d'éclairage. Elle se caractérise par une grande facilité de distribution mais présente une difficulté de stockage. Ses usages ne cessent de croître.

## 1 – 2 - Classification

### 1 – 2 – 1 - L'énergie primaire et l'énergie finale

**L'énergie primaire** désigne l'énergie des différentes sources disponibles dans la nature avant transformation. Elle englobe notamment l'énergie du vent, du soleil, de la chaleur terrestre, de l'eau stockée dans un barrage, des combustibles renouvelables ou fossiles. Il est souvent fait référence à l'énergie primaire dans les grands bilans statistiques (comme le Statistical Review of World Energy ci-après), les différentes consommations étant ramenées en énergie primaire avec des taux de conversion.

**L'énergie finale** désigne l'énergie livrée au consommateur final pour satisfaire ses besoins (carburants à la pompe, électricité chez soi, etc.) après transformations par l'homme. Entre l'énergie primaire et l'énergie finale fournie aux consommateurs, il s'opère des pertes lors d'opérations de transformation (ex : chaleur nucléaire en électricité, raffinage) et de transport (ex : pertes par effet Joule, transport des hydrocarbures)

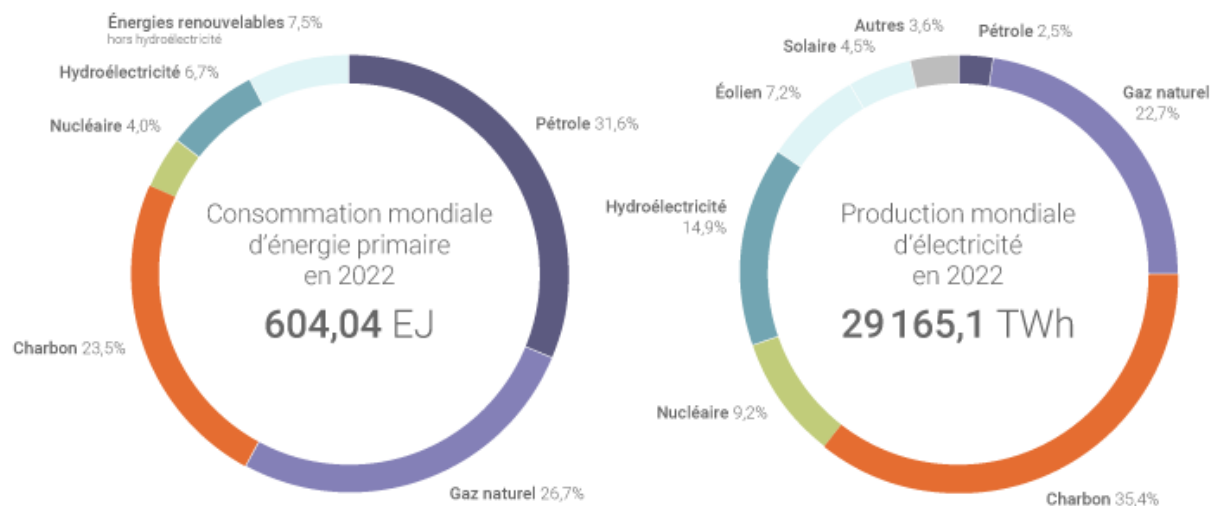
### Énergies fossiles

Dans les énergies non renouvelables, on trouve les énergies dites fossiles : ce sont les résidus des matières végétales et organiques accumulés sous terre pendant des centaines de millions d'années. Ces résidus se transforment en hydrocarbure (pétrole, gaz naturel et de schiste, charbon...). Pour pouvoir les exploiter, il faut puiser dans ces ressources qui ne sont pas illimitées, c'est pourquoi les énergies fossiles ne sont pas renouvelables.

### Énergie nucléaire

L'énergie nucléaire est « localisée » dans le noyau des atomes. Dans les centrales nucléaires actuelles, on utilise la fission (cassure) des noyaux d'uranium, élément que l'on retrouve sur Terre dans les mines. Les mines d'uranium s'épuiseront un jour tout comme le charbon, le gaz et le pétrole.

## Monde La consommation d'énergie totale et la production d'électricité en 2022



Connaissance des Énergies | Source : Statistical Review of World Energy, juin 2023

### 1 – 3 – 2 Énergie secondaire

On appelle « énergie secondaire » une énergie qui est obtenue par la transformation d'une énergie primaire.

Par exemple, l'électricité est une énergie secondaire qu'on obtient à partir de plusieurs énergies primaires : l'énergie solaire avec des panneaux, l'énergie nucléaire avec des réacteurs, l'énergie hydraulique avec des barrages ou encore l'énergie du vent avec des éoliennes. Il n'existe pas d'électricité à l'état naturel.

L'essence, le gasoil et les biocarburants sont également des énergies secondaires ; on les obtient par la transformation du pétrole, qui lui, est brut ou de la biomasse. L'hydrogène, qui n'existe pas à l'état pur, est également une énergie chimique secondaire car il faut le produire.

### 1 – 2 – 3 -Les énergies renouvelables (ou non renouvelables)

**Les sources d'énergie** sont fréquemment classées en deux catégories : renouvelable et non renouvelable. Le terme renouvelable n'est d'ailleurs pas à prendre au sens propre, il conviendrait de dire « renouvelable à l'échelle humaine » puisque le Soleil qui en est le moteur essentiel direct ou indirect a une durée de vie limitée. Dans la première figurent les énergies solaires (énergies radiatives), les énergies éoliennes (énergies cinétiques), la biomasse (énergies chimiques), les énergies hydrauliques (énergies cinétiques).

Dans la seconde, les énergies fossiles (énergies chimiques) et nucléaires sont répertoriées. Au sens strict, les énergies fossile et nucléaire pourraient être aussi considérées comme renouvelables mais sur des périodes trop longues pour être prises en compte à l'échelle humaine.

- **Le soleil, le vent, l'eau, la biomasse et la géothermie** sont des sources qui ne s'épuisent pas et sont renouvelées en permanence.
- **Biomasse et géothermie** : quelles différences ?

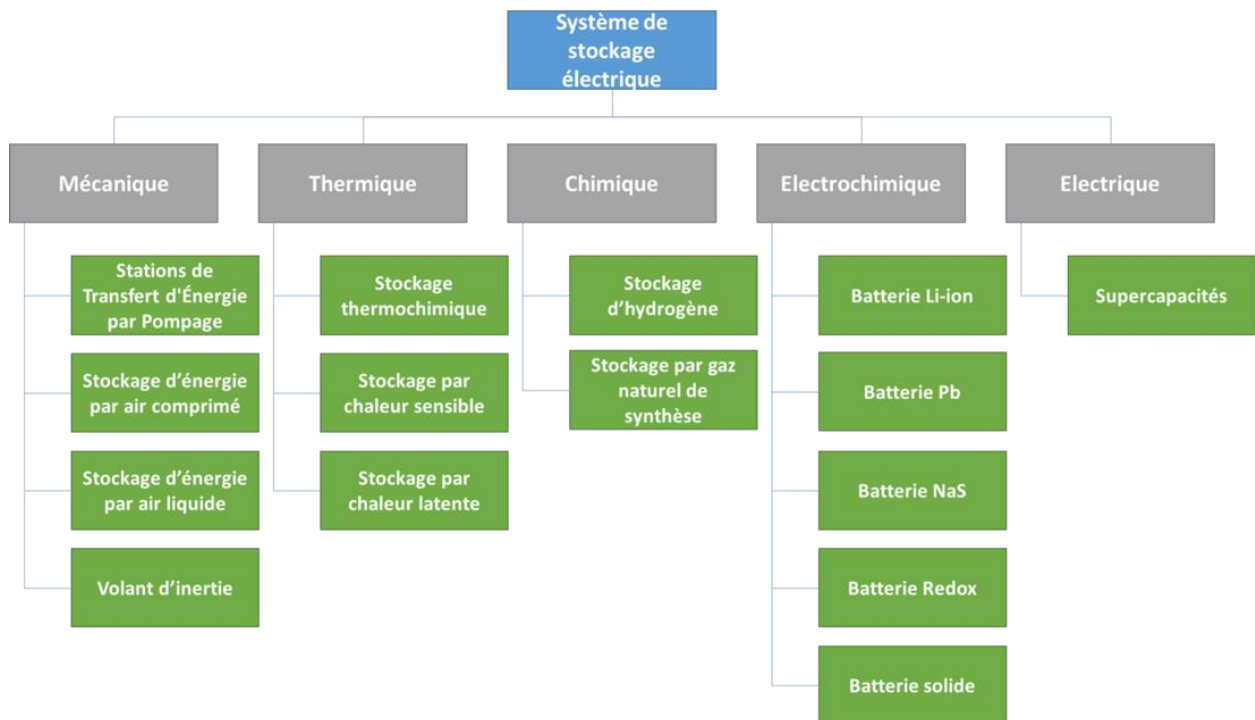
La biomasse et la géothermie sont deux sources d'énergies bien distinctes.

