

**Académie des technologies  
Commission Énergie et Environnement**

***10 QUESTIONS***

***A JEAN DHERS***

***SUR LE STOCKAGE  
DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE***

***7 DECEMBRE 2006***



---

# TABLE DES MATIÈRES

---

<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>7</b>
<b>Q1. POURQUOI VOULOIR STOCKER DE L'ÉNERGIE ? .....</b>	<b>9</b>
<b>Les applications d'autonomie pour des équipements</b>	<b>10</b>
a) Les applications portables	10
b) Les applications mobiles	10
<b>Les applications stationnaires</b>	<b>10</b>
c) Le stockage : un moyen temps réel de fournir l'énergie électrique au coût minimum	12
d) Fluctuation de la production face aux fluctuations de la demande	13
e) Besoins d'alimentations électriques sans coupure (UPS)	15
<b>Les applications de réseau</b>	<b>16</b>
<b>Conclusion</b>	<b>17</b>
<b>Q2. TYPES ET FACTEURS DE MERITE DES STOCKAGES D'ÉNERGIE ET DE PUISSANCE RÉVERSIBLES ? .....</b>	<b>19</b>
<b>Procédés de stockage réversibles possibles</b>	<b>19</b>
<b>Facteurs de mérite caractérisant les stockages d'énergie</b>	<b>20</b>
<b>Conclusion</b>	<b>23</b>
<b>Q3. COMMENT STOCKER MASSIVEMENT L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE POUR L'EXPLOITER SUR LE RESEAU ? .....</b>	<b>25</b>
<b>La station de transfert d'énergie par pompage (STEP)</b>	<b>26</b>
a) Avantages des STEP : technologie éprouvée et écologique	27
b) Inconvénients des STEP : coûts d'exploitation élevés	28
<b>Le stockage d'énergie sous forme d'air comprimé (CAES)</b>	<b>28</b>
a) Avantages des CAES : localisation et rendement	28
b) Inconvénients des CAES : énergie pour comprimer le gaz	29
<b>Comment utiliser le stockage massif de l'énergie électrique ?</b>	<b>29</b>
a) Comparaisons entre STEP et CAES	29
b) Comment utiliser cette réserve d'énergie électrique massive dans le cadre du développement durable ?	30
c) L'utilisation de l'hydrogène comme stockage indirect	31
<b>Q4. QU'EST-CE QUE LE STOCKAGE INERTIEL ? .....</b>	<b>33</b>
<b>Stockage d'énergie cinétique accumulée dans un volant (FES)</b>	<b>33</b>
<b>Quelles applications pour le stockage inertiel ?</b>	<b>34</b>
a) Marché des alimentations stabilisées	34
b) Marché des transports	34
c) Marché des sources de puissance tournantes	34
d) Marché des sources impulsionnelles	35
e) Marché des procédés fortement dynamiques	35

<b>Q5.</b>	<b>QUELLE EST L'IMPORTANCE DU STOCKAGE PAR BATTERIES ÉLECTROCHIMIQUES ? .....</b>	<b>37</b>
	Le stockage électrochimique réversible	37
	Évolution des batteries pour les transports terrestres	38
	Batteries de secours de réseau électrique	39
	Conclusion	39
	Les trois grands secteurs économiques des batteries	40
	a) Les transports terrestres	40
	b) Les énergies renouvelables (stockage décentralisé)	41
	c) Les équipements portables	41
<b>Q6.</b>	<b>LES PILES À COMBUSTIBLE SONT-ELLES UN MOYEN DE STOCKER DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE ? .....</b>	<b>43</b>
<b>Q7.</b>	<b>QUELLE PLACE POUR LE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE PAR CONDENSATEURS DE PUISSANCE ? .....</b>	<b>45</b>
	Qu'est-ce qu'un condensateur ?	45
<b>Q8.</b>	<b>QU'ATTENDRE DES SUPER CONDENSATEURS DE PUISSANCE DANS UN AVENIR PROCHE ? .....</b>	<b>47</b>
	Qu'est-ce qu'un super condensateur ?	47
	Comparaison entre les performances des super condensateurs et celles des batteries	49
	a) Puissance massique	49
	b) Énergie massique	49
	c) Tenue en température	50
	d) Durée de vie	50
	Quelles sont les applications dévolues aux super condensateurs ?	51
	e) Application dans l'automobile	51
	f) Application dans les transports urbains	51
	g) Application future	51
	h) Applications diverses	51
<b>Q9.</b>	<b>À QUOI SERT LE STOCKAGE ÉLECTROMAGNETIQUE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE ? .....</b>	<b>53</b>
	Superconducting Magnet Energy Storage (SMES)	53
	Avantages des SMES	53
	Inconvénients des SMES	54
	Applications des SMES	54
<b>Q10.</b>	<b>COMMENT EST ORGANISÉE LA RECHERCHE SUR LE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE ? .....</b>	<b>55</b>
	<b>CONCLUSION .....</b>	<b>57</b>
	<b>ANNEXES .....</b>	<b>61</b>
	Annexe 1 : Principes de gestion du réseau	61
	Annexe 2 : Compensation de puissance réactive	62

---

## INTRODUCTION

---

Les questions que se pose le public sur l'énergie et sa relation avec l'environnement portent sur les avantages et inconvénients de chacune des sources et sur les zones incertaines, notamment celles qui nécessitent une recherche et un développement plus ou moins longs avant que des réponses puissent être apportées. Le rapport de synthèse de la Commission Énergie et Environnement *Prospectives sur l'énergie au XXI<sup>e</sup> siècle* aborde l'ensemble de ces questions.

L'Académie des technologies a cependant souhaité qu'à côté de ce rapport de synthèse, des sujets spécifiques soient abordés sous une forme plus courte de « 10 Questions sur », ces questions pouvant porter sur une énergie particulière (charbon, pétrole, gaz, biomasse, hydrogène...) ou sur un aspect particulier de la relation énergie-environnement, par exemple les déchets nucléaires ou le développement des véhicules hybrides.

Nous abordons dans ce dossier le sujet du stockage de l'énergie électrique.

Le stockage a toujours été le point faible dans la chaîne de distribution de l'énergie électrique entre les centres de productions (centrales électriques) et les centres de consommation : usines, collectivités diverses, activités tertiaires, particuliers... Il résulte de cette insuffisance que les échanges d'énergie se font à flux tendus, grâce à une gestion en temps réel permanente de la production que l'on aligne sur la demande d'énergie pour maintenir le réseau à l'équilibre.

A l'avenir, la difficulté de gestion et la vulnérabilité au déséquilibre ne peuvent que s'accroître, avec l'extension des usages de l'électricité, ainsi que celle du réseau européen. L'envoi sur le réseau d'énergie électrique provenant de sources intermittentes solaires et éoliennes, pourtant infiniment souhaitable pour entrer dans l'ère du développement durable, rendra le réseau particulièrement instable si l'on ne peut amortir ses oscillations par un stockage et un déstockage d'énergie. Dans cette perspective nouvelle d'exploitation, il importe de trouver des solutions pour stocker l'énergie électrique et améliorer le comportement dynamique du réseau.

Le problème du stockage de l'énergie électrique est encore plus crucial dans les transports terrestres lorsqu'il s'agit d'éliminer à la source l'émission dans l'atmosphère de gaz à effet de serre par chaque véhicule : si ce stockage était suffisant et commode d'emploi, il permettrait de développer la motorisation et l'alimentation électriques des véhicules et de leurs auxiliaires, soit pour en faire des véhicules totalement électriques si l'énergie stockée est suffisante, soit pour développer des véhicules biénergies (thermique/électrique) ayant une marche électrique satisfaisant les utilisateurs en milieu urbain.

Trouver des moyens plus performants de stocker l'énergie électrique est également fondamental pour accroître valablement l'autonomie et la puissance des équipements portables.

La société, soucieuse de vivre mieux et désireuse de protéger la Terre des méfaits occasionnés par des gaz à effet de serre anthropiques, attend beaucoup des retombées que ne manqueraient pas de provoquer indirectement des progrès technologiques dans les moyens de stockage de l'énergie électrique.

En demandant à M. Jean Dhers de répondre à 10 questions, la Commission Énergie et Environnement de l'Académie des technologies entend proposer aux citoyens qui souhaitent être éclairés sur ce sujet des informations à jour et objectives, leur permettant de se construire une opinion étayée sur ce thème fondamental.



## Q1. POURQUOI VOULOIR STOCKER DE L'ÉNERGIE ?

La réponse consiste à dire que l'on désire stocker de l'énergie pour en disposer lorsqu'on en a besoin, ce qui semble évident à première vue. Elle est néanmoins à nuancer car les technologies et la finalité du stockage dépendent des types d'applications visées. Il faut aussi distinguer entre ce que l'on sait faire, ce que l'on voudrait améliorer et, surtout, ce que l'on souhaiterait faire, en se situant dans le contexte énergétique futur défini par la loi d'orientation de la politique énergétique de la France, publiée le 13 juillet 2005.

Cette loi d'orientation demande à mettre en œuvre un bouquet énergétique diversifié, qui contribuera à réduire l'émission des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, à utiliser davantage les énergies renouvelables et à employer moins de combustibles fossiles. Une grande place est faite à l'énergie électrique.

**Atteindre les objectifs fixés par la loi passe nécessairement par le stockage de l'énergie**

On sait stocker l'énergie mécanique, l'énergie thermique, l'énergie chimique, mais les lois de la physique nous apprennent qu'on ne peut stocker l'énergie électrique que de façon indirecte.

Les besoins et les technologies de stockage d'énergie diffèrent suivant qu'ils sont centralisés et massifs, ou décentralisés et de quantité modeste.

### Deux grands types de besoins

#### ✓ centralisés et massifs

C'est le cas de la gestion, sur le réseau de transport, de l'énergie électrique produite par les centrales actuelles, afin d'équilibrer en temps réel la production et les demandes variables journalière, hebdomadaire, saisonnière et, en plus, dans le futur, de la sécuriser face aux fluctuations d'une production importante et nécessairement intermittente d'énergie électrique d'origine renouvelable.

#### ✓ décentralisés et de quantité modeste

Variés et répondant à des applications stationnaires précises, (alimentation électrique sans coupure possible, stockage pour pallier localement l'intermittence d'une source d'énergie renouvelable) ou répondant à des applications mobiles (transports).

## Les applications d'autonomie pour des équipements

Les équipements nécessitant de stocker de l'énergie peuvent se répartir en deux classes d'applications, déterminées par les quantités d'énergie mises en jeu.

### a) Les applications portables

Les applications portables correspondent à des énergies inférieures à quelques kilowattheures (kWh), pour assurer le plus possible d'autonomie (la plus grande durée de

fonctionnement possible) des appareils portables, en général électriques : téléphones, P.C., outils divers pour toutes sortes d'usages professionnels et de loisirs.