- **La géothermie** est l'énergie générée par la chaleur des profondeurs de la Terre et sa radioactivité. Le mot « géothermie » vient du grec « geo » (la terre) et « thermos » (la chaleur). On l'exploite pour chauffer des habitations grâce à des forages légers.
- **La biomasse** a, quant à elle, pour source le Soleil dont l'énergie de rayonnement est transformée en énergie chimique par les matières organiques d'origine végétale (bois), animale, bactérienne ou fongique (champignons). Il existe des centrales « biomasse » qui produisent de l'électricité avec la combustion de matières organiques.

## – 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, volants d'inertie),
- électrochimique (piles, batteries, vecteur hydrogène),
- électromagnétique (bobines supraconductrices, supercapacités),
- thermique (chaleur latente ou sensible).

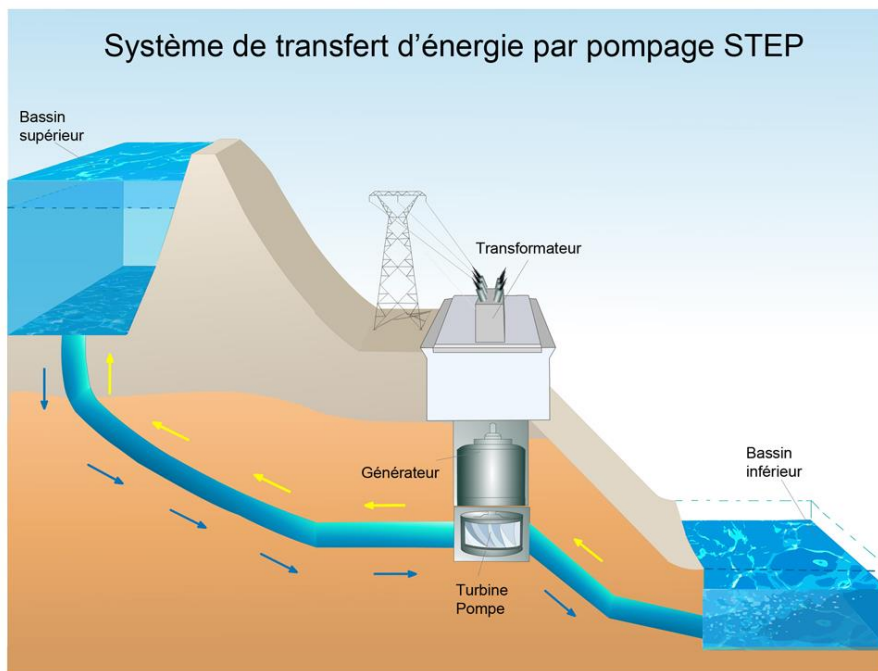


### – 1 - Stockage mécanique

#### 2 -1 -1. Station de pompage

Les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) sont des technologies de stockage par gravitation. Elles sont composées de deux retenues d'eau à des hauteurs différentes reliées par un système de canalisations. Elles sont équipées d'un système de pompage permettant de transférer l'eau du bassin inférieur vers le bassin supérieur en

heures creuses. En heures pleines, la station fonctionne comme une centrale hydroélectrique classique



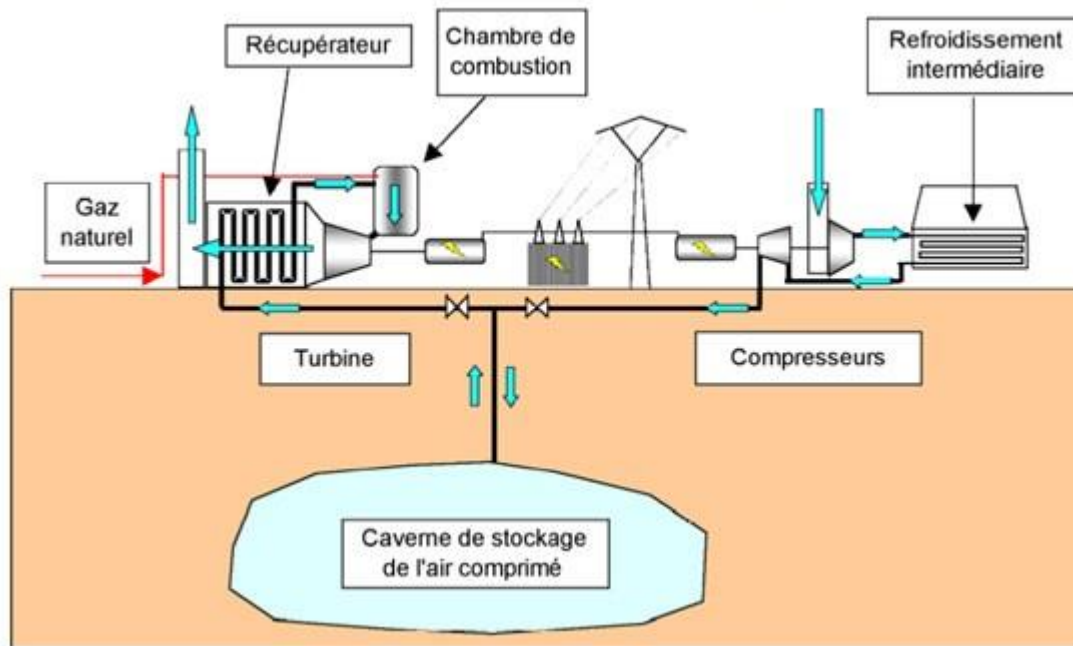
La taille importante des installations permet de stocker de grandes quantités d'énergie, suivant la taille des réservoirs, et d'importantes capacités de puissance mobilisables en quelques minutes, de quelques dizaines de mégawatts à plusieurs gigawatts en fonction de la hauteur d'eau.

Les STEP peuvent également être installées en **façade maritime**, avec la mer comme retenue inférieure et une retenue amont au sommet d'une falaise ou constituée par une digue. Il existe aujourd'hui une STEP marine à Okinawa au Japon et, en France, EDF SEI a des projets à La Réunion, la Guadeloupe et en Martinique.

## 2 -1 – 2- Stockage d'énergie par air comprimé

Les installations de stockage d'énergie par air comprimé (Compressed Air Energy Storage - CAES) de grande puissance consistent, en utilisant l'électricité disponible à bas coût en période de faible consommation, à stocker de l'air dans des cavités souterraines (ancienne mine de sel ou caverne de stockage de gaz naturel) grâce à un compresseur. Au moment de la pointe de consommation, cet air comprimé est libéré pour faire tourner des turbines qui produisent ainsi de l'électricité.

### Schéma de principe d'une installation de stockage à air comprimé



Le rendement des CAES est malheureusement réduit car la compression de l'air s'accompagne d'un échauffement. Afin d'en améliorer la performance, des systèmes de stockage thermique sont en cours de développement afin de récupérer la chaleur (stockage adiabatique).

Des projets industriels sont en cours d'étude au Royaume-Uni en vue d'une intégration sur les réseaux.

## 3. Stockage inertiel

Longtemps utilisé pour la régulation des machines à vapeur, le principe du volant d'inertie permet aujourd'hui de stocker temporairement l'énergie sous forme de rotation mécanique. Un volant d'inertie est constitué d'une masse (anneau ou tube) en fibre de carbone entraînée par un moteur électrique.

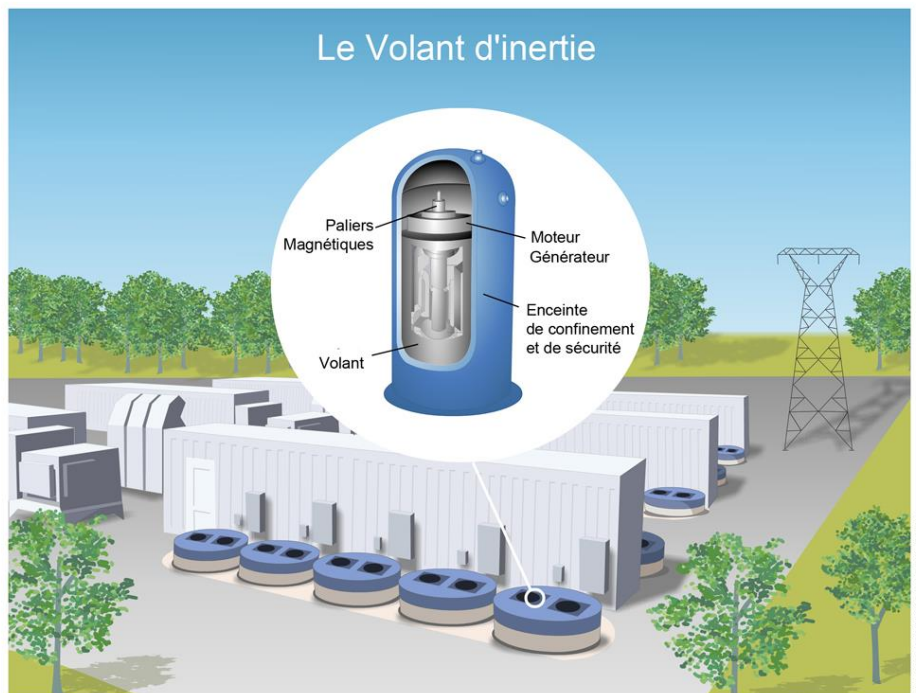
L'apport d'énergie électrique permet de faire tourner la masse à des vitesses très élevées (entre 8 000 et 16 000 tour/min) en quelques minutes. Une fois lancée, la masse continue à tourner, même si plus aucun courant ne l'alimente.

L'électricité est donc stockée dans le volant d'inertie sous forme d'énergie cinétique. Elle pourra être restituée en utilisant un moteur comme génératrice électrique, entraînant la baisse progressive de la vitesse de rotation du volant d'inertie.

Les systèmes de stockage par volant d'inertie ont une très forte réactivité et une grande longévité. En effet, ce système peut absorber de très fortes variations de puissance sur de très grands nombres de cycles. Cependant, les volants d'inertie subissent des pertes de charge en raison de phénomènes d'autodécharge et ne permettent pas d'obtenir une durée d'autonomie importante. Ces systèmes sont donc adaptés pour des applications de régulation,



d'optimisation énergétique d'un système et d'amélioration de qualité (microcoupures, coupures brèves, etc.).



## 2 - 4 -. Stockage électrochimique

### 2- .4 - 1. Stockage d'énergie grâce à l'hydrogène

Les systèmes de stockage d'énergie grâce à l'hydrogène utilisent un électrolyseur intermittent. Pendant les périodes de faible consommation d'électricité, l'électrolyseur utilise de l'électricité pour décomposer de l'eau en oxygène et en hydrogène, selon l'équation  $2 \text{H}_2\text{O} = 2\text{H}_2 + \text{O}_2$ .

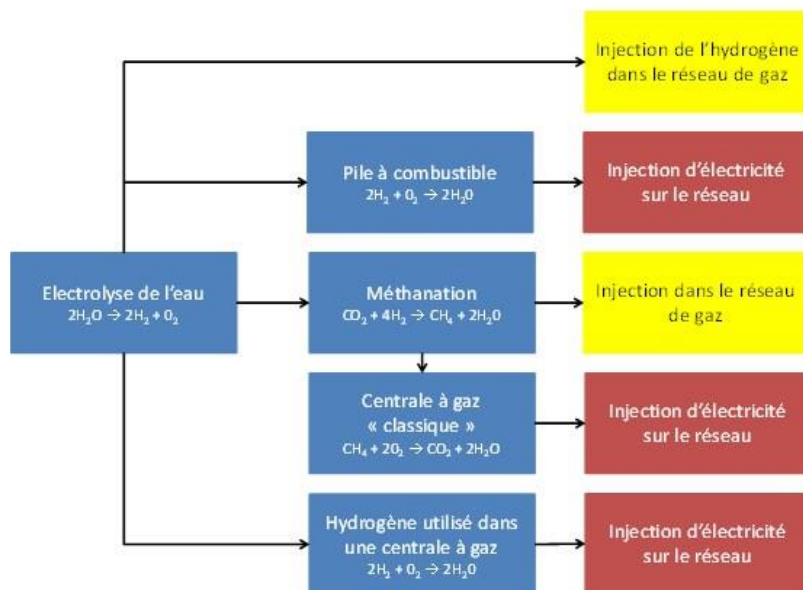
Cet hydrogène est ensuite comprimé, liquéfié ou stocké sous forme d'hydrure métallique.

Ensuite, il existe trois moyens différents pour réinjecter de l'électricité sur le réseau à partir de l'hydrogène stocké :

- le premier consiste à alimenter une pile à combustible ;
- le deuxième consiste à synthétiser du gaz naturel selon le procédé de la méthanation. Ce gaz peut être injecté directement dans le réseau de gaz existant ou être utilisé pour alimenter une centrale à gaz « classique », produisant de l'électricité ;
- le troisième consiste à utiliser l'hydrogène directement dans une centrale à gaz spécialement conçue à cet effet, afin de fabriquer de l'électricité.



### Les différentes possibilités de stockage de l'énergie grâce à l'hydrogène



L'intérêt de ce type de système réside :

dans la grande flexibilité d'usage du vecteur d'hydrogène, qui a pour particularité d'être facilement stocké et transporté, que ce soit sous forme liquide ou gazeuse ;

et dans le découplage énergie-puissance : en effet, la capacité de puissance en absorption ou en production est dimensionnée par l'électrolyseur ou la pile à combustible. La capacité en énergie est dimensionnée par la taille des réservoirs et peut aller de plusieurs heures à plusieurs jours en fonction de l'application du système (secours, décalage de consommation).

Pendant leur utilisation, les électrolyseurs et les piles à combustible dégagent de la chaleur (entre 20 et 50 % de l'énergie du système selon la technologie), dont la valorisation améliore la rentabilité économique du système. Cette technologie est aujourd'hui au stade du démonstrateur. Le projet de PPE (janvier 2020) prévoit entre 1 à 10 MW de Power-to-gas à l'horizon 2023.