### b) Les applications mobiles

Les applications mobiles nécessitent une autonomie d'énergie comprise entre quelques dizaines et quelques centaines de kilowattheures, durant l'ensemble du trajet, dans les transports aériens, terrestres et maritimes, à bord de véhicules motorisés en tout genre et pour tous usages, etc. Pour assurer cette autonomie, on utilise des carburants stockés à bord, dans des réservoirs : aujourd'hui des produits dérivés du pétrole (kérosène, essences, fuels) ; demain, dans le contexte de développement durable, des carburants de synthèse ou des vecteurs énergétiques (électricité ou hydrogène). Dans le premier cas, cela ne constituerait pas un grand changement, mais dans le second, les stratégies de stockage et de distribution devront être fondamentalement revues.

### Les applications stationnaires

Les applications stationnaires concernent aujourd'hui les équipements de production de l'énergie électrique alimentant un réseau de transport d'énergie. Le stockage de l'énergie électrique a deux objectifs : économique (recherche du coût minimum de l'énergie électrique) et technologique (équilibre de la production et de la consommation de l'énergie). D'autres objectifs pourront lui être assignés dans le futur. Les quantités d'énergie mises en jeu dépassent les centaines de mégawattheures (MWh).

Dans le futur, le stockage concernera aussi les équipements locaux de production d'énergie électrique à partir de sources renouvelables (éoliennes et solaires). Ces équipements seront isolés ou connectés à un réseau électrique (dans le but de pallier l'intermittence aléatoire ou journalière de l'énergie produite). Les quantités d'énergie mises en jeu sont de l'ordre de quelques MWh.

Pour compenser les discontinuités d'approvisionnement en amont, les centrales électriques doivent disposer d'une autonomie en combustible. De cette façon elles peuvent distribuer de l'énergie en continu sur le réseau. Cette autonomie passe par le stockage de combustibles : charbon sur les parcs, gaz dans des cavités souterraines, eau dans des lacs naturels ou artificiels en amont des groupes turbo alternateurs des centrales.

**Le stockage de l'énergie électrique produite est le seul moyen de gérer en temps réel, avec la sécurité maximale, la production d'énergie électrique sur un réseau de transport.**

Pour assurer l'autonomie de la production dans le temps, on pourrait vouloir stocker non pas le combustible en amont, mais une partie de l'électricité produite en aval. Ainsi, il serait particulièrement intéressant de pouvoir stocker l'énergie produite en période de sous charge programmée des centrales, pour la restituer à la demande en période de surcharge. Bien que le stockage direct de l'énergie électrique ne soit pas possible, on sait par contre la stocker de façon indirecte, pour la recréer à la demande. L'encadré suivant rappelle les principes en la matière.



### Le stockage indirect de l'énergie électrique

Les lois de la physique nous apprennent que l'on ne peut pas stocker directement l'énergie électrique (comme on stocke le pétrole, le gaz, le charbon, l'eau), mais que l'on peut la transformer en d'autres formes d'énergie potentielles (stockables) : mécanique, électrochimique, thermique, etc., par des conversions dont certaines sont réversibles, c'est-à-dire capables, par transformation inverse, de recréer de l'énergie électrique. Citons en particulier la conversion réciproque énergie mécanique / énergie électrique ; elle est toujours à l'origine de la production d'énergie dans les centrales hydrauliques.

Citons aussi les conversions électrochimiques de charges et de décharges dans les batteries électrochimiques. Du fait de cette propriété de réversibilité de conversion on peut stocker indirectement de l'énergie électrique que l'on utilise quand on en a besoin (au rendement près des deux conversions successives et éventuellement en-deçà d'une limite en nombre de cycles de conversions/reconversions possibles).

#### c) Le stockage : un moyen temps réel de fournir l'énergie électrique au coût minimum

En France l'énergie électrique fournie au réseau provient de centrales de types différents : nucléaires, hydrauliques au fil de l'eau, hydrauliques de lacs, thermiques au charbon qui produisent l'énergie électrique de base, STEP (ou centrales hydrauliques de pompage à stockage d'eau gravitaire ([Voir Q3. La station de transfert d'énergie par pompage \(STEP\), page 26](#)), thermiques à turbines à gaz, thermiques à turbines à gaz en co-génération chaleur électricité, champs d'éoliennes qui produisent l'énergie électrique intermédiaire et l'énergie de pointe. Chaque type de centrale a un prix de revient du kWh différent, les prix de revient croissants étant approximativement classés suivant l'ordre des centrales indiqué ci-dessus.

Le premier principe de gestion de l'énergie électrique sur le réseau est de parvenir à équilibrer exactement, en temps réel, la quantité d'électricité produite par ces diverses centrales avec la quantité d'énergie consommée : du fait d'une demande fluctuante, le prix de revient de l'électricité fluctue donc à chaque instant suivant la configuration des centrales en production effective ([Voir Annexe 1 : Principes de gestion du réseau, page 61](#)).

Le second principe de gestion est de faire en sorte que le prix de revient de l'électricité soit toujours le plus bas possible : dans ce but, le gestionnaire du réseau doit choisir en temps réel, parmi l'ensemble des centrales éligibles, la configuration optimale de centrales à mettre en production et de celles à tenir en réserve. Au-delà des centrales nucléaires, qui constituent la production de base quotidienne d'énergie électrique (malheureusement sans grand degré de flexibilité), il y a l'hydraulique.

Toutes les centrales hydrauliques, et plus spécialement les centrales de pompage du fait de leur réversibilité, présentent beaucoup d'intérêt et de souplesse en tant que réserves potentielles d'énergie facilement accessibles et ajustables, d'autant que le prix de revient du kWh produit est plus faible que celui des centrales au gaz puisque, d'une part, il n'y a pas

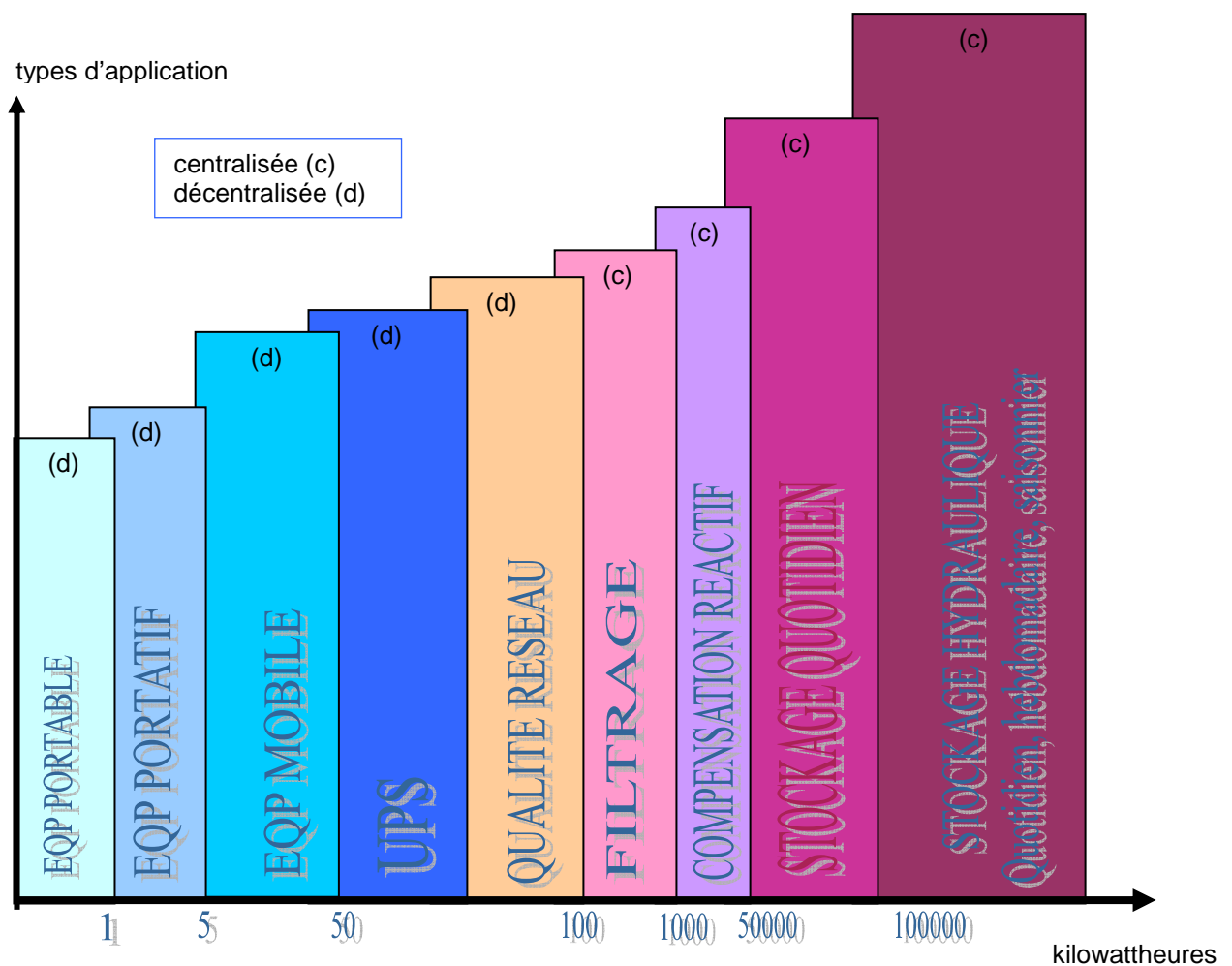
de prix de combustible à payer et que, d'autre part, la quantité de CO<sub>2</sub> rejetée dans l'atmosphère est nulle.

#### d) Fluctuation de la production face aux fluctuations de la demande

La demande en énergie électrique alternative sur le réseau de distribution fluctue au long du cycle quotidien : elle est plus faible la nuit (heures creuses) que le jour (heures pleines). Elle varie également suivant les jours de la semaine (travaillés ou non), suivant les saisons et suivant les caprices de la météo (en particulier en hiver et en été). On va donc stocker de l'énergie pendant les heures creuses, surtout durant les week-ends, et la déstocker pendant les heures pleines des jours de semaine.

Les courbes journalières de consommation montrent, à certaines heures, des pointes de demande considérables par rapport à la fourniture de base (de 1 à 5). Cette situation est susceptible de s'amplifier à court terme avec la hausse prévue de consommation de l'électricité et la déréglementation des marchés européen et nationaux. Cette variation de la demande se traduit, au lissage statistique près, par une variation correspondante de la production d'énergie électrique.

#### Les différentes applications du stockage de l'énergie électrique



En France, les quelques STEP existantes facilitent la gestion de la production de l'énergie électrique grâce à leur souplesse et leur relative rapidité de marche, soit en pompage, soit en turbinage de l'eau.

Néanmoins ce stockage centralisé est actuellement insuffisant pour passer les pointes variables de demande d'énergie électrique : il est alors nécessaire de démarrer ou de mettre en régime variable des centrales thermiques au charbon, au fuel et au gaz (surtout en France), centrales thermiques qui rejettent des gaz à effet de serre et, souvent, doivent en plus fonctionner en surcharge pour fournir l'énergie pendant la durée des pointes de consommation.

Il est notoire que la variation de charge des centrales a des conséquences négatives sur leur bon fonctionnement : conséquences technologiques (usures prématurées d'équipements dues aux fatigues alternées) et conséquences financières (entretien important et surdimensionnement en puissance des équipements à prévoir à l'origine).