## 2 - 4 - 2 . Batteries électrochimiques

Les batteries électrochimiques sont conçues par empilement de disques composés de différents types d'éléments chimiques. Il existe ainsi des batteries plomb-acide, nickel-cadmium, nickel-hydrure métallique, lithium-ion, lithium-polymère, lithium-air, sodium-soufre, chlorure de sodium (zebra), etc

	Pb	Ni-Cd	Ni-Mh	Ni-Zn	Zebra	LMP	Li-ion	Li-Po	LiFePo4
Wh/kg	40	60	90	80	120	110	150	190	110
Durée de vie	500	2000	1500	nc	nc	1800	1000	2000	2000

(cycles)

L'empilement est ensuite relié à un système d'électronique de puissance qui, lors de la décharge, convertit le courant continu des batteries en courant alternatif à la tension, la fréquence et la puissance voulues. Ce système est aussi utilisé dans le sens inverse pour recharger les batteries.

**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), recombinaison des 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>- Durée de vie, cyclage (selon la nature chimique choisie)</li> <li>- Faible impact environnemental</li> <li>- Sécurité</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- sécurité</li> <li>- besoin d'une régulation thermique</li> <li>- coût</li> </ul>	

Dans les systèmes de stockage par batteries électrochimiques, les assemblages de batteries sont conçus pour fournir la puissance et la capacité en fonction des usages (par exemple stabilisation des réseaux, alimentation de secours). La capacité de stockage de puissance et d'énergie varie en fonction des technologies. Les principaux avantages des batteries sont leur flexibilité de dimensionnement et leur réactivité. Ces technologies sont désormais matures et font l'objet de déploiement en France et dans le monde. Mi 2022 en France, on dénombrait 400 MW de batteries raccordés au réseau et plus de 300 MW en file d'attente.

## 2 – 4 -2 - 1- Batteries lithium-ion

Le fonctionnement de la batterie **lithium-ion**, actuel standard du marché, repose sur l'échange réversible de l'ion lithium entre une électrode positive et une électrode négative. Ces batteries équipent déjà plusieurs millions de véhicules électriques et hybrides rechargeables.

La R&D s'intensifie sur des batteries Li-ion stationnaires disposant d'une capacité compatible avec le stockage temporaire d'énergie renouvelable

## 2 – 4 – 2 - 2 - Batteries sodium pour stockage stationnaire

La R&D dans ce domaine est aujourd'hui en plein essor et les installations se multiplient, en particulier sur les systèmes sodium-soufre adaptés au stockage

stationnaire. Dotées d'une grande capacité énergétique et d'un excellent rendement, ces batteries fonctionnent à ce jour à haute température (de l'ordre de 300 °C) ce qui pose des problèmes, notamment de durée de vie.

### 2 – 4 – 2- 3 - Batteries sodium-ion

Encore à l'état de prototype, ce type de batterie se rapproche de la batterie li-ion. Son principe est le même, mais ses composés diffèrent : au lieu du lithium, on utilise du sodium, mille fois plus abondant sur terre et donc nettement moins cher. Elle reste néanmoins moins énergétique que la batterie au lithium, mais paraît bien adaptée au stockage stationnaire.

### 2- .4 –2 - 4 . Batteries à circulation (redox flow battery)

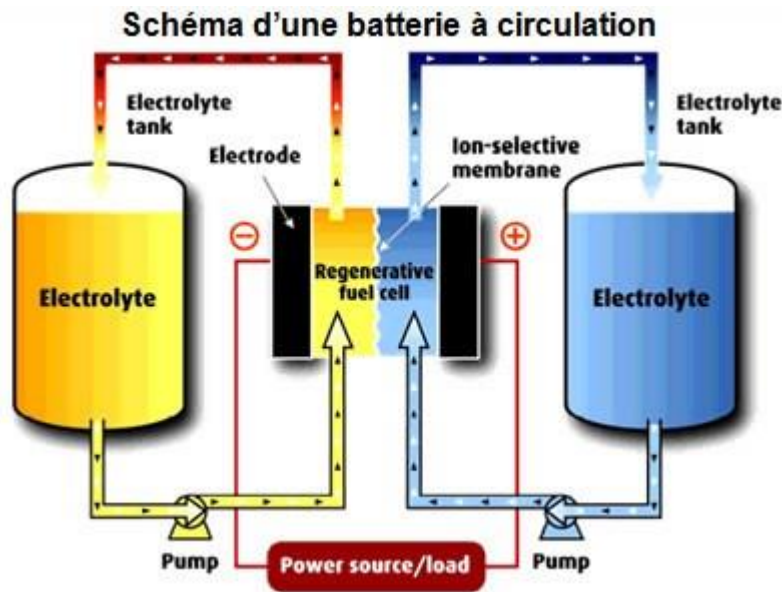
Dans les systèmes de stockage par batteries à circulation, deux électrolytes liquides contenant des ions métalliques (couples d'ions métalliques zinc/brome, polybromure/ polysulfure de sodium et vanadium/vanadium), séparés par une membrane échangeuse de protons, circulent à travers des électrodes. L'échange de charges permet de produire ou d'absorber l'électricité.

La puissance produite ou absorbée est dépendante du dimensionnement de la membrane d'échange et des électrodes, tandis que l'énergie stockée est dépendante du volume des électrolytes. A ce jour, seuls des projets expérimentaux sont en cours de développement.

Puissance Cible	Rendement	durée de vie (ans=	cout d'investissement (€/Kw)
Qq MW	0,65 – 0,75	15-20	1000-3000 100-400

Données Ademe

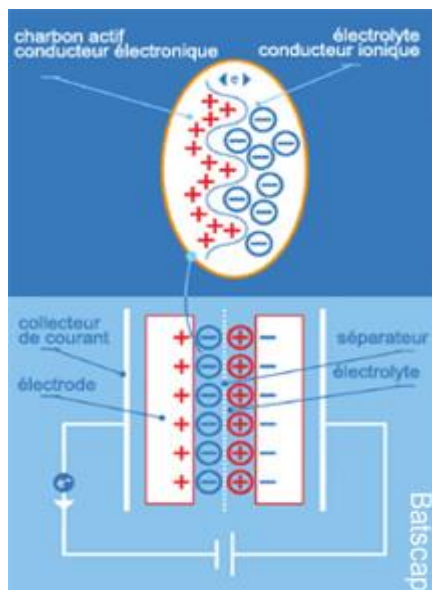
Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Haute modularité</li> <li>- Large plage des ratios</li> <li>- Puissance/Energie</li> <li>- Durée de vie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Architecture compliquée (surtout avec 2 cuves)</li> <li>- Risque de fuite de l'électrolyte</li> <li>- Faible densité énergétique</li> </ul>



## 2 – 5 . Stockage électromagnétique

Le principe des supercapacités repose sur la création d'une double couche électrochimique par l'accumulation de charges électriques à l'interface entre une solution ionique (électrolyte) et un conducteur électronique (électrode). A la différence des batteries, il n'y a pas de réaction d'oxydo-réduction.

L'interface entre les charges joue le rôle d'un diélectrique. L'électrode contient du charbon actif de surface spécifique très élevée. La combinaison d'une surface conductrice élevée et d'une épaisseur de diélectrique très faible permet d'atteindre des valeurs de capacité extrêmement élevées en comparaison des condensateurs traditionnels. L'électrolyte limite la tension des éléments à quelques volts. Ces dispositifs de stockage sont utilisés dans certaines installations électriques afin d'améliorer la qualité. Cependant, son développement ne se fait pas à grande échelle.