Une restitution sur le réseau d'énergie électrique stockée pendant des heures creuses permet en grande partie d'éviter cette succession de démarrages et d'arrêts ou de marches en surcharge de centrales.

En plus, l'utilisation des centrales hydroélectriques, en particulier des STEP, constitue un moyen efficace pour faire baisser le prix de revient global du kWh. La montée régulière du prix de l'électricité sur le marché, ainsi que le rapport de prix entre énergie de pointe et énergie de base, sont propices au développement d'un stockage plus important que l'actuel. Or, s'il existait des capacités suffisantes de stockage centralisé de l'énergie électrique et dynamiquement performantes, plusieurs autres scénarios d'utilisation de l'énergie stockée pourraient être envisagés dès que l'intérêt économique s'en ferait sentir.

#### Quatre scénarios d'utilisation de l'énergie stockée

- ✓ Fournir de l'énergie à la demande.
- ✓ Lutter contre les émissions de CO<sub>2</sub>.
- ✓ Réduire l'importance des pointes de demande.
- ✓ Faire baisser le prix de revient de l'énergie aux heures de pointe.

#### e) Besoins d'alimentations électriques sans coupures (UPS<sup>1</sup>)

Les utilisateurs stockent aussi de l'énergie de façon décentralisée pour améliorer la qualité du produit électricité. Certaines applications informatiques ou sécuritaires exigent des alimentations électriques de haute qualité exemptes de micro ou de macro coupures telles qu'il en apparaît de façon aléatoire sur le réseau de distribution et dues, soit à des manœuvres d'appareillage électrique en moyenne tension dont les commutations sont insuffisamment filtrées ou amorties par les transformateurs, soit en général à des démarrages de moteurs industriels de forte puissance présentant un défaut (défaut de masse classique et plutôt fréquent pour les moteurs asynchrones industriels par exemple).

Pour réaliser des alimentations sans coupure à partir d'un réseau primaire susceptible d'être perturbé, il faut créer un réseau électrique secondaire sans coupure en interposant un générateur présentant un stockage, soit un onduleur statique dans lequel le stockage de l'énergie est réalisé par des capacités ou des batteries électrochimiques associées à des composants d'électronique de puissance, soit un groupe tournant formé d'un moteur, d'un alternateur et d'un volant d'inertie accouplés sur le même arbre, dans lequel l'énergie est

<sup>1</sup> Uninterruptible Power Supply (UPS)

stockée sous forme cinétique par la rotation du groupe (Voir Q4. Qu'est-ce que le stockage inertiel ?, page 33).

La quantité d'énergie stockée dans les deux cas doit être calculée pour effacer les coupures du réseau primaire pendant une durée déterminée. Si le moteur d'entraînement du groupe volant/alternateur est un moteur thermique et non un moteur électrique, on dispose alors d'un groupe électrogène de secours en cas de disparition du réseau électrique.

## Les applications de réseau

On stocke aussi de l'énergie pour assurer la stabilité des réseaux de transport d'énergie électrique et pour maintenir constant le facteur de puissance. Dans ce contexte, on parle plutôt de puissance (stockée/déstockée) que d'énergie. Nous expliquons la différence entre ces deux notions dans l'encadré qui suit.

### Énergie et puissance

Selon la dynamique des échanges énergétiques entre sources et utilisateurs on doit distinguer entre l'énergie et la puissance, à savoir entre l'énergie et le débit de l'énergie.

Le stockage/déstockage d'énergie correspond à des fonctionnements en régime permanent comme l'alimentation d'appareils portables type postes de radio, P.C., lampes, ou celles d'appareils portatifs ou des alimentations déconnectées du réseau comme des alimentations de secours, des alimentations de véhicules, et de façon plus générale des alimentations d'équipements dont les constantes de temps ou les temps de réponses sont grands (dizaines de secondes et plus).

Le stockage/déstockage d'énergie, sous forme de puissance active ou réactive, correspond à des fonctionnements en régimes transitoires, comme la récupération d'énergie de freinage, le stop and go des véhicules aux feux rouges, l'alimentation des mouvements de chariots élévateurs, le filtrage d'harmoniques de tension ou de courants, la compensation de puissance réactive sur le réseau électrique... Cela englobe tous les procédés subissant des régimes transitoires dont les constantes de temps ou temps de réponse sont très faibles (dizaines de millisecondes).

Les matériels mis en jeu dans ces deux modes de stockage sont en général différents, mais ils peuvent être combinés si les procédés le nécessitent, comme pour la propulsion électrique des véhicules (stockage d'énergie de propulsion par batteries électrochimiques et stockage de la puissance récupérée au freinage, grâce à des super condensateurs ou des volants d'inertie).

Dans les applications de transport d'énergie électrique, la stabilisation des réseaux vis-à-vis de perturbations extérieures est soumise à deux conditions :

- ✓ maintenir le facteur de puissance (alias  $\cos \varphi$ ) à une valeur acceptable pour faire fonctionner les divers alternateurs des centrales dans leurs conditions optimales ;
- ✓ stabiliser en tension et en fréquence le réseau à l'égard de perturbations aléatoires extérieures ayant pour origine soit des incidents d'exploitation (déclenchements/enclenchements de li-

gnes volontaires pour manœuvres ou sur défauts en charge, effets de foudre, etc.), soit de régimes transitoires créés par des équipements abonnés tels que appels sur le réseau de puissance active et surtout appels de puissance réactive (démarrages de moteurs ou accroissements de production), ou de génération d'harmoniques de courant ou de tension (dus à certains équipements comme des alimentations de fours à arc ou de convertisseurs de fréquence à base d'électronique de puissance).

Ainsi on stocke de l'énergie que l'on réinjecte sous forme de puissance réactive dans des temps très courts en des points précis du réseau. Les énergies mises en jeu sont très faibles (Voir Annexe 2 : Compensation de puissance réactive, page 62).

## Conclusion

On stocke plus facilement le pétrole, le gaz ou le charbon que l'énergie électrique.

À la lecture des lignes précédentes on comprend l'importance potentielle du stockage de l'énergie électrique et la nécessité d'en maîtriser les technologies.

Le stockage peut être utilisé de façon centralisée (stockage massif) ou décentralisée (applications mobiles par exemple) ; il vient au secours de la production de l'énergie électrique et de son transport ; il améliore la qualité, donc l'usage de l'énergie électrique.

On imagine son rôle à court terme dans l'utilisation rationnelle des énergies intermittentes, dans la mise en circulation de véhicules propres ; autrement dit, le stockage de l'énergie électrique contribuera de façon importante à réduire l'émission de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Dans la suite, compte tenu de son importance capitale, nous ne nous intéresserons qu'au stockage réversible de l'énergie électrique. De plus le stockage réversible est le seul à poser problème (si on exclut le vecteur énergétique hydrogène).

Pour le stockage de l'hydrogène dans les applications énergétiques, le lecteur se rapportera au livret [10 Questions sur l'hydrogène](#), paru en mars 2005 dans la même collection de l'Académie des technologies.



## Q2. TYPES ET FACTEURS DE MÉRITE DES STOCKAGES D'ÉNERGIE ET DE PUISSANCE RÉVERSIBLES ?

### Procédés de stockage réversibles possibles<sup>2</sup>

Différents procédés usuels sont qualifiés de réversibles, c'est-à-dire qu'ils sont capables, à la demande, de transformer de l'énergie électrique en une énergie intermédiaire potentielle, puis de la reconvertir ultérieurement en énergie électrique. Nous les avons classés en trois grandes catégories, suivant la finalité du stockage.

<p>Stockage de masse énergies supérieures à 100 MWh</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Hydraulique gravitaire (STEP)</li> <li>✓ Gaz comprimé (CAES)</li> <li>✓ Énergie thermique (TES)</li> </ul>
<p>Stockage de masse énergies inférieures à 1 MWh</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Electrochimique par batteries<sup>3</sup> (BES)</li> <li>✓ Électromagnétique, en particulier par des bobines supraconductrices<sup>3</sup> (SMES)</li> <li>✓ Chimique, associé à une pile à combustible ou à des électrolyseurs (CES)</li> </ul>
<p>Stockage de puissance</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Inertiel par machine tournante accouplée à un volant d'inertie (FES)</li> <li>✓ Par super condensateurs ou condensateurs<sup>3</sup> (FES)</li> </ul>

### Facteurs de mérite caractérisant les stockages d'énergie

- ✓ facilité de la réversibilité ;
- ✓ processus physicochimique du stockage ;
- ✓ fluide nature, températures, pression... ;
- ✓ réservoir naturel, artificiel, géologique... ;

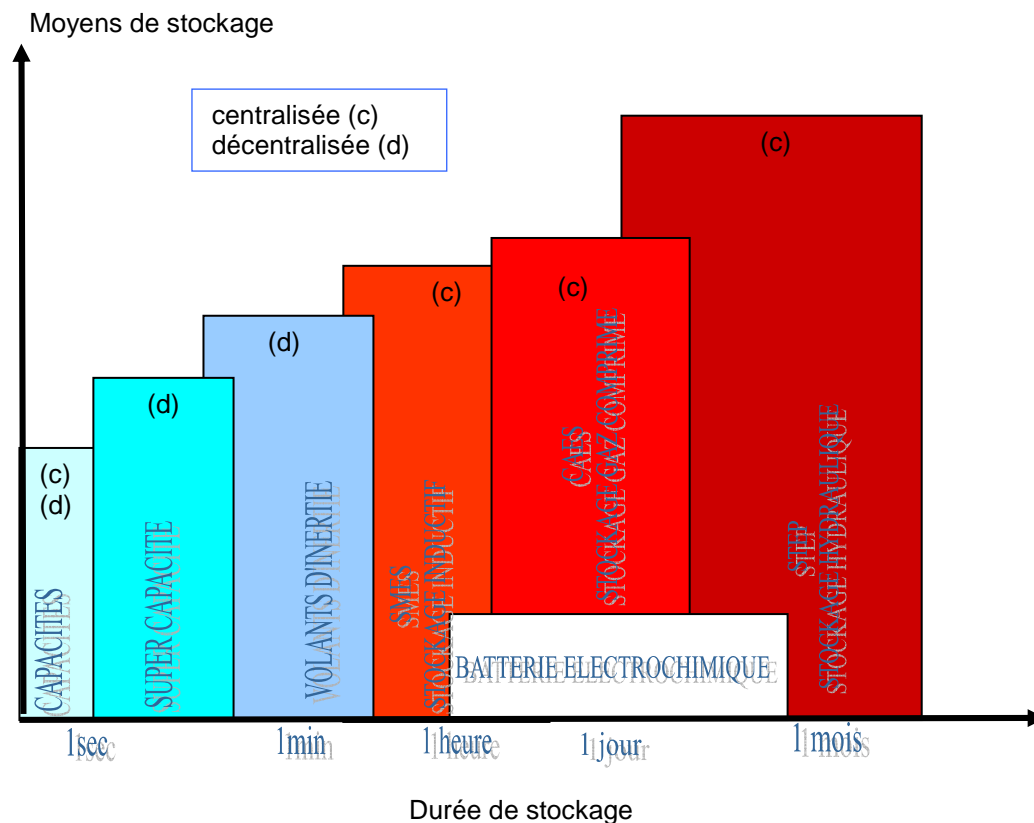
<sup>2</sup> Entre parenthèses figurent les abréviations internationales utilisées dans le langage de l'électricité.