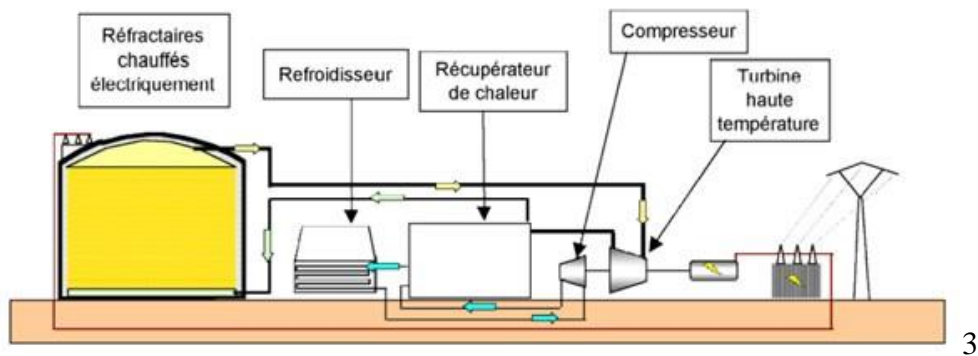


## 2 – 6 - Stockage thermique (chaleur et froid)

Les installations de stockage thermique (chaleur et froid) concernent majoritairement les marchés industriels et tertiaires avec des réalisations de l'ordre de 1 à 10 MW, les réseaux de chaleur, et, dans un autre contexte, des volumes unitaires bien moindres mais à bien plus grande échelle, le marché résidentiel par le biais des ballons d'eau chaude sanitaire (ECS). Ces installations ont un potentiel important en termes de compétitivité pour les activités tertiaires et industrielles et en matière d'impact sur la demande en électricité à la pointe. En effet, en stockant la chaleur ou le froid en période de faible demande d'électricité, le potentiel de décalage des appels de puissance est important. Sur les réseaux de chaleur, le stockage de chaleur permet d'optimiser le dimensionnement des installations, notamment dans le cadre d'extension de réseaux existants.

Le stockage de chaleur dans les ballons d'eau chaude sanitaire mobilise aujourd'hui un parc de plusieurs millions d'installations, ce qui représente un appel de puissance de plusieurs gigawatts. Cet appel de puissance est prédictible et commandable, ce qui permet de le décaler de manière programmée et à des heures auxquelles le réseau électrique n'est pas en situation contrainte.

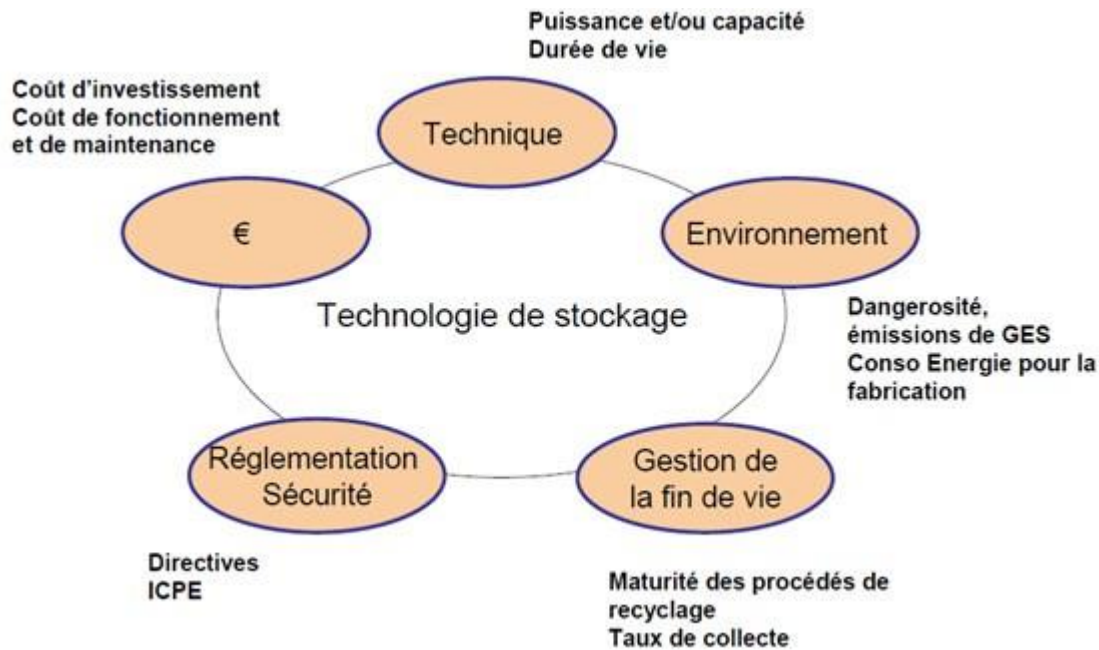
**Schéma d'une installation de stockage thermique**



3

### 3 - Comparaison des différentes technologies de stockage

Les technologies de stockage existantes sont nombreuses et d'autres, encore au stade de la recherche ou de l'expérimentation, se développent. Leur intégration dans les systèmes électriques soulève des interrogations quant au choix de la technologie la plus adaptée aux besoins. En effet, chaque technologie a ses spécificités en termes de taille, de puissance délivrée, de coût, de nombre de cycles et donc de durée de vie, de densité énergétique, de maturité technologique, etc.



Axes de comparaison des différentes technologies de stockage Source : CEA Liten

Ainsi, pour comparer les technologies de stockage et choisir le procédé et le dimensionnement d'un usage particulier, plusieurs facteurs techniques doivent être pris en compte, selon les services que devra précisément rendre l'installation de stockage et en fonction du contexte économique.

- En premier lieu, il s'agit de déterminer la localisation et le volume du stockage nécessaire. Faut-il une technologie de stockage diffus (intégration de nombreuses unités de stockage de petite taille sur le réseau de distribution au niveau de la production décentralisée et au plus près de la consommation, dimensionné pour une maison ou un groupe de maisons)
- une technologie de stockage centralisée (quelques unités de stockage de grande dimension type STEP, au niveau des réseaux de transport) ?

Ensuite, différents critères peuvent être utilisés pour choisir la bonne technologie de stockage :

- **la puissance disponible** et la capacité énergétique. La combinaison de ces deux critères permet de définir le ratio énergie/puissance correspondant au temps de décharge réalisable, souvent caractéristique d'une application particulière ;
- **le temps de réaction** est un indicateur de la réactivité du moyen de stockage. Il est parfois préférable de définir la vitesse de montée et de descente en charge qui caractérise de manière plus fine le comportement réactif du système ;
- **l'efficacité**, définie comme rapport entre l'énergie stockée et l'énergie restituée (en MWhOUT/MWhIN) ;
- la durée de vie, qu'il est parfois préférable de définir en nombre de cycles de charge/décharge admissibles pour des technologies comme les batteries ;



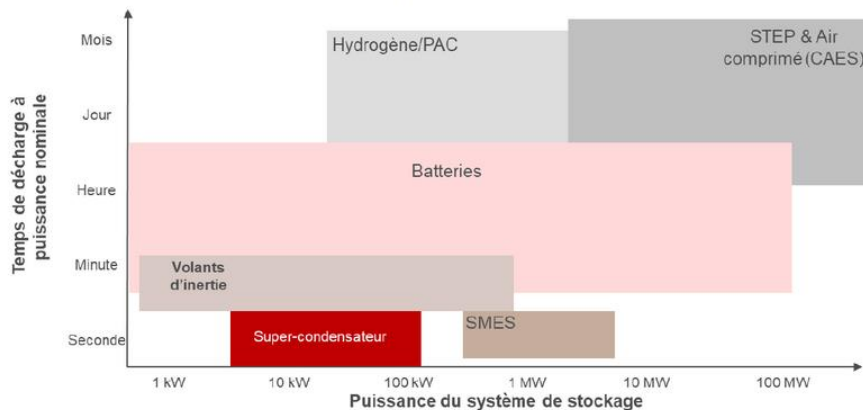
pour d'autres usages, d'autres critères sont à prendre en compte, comme

- **la densité énergétique** (en MWh/kg ou en MWh/m<sup>3</sup>) pour la mobilité par exemple.

D'autres critères sont également à prendre en compte tels que

- les coûts d'investissement et d'exploitation, les performances et contraintes environnementales
- la localisation géographique optimisée pour limiter les pertes induites par l'acheminement de l'électricité. Certaines fois, l'optimum peut même résider dans l'association de plusieurs technologies.

Figure 8 : Caractéristique temps de décharge / puissance de différentes technologies de stockage



Source : Analyses E-CUBE Strategy Consultants

## - Transition énergétique dans les ZNI

Certains territoires ne sont pas connectés au réseau d'électricité continental (ou de façon limitée dans le cas de la Corse) et voient leur approvisionnement en électricité spécifiquement contraint : on les regroupe sous le nom de **zones non interconnectées (ZNI)**.

Ces zones regroupent notamment :

- les départements et régions d'outre-mer (Guadeloupe, Guyane, Martinique, La Réunion, Mayotte) ;
- les collectivités territoriales à statut particulier (Corse) ;
- certaines collectivités d'outre-mer (Saint-Martin, Saint-Barthélemy, Saint-Pierre-et-Miquelon, Wallis et Futuna, Mayotte) ;
- les îles du Ponant (les îles de Sein, Molène, Ouessant et Chausey).
- La Nouvelle-Calédonie et la Polynésie française ont des statuts particuliers et ne sont pas considérées comme des ZNI.

### 4 – 1 -Des spécificités énergétiques, un traitement particulier

#### 4 – 1 – 1 -Des coûts de production élevés

Les caractéristiques climatiques et géographiques des ZNI ainsi que la petite taille de leurs systèmes électriques créent de fortes contraintes pour le mix énergétique, la gestion du réseau électrique et l'approvisionnement.

Elles justifient de recourir à des solutions technologiques adaptées et entraînent des coûts de production de l'électricité plus élevés qu'en métropole : ils atteignent 326 €/MWh en

moyenne en 2022 d'après le graphique ci-dessous (et s'élevaient en moyenne à 271€/MWh en 2021).

Ces coûts varient fortement d'un territoire à l'autre selon les caractéristiques du parc de production et du réseau et d'une année sur l'autre en fonction notamment des prix du fioul, ces territoires étant encore fortement carbonés. Cette corrélation tend toutefois à diminuer avec la décarbonation de leurs mix électriques.

#### **4 – 1 – 2 - Un cadre réglementaire particulier**

Les dispositions européennes du Troisième paquet énergie de 2009 ont établi un cadre dérogatoire pour les « petits réseaux isolés ». La directive 2019/944 du 5 juin 2019 concernant des règles communes pour le marché intérieur de l'électricité, a étendu ce cadre dérogatoire pour les « petits réseaux connectés ».

Les États membres de l'Union européenne peuvent décider de ne pas appliquer la règle de dissociation des gestionnaires de réseaux aux entreprises intégrées d'électricité qui approvisionnent de tels réseaux. La loi française a progressivement décliné la notion de « petit réseau isolé » et de « petit réseau connecté » et les dérogations afférentes, à travers notamment la notion de **zones non interconnectées** au réseau métropolitain continental.

#### **4 – 2 - Programmations pluriannuelles de l'énergie (PPE)**

La loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) a mis en place des PPE propres à chaque ZNI. Co-élaborées par le gouvernement et les autorités locales pour une période de cinq ans, avec une vision sur 10 ans, elles constituent l'outil de pilotage de la politique énergétique.

Les PPE portant sur la période 2018-2023 ont été adoptées sur l'ensemble des ZNI. En revanche, seules les îles du Ponant (annexe à la PPE métropolitaine), la Réunion (décret du 20 avril 2022) et Saint-Pierre et Miquelon (décret du 3 octobre 2023) disposent aujourd'hui d'une PPE portant sur la période 2023-2028.

A ce stade, aucune PPE fixant de nouveaux objectifs sur la période 2028-2033 n'a encore été publiée.

#### **4 – 3 - Les grands enjeux de la transition énergétique dans les ZNI**

Territoires isolés du réseau électrique de la France continentale, les ZNI assurent encore l'essentiel de leur fourniture électrique avec des énergies fossiles importées (fioul, charbon), complétées par des énergies renouvelables locales ou importées.

Elles ont structuré leurs objectifs pour la transition énergétique dans leur PPE autour de deux objectifs ambitieux fixés dans le code de l'énergie :

couvrir avec des énergies renouvelables 100 % de leur mix électrique en 2030 ;

et parvenir à l'autonomie énergétique en 2030 (en 2050 pour la Corse et Wallis et Futuna

Pour l'électricité, passer d'un système carboné à un système reposant sur des énergies renouvelables soulève toutefois d'importantes questions techniques et économiques.

Intégrer des énergies renouvelables intermittentes aux systèmes électriques de petites tailles des ZNI nécessite des solutions adaptées pour maintenir l'équilibre entre l'offre et la demande d'électricité. Une des solutions est de déployer des installations centralisées de stockage, pilotées par le gestionnaire de réseau.

Les projets d'énergies renouvelables doivent aussi faire appel, en priorité, à des technologies matures et maîtrisées, pour contenir la dépense publique et assurer la sécurité du système électrique.

Les mix électriques doivent faire appel en priorité à des sources d'énergies locales, afin d'atteindre les objectifs d'autonomie énergétique. Toutefois, afin de valoriser les importants investissements récemment consentis sur les centrales thermiques tout en accompagnant la transition énergétique et en assurant la sécurisation du système électrique, la conversion des centrales thermiques au bioliquide et à la biomasse solide, principalement importés, et telle que prévue dans les PPE en vigueur ou en cours de rédaction, apparaît comme une solution transitoire intéressante.

Dans ce cadre, la Réunion deviendra, au cours de l'année 2024, le premier territoire à s'affranchir en quasi-totalité des imports d'énergie fossile pour la production d'électricité, grâce à la conversion de ses centrales charbon à la biomasse solide et de ses centrales diesel aux bioliquides.

La priorité est aussi donnée à la maîtrise de la consommation d'électricité. L'importance des coûts de production justifie :

- des actions volontaristes de maîtrise de la demande d'électricité ;
- une sensibilisation des consommateurs aux économies d'énergies et aux enjeux de la transition énergétique de leurs territoires ;
- l'envoi de signaux tarifaires pertinents pour inciter à limiter les consommations en périodes de pointe ;
- le développement de bornes de recharge de véhicules électriques pilotables.

#### **4 – 4 - installations de stockage**

Le soutien de l'Etat en ZNI porte également sur les coûts des ouvrages de **stockage d'électricité** pilotés par le gestionnaire du système électrique. La détermination du niveau de la compensation de ces coûts est décrite dans la méthodologie de la CRE publiée en janvier 2023 après consultation des acteurs.

La CRE a dans un premier temps ouvert deux guichets de stockage en 2017 et 2018 qui ont permis de retenir 13 projets pour une capacité cumulée utile de 64,7 MWh répartis sur les six territoires les plus importants en termes de consommation électrique.

Après avoir révisé sa méthodologie d'examen, la CRE a annoncé la tenue de nouveaux guichets sur les différents territoires. Les informations sont disponibles sur la page dédiée aux guichets.- <https://www.cre.fr/electricite/transition-energetique-dans-les-zni.html>

La production électrique à partir de sources renouvelables est variable d'un territoire à l'autre, que ce soit au niveau du taux de pénétration des EnR dans le mix énergétique ou dans les moyens de production utilisés.

La Guyane, la Corse et La Réunion utilisent principalement l'hydraulique là où la Martinique et l'île de Mayotte misent sur le photovoltaïque.

On peut néanmoins noter qu'hormis pour la Guyane, le taux de pénétration reste faible, bien loin des objectifs de la loi réclamant une autonomie énergétique en 2030 dans les DROM et en 2050 en Corse. Le cas particulier de la Guyane s'explique par le fait que le réseau électrique est encore peu développé, avec une démographie et une demande électrique faible par rapport aux autres ZNI.