<sup>3</sup> Nécessitent des convertisseurs de tension ou de courant en électronique de puissance pour la reconversion de l'énergie stockée en énergie électrique.

- ✓ quantité d'énergie stockée ;
- ✓ durée possible du stockage mesurée en mois, jours, minutes, secondes ;
- ✓ dynamique du stockage et du déstockage : temps de mise en stockage, temps de déstockage, nombre de cycles de stockage/déstockage admissibles, fréquence des cycles, durée de vie... ;
- ✓ rendement ;
- ✓ coût ;
- ✓ usage : centralisé sur réseau, décentralisé, utilisation locale ;
- ✓ positionnement relatif du stockage par rapport à la source et à l'utilisateur.

Pour une application donnée, ces facteurs de mérite sont les critères de comparaisons entre solutions possibles, le choix final est déterminé par des facteurs économiques (retour sur les coûts d'investissement et frais d'exploitation) et, de plus en plus, par l'acceptation sociétale de la solution retenue.

### Technologies de stockage de l'énergie électrique





## Conclusion

Pour approfondir le sujet du stockage de l'énergie, on peut procéder par deux approches différentes : à partir des applications nécessitant du stockage d'énergie ou à partir des technologies permettant le stockage. La correspondance entre ces deux approches s'exprime en termes de puissance, d'énergie, de temps de déstockage mis en jeu.

On peut aussi les classer en deux catégories, suivant que les stockages sont centralisés (sur réseau et relatifs à la production ou transport d'énergie) ou décentralisés (et relatifs à l'utilisation de l'énergie).

Dans la suite, afin de faciliter la lecture, nous choisirons l'approche par technologie, dont nous déduirons les applications.



### Q3. COMMENT STOCKER MASSIVEMENT L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE POUR L'EXPLOITER SUR LE RÉSEAU ?

Par stockage massif nous entendons stockage d'énergies supérieures à 50 ou 100 MWh, l'utilisation exclusive étant la production d'énergie électrique sur le réseau de transport.

Pour contourner l'impossibilité de stocker directement l'énergie électrique, il est nécessaire de passer par une étape intermédiaire qui consiste à la convertir en une énergie mécanique potentielle que l'on donne à un fluide stockable (eau, gaz, vapeur d'eau, air comprimé, etc.), pendant une durée déterminée, et ensuite de reconvertir cette énergie mécanique en énergie électrique dans une turbine dédiée au fluide entraînant un alternateur. Il importe que l'ensemble des opérations mises en oeuvre soit économiquement compatible avec des objectifs de prix relevant du marché de l'énergie électrique.

#### Critères de performances et de coûts

- ✓ Le fluide et sa mise en condition.
- ✓ Le réservoir de stockage (naturel, artificiel, géologique...).
- ✓ La quantité d'énergie stockée, la durée possible du stockage (mois, jours, heures).
- ✓ La dynamique du stockage/déstockage : temps de mise en stockage, temps de déstockage, nombre de cycles de stockages/déstockage admissibles, fréquence des cycles, durée de vie.

De ces critères se déduisent les coûts et les conditions de rentabilité, et en conséquence les possibilités d'exploitation.

L'énergie hydroélectrique est une forme générale de stockage massif d'énergie, dès l'instant où elle est associée à un réservoir, à un lac artificiel en amont. En effet, l'énergie potentielle de la masse d'eau est transformée à la demande et rapidement en énergie cinétique, puis en énergie électrique dans des turbines et alternateurs hydrauliques. Les forges et moulins des XIX<sup>e</sup> et du début du XX<sup>e</sup> siècles utilisaient de petits lacs pour stocker l'eau et ne la moulaient que pendant les périodes de travail des ouvriers. L'énergie hydroélectrique dépend de l'hydrologie, c'est-à-dire des quantités de pluie et de neige qui tombent sur le bassin versant et de la configuration géographique des lieux.

Par contre si l'on doit rendre réversible et dynamique le stockage de l'énergie, par exemple pour gérer l'impact sur le réseau des déséquilibres de consommation d'énergie aux heures pleines et aux heures creuses, il faut utiliser d'autres technologies :

- ✓ le stockage d'eau par gravité associé à des centrales hydrauliques de pompage (STEP) ;

- ✓ le stockage d'air comprimé et sa détente dans des turbines à gaz sans étage de compression, pour la fabrication d'électricité (CAES) ;
- ✓ le stockage d'énergie thermique (fluides divers dont la vapeur d'eau) et sa restitution dans une turbine comme précédemment.

Les deux technologies expérimentées de façon industrielle sont les STEP, en France et en de nombreux endroits dans le monde, et les CAES, en Allemagne et aux USA.

### La station de transfert d'énergie par pompage (STEP)

Une station de transfert d'énergie par pompage (STEP) est une installation de stockage hydraulique gravitaire. Elle comprend nécessairement un lac supérieur et une retenue d'eau inférieure, entre lesquels est placée l'usine hydroélectrique réversible de turbinage/pompage<sup>4</sup>. L'usine est reliée au lac supérieur par des ouvrages d'adduction d'eau (conduites forcées, éventuellement cheminées hydrauliques d'équilibre) et vers la retenue inférieure par des canalisations.