## 5 – Stockage de l'énergie solaire

Il est possible de stocker l'énergie solaire, issue de panneaux photovoltaïques, que ce soit à petite ou grande échelle. Il s'agit actuellement d'un sujet central puisque les énergies renouvelables, indispensables à la transition énergétique, disposent d'une caractéristique notable : **elles sont intermittentes**.

**Concrètement**, cela signifie que leur disponibilité est variable et que leur production dépend des conditions météo : l'énergie solaire ne peut être produite que pendant la journée et varie en fonction de certains aléas climatiques (présence de nuages, par exemple). Or, les pics de production de vos panneaux solaires ne coïncident pas forcément avec vos besoins de consommation électrique à l'instant T.

Pour contrer cela, plusieurs solutions s'offrent aux particuliers en autoconsommation individuelle :

- Opter pour l'autoconsommation avec réinjection du surplus non consommé sur le réseau électrique ;
- Stocker l'électricité produite pour l'utiliser ultérieurement.

### Panneaux solaires : quelles solutions de stockage ?

Il existe aujourd'hui différents moyens de stocker l'électricité produite par vos panneaux solaires. Parmi les solutions les plus plébiscitées et les technologies émergentes, on peut citer :

- La batterie physique ;
- La batterie virtuelle ;
- Le routeur solaire ;
- Le véhicule to grid (V2G).

#### 5 – 1 - La batterie physique

La solution de stockage d'énergie solaire la plus couramment employée par les particuliers est la batterie physique. Concrètement, son fonctionnement est simple : la batterie se charge pendant la journée et stocke l'énergie sous une forme chimique. Elle conserve ainsi l'électricité, produite par les panneaux photovoltaïques, afin de la restituer plus tard, en fonction de vos besoins, sous une forme électrique.

Il existe différents types de batteries de stockage pour panneaux solaires :

- Lithium ;

- Au plomb ouvert ;
- AGM ;
- Gel...

Chacune de ces batteries dispose de caractéristiques à prendre en compte. Les batteries au lithium sont aujourd'hui les plus performantes et celles qui offrent la plus grande longévité. Elles demandent en revanche un investissement important, qui peut constituer un frein. À l'inverse, les batteries au plomb ouvert, AGM ou Gel sont moins chères, mais souvent considérées comme contraignantes, voire obsolètes (entretien régulier, courte durée de vie, impact environnemental important...).

## 5 – 2 - La batterie virtuelle

Plus récente, la batterie virtuelle offre un tout autre fonctionnement, puisqu'elle ne permet pas de stocker physiquement votre électricité.

Le stockage virtuel consiste à créditer votre batterie virtuelle en proportion du surplus que vous injectez sur le réseau.

L'électricité vous est alors restituée dès que vous en avez besoin.

Cette solution présente de nombreux avantages (plus d'électricité verte sur le réseau, gain de place, stockage sans limite, pas d'entretien, impact réduit sur l'environnement...).

Autrement dit, avec une batterie virtuelle, le surplus que vous consommez plus tard n'a pas été produit directement sur votre toiture.

**Seule la quantité en kilowatt-heures est équivalente.**

**Sans batterie**, il est possible de revendre le surplus photovoltaïque en signant un contrat de 20 ans avec EDF Obligation d'Achat. Son prix de vente est fixe pendant toute la durée du contrat, il est actuellement à **13 centimes € le kWh** (2023). Par ailleurs, ce tarif de rachat peut être actualisé tous les trimestres et dépend de la Commission de Régulation de l'Énergie (CRE).

**En revanche**, le prix du kWh des fournisseurs de batteries virtuelles est indexé sur les Tarifs Réglementés de Vente (TRV), se situant actuellement aux alentours de 19 c€/kWh. Contrairement aux batteries solaires (virtuelle ou physique), ce contrat avec EDF OA donne droit à la prime à l'autoconsommation (ou prime à l'investissement). Cette aide est versée en une seule fois et varie entre 110 € et 500 € le kWc (kilowatt-crête), en fonction de la puissance d'installation

En 2023, **trois fournisseurs d'électricité** principaux proposent des offres de batterie virtuelle solaire : MyLight Systems, JPME et Urban Solar Energy.

## 5 – 3- Routeur solaire

Un routeur solaire est un dispositif électronique intelligent qui permet de gérer et optimiser la production, le stockage et la consommation de l'énergie solaire dans un système photovoltaïque. Grâce à ses différentes fonctionnalités, il facilite grandement l'exploitation de l'énergie solaire et favorise ainsi l'indépendance énergétique de votre habitat

**Le routeur solaire possède plusieurs fonctions principales :**

- **Gestion de la production d'énergie solaire** : Le dispositif mesure et surveille constamment la quantité d'énergie produite par les panneaux solaires, afin d'en tirer le meilleur parti.
- **Stockage de l'énergie solaire** : Une fois l'énergie produite, le routeur solaire dirige cette dernière vers un dispositif de stockage tel qu'une batterie ou un chauffe-eau, en veillant à l'utiliser au maximum selon les besoins et les conditions climatiques du moment.
- **Consommation intelligente** : Le routeur solaire analyse et optimise la consommation énergétique du foyer, en redirigeant l'énergie disponible vers les différents appareils électriques de la maison suivant leur niveau de priorité. Il peut également être programmé pour fonctionner sur des plages horaires spécifiques lorsque la production d'énergie est maximale.

#### **Principaux avantages du routeur solaire**

- **Réalisation d'économies** : Le dispositif permet de diminuer significativement, voire totalement, votre dépendance au réseau électrique traditionnel, réduisant ainsi vos dépenses énergétiques.
- **Promotion des énergies renouvelables** : Grâce à son système intelligent, le routeur solaire encourage la production et l'utilisation de l'énergie solaire, une source d'énergie inépuisable et respectueuse de l'environnement.
- **Automatisation et facilité d'utilisation** : Une fois paramétré selon les besoins et préférences de l'utilisateur, le routeur solaire gère de manière autonome et dynamique la distribution de l'énergie solaire, sans intervention nécessaire.

#### **Les différentes solutions de routeurs solaires**

Il existe plusieurs types de routeurs solaires sur le marché, offrant diverses capacités et fonctionnalités selon les besoins de chaque utilisateur :

- **Routeurs solaires pour chauffe-eau** : Ces dispositifs permettent de chauffer l'eau de votre foyer à partir de l'énergie solaire, en optimisant son utilisation et en réduisant les pertes énergétiques. Ils sont particulièrement adaptés aux maisons équipées de systèmes de chauffage solaire.
- **Routeurs solaires pour batteries** : Ce type de routeur est conçu pour optimiser la recharge des batteries grâce à l'énergie solaire, assurant ainsi un stockage optimal de cette dernière et une meilleure disponibilité en cas de besoin.
- **Routeurs solaires hybrides** : Combinant les fonctions précédentes, ces routeurs solaires polyvalents gèrent à la fois le stockage d'énergie dans les batteries et l'utilisation de l'énergie solaire pour alimenter les divers appareils électriques du foyer.

### **5 – 4 - Le véhicule to grid- V2G**

Le V2G, qui signifie **Vehicle-to-Grid**, est une technologie qui permet aux véhicules électriques (VE) de faire plus que simplement recevoir de l'électricité pour se recharger. Le V2G permet aux véhicules électriques d'agir comme des unités mobiles de stockage d'énergie, renvoyant de l'électricité au réseau électrique en cas de besoin.

**Voici un aperçu de la V2G :**



- **Flux d'énergie bidirectionnel** : Contrairement à la recharge ordinaire, qui est unidirectionnelle (du réseau à la voiture), le V2G est bidirectionnel. Cela signifie que les véhicules électriques peuvent à la fois être rechargés à partir du réseau et rejeter l'énergie excédentaire dans le réseau.
- **Avantages pour le réseau** : Le V2G contribue à stabiliser le réseau électrique en fournissant de l'énergie supplémentaire pendant les périodes de pointe. Il peut également intégrer des sources d'énergie renouvelables comme le solaire et l'éolien, qui peuvent être intermittentes, en stockant l'énergie excédentaire lorsque la production est élevée et en la réinjectant dans le réseau en cas de besoin.
- **Avantages pour les propriétaires de véhicules électriques** : Le V2G peut potentiellement créer de nouvelles sources de revenus pour les propriétaires de véhicules électriques. En participant à des programmes de réponse à la demande, ils pourraient être rémunérés pour réinjecter de l'électricité dans le réseau aux heures de pointe. Le V2G pourrait également permettre une recharge plus rapide lorsque la demande est faible.

Le V2G est encore une technologie émergente, mais il a le potentiel de jouer un rôle important dans l'avenir du transport électrique et la transition vers un réseau énergétique plus durable.

## Les différents types de recharge

Pour différencier l'intérêt des différents types de charges bidirectionnelles proposées, les acronymes se sont multipliés à tel point qu'on peut facilement s'y perdre. Voici les principaux qui sont, aujourd'hui, utilisés.

### V2L – Vehicle-to-load

Le V2L est, aujourd'hui, le type de charge bidirectionnelle le plus répandu. Il permet, grâce à la batterie de sa voiture électrique, de recharger ou d'alimenter des appareils électriques, de l'ordinateur portable à l'aspirateur en passant par la TV ou même un vélo électrique. Les constructeurs coréens **Hyundai et Kia** sont des références en la matière avec, par exemple, la Hyundai Ioniq 5 ou la Kia EV6. D'autres fabricants s'y mettent, notamment **Tesla** avec son Cybertruck.

Cette solution peut s'avérer particulièrement pratique en cas de coupure de courant, permettant d'alimenter ponctuellement quelques appareils. Plusieurs fabricants américains vantent également l'intérêt de cette solution pour remplacer un groupe électrogène sur chantier. C'est notamment le cas de Tesla avec son Cybertruck, ou Ford avec son F-150 Lightning. Enfin, les amoureux du camping y verront l'opportunité de pouvoir se faire un café sans difficulté au milieu de nulle part, ou même de conserver quelques bières au frais toute une journée.

### V2H – Vehicle-to-home

Plus développée que le V2L, le V2H permet d'alimenter sa maison avec l'électricité contenue dans la batterie de sa voiture électrique via une borne bidirectionnelle. Cette solution permet de faire face à d'éventuelles coupures de courant avec très peu de contraintes, mais également d'optimiser sa facture d'électricité ! Il est ainsi possible de

recharger sa batterie durant les heures creuses pour utiliser cette électricité plus tard, durant les heures pleines.

### **V2B – Vehicle-to-building**

Le V2B reprend le même principe que le V2H, mais appliqué à n'importe quel type de bâtiment.

### **V2G – Vehicle-to-grid**

Le V2G est la technologie qui est la plus amenée à se développer. Très similaire au V2H, elle permet, grâce à une borne de recharge bidirectionnelle, de transformer une voiture électrique en batterie de stockage permettant de lisser la production du réseau électrique national. Dans un contexte de développement des énergies renouvelables non-pilotables, cette technologie se montre particulièrement intéressante. Il est ainsi possible de stocker le surplus d'énergie issu des pics de production (par jour de grand vent par exemple), et de d'atténuer les pics de consommation par l'utilisation de l'énergie stockée dans les batteries (le soir à 18 heures par exemple).

Cette technologie est en passe de devenir courante sur un grand nombre de véhicules.

**Volkswagen** vient, par exemple, d'annoncer la mise en place du V2G sur ses prochains véhicules de la gamme ID dotés d'une batterie de 77 kWh. Renault aussi, mise sur le développement du V2G avec sa future R5 qui intégrera la charge bidirectionnelle en V2L et V2G

### **V2X – Vehicle-to-everything**

Le V2X n'est pas une simple technologie de recharge bidirectionnelle. Ce terme désigne plutôt une technologie visant à permettre à un véhicule de communiquer avec tout ce qui l'entoure : les piétons, des objets, des infrastructures, le réseau électrique, etc.

L'objectif final de cette technologie est de permettre une optimisation conjointe de la sécurité routière, de la consommation d'électricité, et de la circulation. Étant une part de l'IoT (Internet of Things), elle devrait principalement être rendue possible par l'utilisation de la 5G, et permettre une communication permanente entre tous ces éléments.

## **6 – Avantages/:inconvénients**

### **Avantages :**

- **Indépendance énergétique** : le stockage de l'électricité issue de vos panneaux solaires vous permet d'être moins dépendant du réseau électrique.
- **Économies** : maximiser votre autoconsommation solaire grâce à une solution de stockage vous permet de faire encore plus d'économies sur votre facture d'électricité.
- **Flexibilité** : vous pouvez utiliser l'énergie stockée à tout moment (le soir, notamment), en fonction de vos besoins

### **Inconvénients :**

- **Prix** : les solutions de stockage d'énergie solaire sont généralement très coûteuses, ce qui peut impacter la rentabilité de votre installation photovoltaïque.

- **Durée de vie** : en comparaison avec le reste de l'installation solaire, les batteries ont une durée de vie limitée (souvent inférieure à 10 ans), ce qui oblige à les remplacer en cours d'utilisation du dispositif photovoltaïque.
- **Entretien** : la longévité de la solution de stockage doit être assurée par une gestion spécifique (respecter la profondeur de décharge de la batterie, éviter les températures extrêmes...).
- **Impact environnemental** : l'ensemble du cycle de vie de la solution de stockage physique (extraction de matières premières, fabrication, recyclage...) peut avoir un impact sur le bilan carbone de l'ensemble de votre installation photovoltaïque.

## Annexe : Bibliographie

- <https://www.smartgrids-cre.fr/encyclopedie/le-stockage-deelectricite/les-differentes-technologies-stationnaires-de-stockage-de-lelectricite>
- <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/stockage-de-lenergie>
- <https://www.cea.fr/comprendre/Pages/energies/essentiel-sur-energies.aspx>
- <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie>
- [https://www.nouvelr-energie.com/pv/stockage-energie-solaire?utm\\_source=bing&utm\\_medium=paidmedia&utm\\_campaign=bing\\_ads\\_in\\_pv\\_2022\\_panneau\\_solaire&msclkid=d5b83ddf9368195d7c815be6ec029858](https://www.nouvelr-energie.com/pv/stockage-energie-solaire?utm_source=bing&utm_medium=paidmedia&utm_campaign=bing_ads_in_pv_2022_panneau_solaire&msclkid=d5b83ddf9368195d7c815be6ec029858)
- <https://www.cre.fr/electricite/transition-energetique-dans-les-zni.html>
- <https://www.alterna-energie.fr/blog-article/stockage-energie-solaire-tout-ce-quil-faut-savoir>

## Document asprom

- tockage de l'»energie , un defi de demain : [www.asprom.com/ecologie/teching5.pdf](http://www.asprom.com/ecologie/teching5.pdf)
- Energies renouvelables : Façonner le destin énergétique de l'»europe [www.asprom.com/ecologie/ser1.pdf](http://www.asprom.com/ecologie/ser1.pdf)
- Panorama de l'énergie électrique renouvelable au 31/12/2023 [www.asprom.com/ecologie/ser2.pdf](http://www.asprom.com/ecologie/ser2.pdf)
- La géothermie de surface – [www.asprom.com/ecologie/AFPG.pdf](http://www.asprom.com/ecologie/AFPG.pdf)
- Guide: kit PhotoVoltaïque – [www.asprom.com/ecologie/SGS.pdf](http://www.asprom.com/ecologie/SGS.pdf)