Le principe de fonctionnement des STEP est simple : pendant les heures creuses (coût de l'énergie minimum) on remonte l'eau par pompage pour la turbiner aux heures de pointe (coût de l'énergie maximum). L'intérêt est de pomper et de turbiner quand le rapport entre le coût marginal en période de pointe et le coût marginal en période creuse est supérieur à une certaine valeur, qui dépend des rendements en pompe et en turbinage. Pour information, le seul rapport de prix de revient entre heure pleine et heure creuse atteint des valeurs de l'ordre de 5.

Pour restituer 1 kWh sur le réseau il faut consommer 1,25 kWh en turbinage et 1,65 kWh en pompage /turbinage. La durée de stockage est quelconque, les débits de pompage avoisinent les 50 m<sup>3</sup>/s, et de turbinage les 75 m<sup>3</sup>/s. Le rendement est de 74 %.

---

<sup>4</sup> Turbine pouvant fonctionner en pompe et alternateur pouvant fonctionner en moteur électrique.

### Exemples de STEP

C'est en 1933 sur le lac Noir, dans les Vosges, qu'a été construite la première centrale de pompage.

Seuls des sites de montagne peuvent être équipés : en France, les STEP de Grand'Maison (1700 MW), Montézic (4x220 MW), Revin (4x180 MW), Le Cheylas (2x240 MW) ; en Belgique, dans les Ardennes, la STEP de Coe-Trois Ponts de 1060 MW. Quelques sites sont encore susceptibles d'être équipés, dans les Alpes et dans les Pyrénées, pour une puissance totale de quelques milliers de MW.

Au Maroc, dans la province d'Azilal, la STEP double d'AFOURER a été construite ces dernières années (2001-2005). Elle délivre 463 MW grâce à deux stations de pompage/turbinage, chacune à deux veines d'eau, ainsi que deux lacs supérieurs, situés à 800 mètres au dessus de la centrale hydraulique d'AFOURER (92 MW) et de son bassin sur l'Oued El Abid (ce bassin irrigue la région de Beni Mellal).

Par extension, une usine à marée motrice (comme celle de la Rance) peut être considérée comme une STEP, basée sur le jeu des marées et le dénivelé des hauteurs d'eau.

#### a) Avantages des STEP : technologie éprouvée et écologique

C'est une solution qui s'inscrit dans le cadre du développement durable, et qui est parfaitement compatible avec les exigences de la loi du 13 juillet 2005. Le fonctionnement des STEP est éprouvé et totalement écologique. Il ne dépend d'aucun combustible, dans la limite où le pompage ne fait pas appel à de l'électricité d'origine thermique, ce qui est en principe le cas en France. Enfin la STEP n'émet aucun gaz à effet de serre. La durée de stockage de l'eau dans le bassin supérieur est quelconque.

L'ensemble des matériels fait appel à une technologie classique, robuste, de très grande disponibilité.

#### b) Inconvénients des STEP : coûts d'exploitation élevés

La spécificité des sites à équiper et les investissements correspondants, leur éloignement par rapport aux grands centres de consommation, en particulier de ceux qui provoquent des pics de consommation, nécessite un transport d'énergie électrique sur d'assez grandes distances ce qui renchérit les coûts d'exploitation, il faut donc en tenir compte dans le bilan global.

## Le stockage d'énergie sous forme d'air comprimé (CAES)

Dans les CAES<sup>5</sup>, de l'air est comprimé aux heures creuses par un turbocompresseur accouplé à la turbine à gaz, puis est stocké dans des cavités souterraines. Aux heures de pointe, l'air comprimé est co-alimenté en gaz dans la chambre de combustion d'une turbine à gaz (éventuellement du type cogénération chaleur/électricité). Pour restituer 1 kWh sur le réseau, il faut consommer 0,75 kWh d'électricité en pompage, et brûler 1,22 kWh de gaz. La durée de stockage est de quelques heures.

### Exemples de CAES

Les CAES sont expérimentés depuis 1979 en Allemagne.

Deux installations font référence : en Allemagne près de Brême, l'usine de Huntorf délivre 290 MW avec une autonomie de deux heures, grâce à de l'air stocké sous 70 bars dans deux cavernes salines de 310 000 m<sup>3</sup> situées à 500 m de profondeur ; aux USA près de Cleveland, le CAES de Norton délivre 2700 MW, grâce à de l'air stocké sous 110 bars dans des carrières de calcaire à 570 m de profondeur.

### a) Avantages des CAES : localisation et rendement

Cette solution éprouvée a pour avantage de pouvoir être délocalisée au voisinage des centres de consommation et d'utiliser des turbines à gaz en cogénération chaleur/électricité, donc à haut rendement et à faible production de gaz à effet de serre, pouvant être mises en œuvre rapidement.

### b) Inconvénients des CAES : énergie pour comprimer le gaz

Ces installations exigent une consommation d'énergie électrique pour la compression<sup>6</sup>, puis une consommation de gaz dans la turbine avec émission de gaz à effet de serre. Certes elles consomment moins de gaz, et rejettent moins de CO<sub>2</sub> que des turbines à gaz classiques, mais cela doit nécessairement être pris en compte dans les bilans.

Elles exigent aussi une surveillance permanente ainsi qu'un entretien spécialisé des turbines et de l'étanchéité du réservoir de stockage de l'air comprimé.

## Comment utiliser le stockage massif de l'énergie électrique ?

Les deux solutions éprouvées semblent à première vue complémentaires puisque les STEP conviennent mieux aux régions montagneuses ayant des lacs en altitude ou plus simplement à des régions accidentées permettant de creuser des bassins surélevés au dessus d'un ruisseau, et que les CAES s'adaptent mieux aux régions à fortes densités humaine et industrielle qui sont à l'origine des demandes de pointes d'énergie.

Pour la France, et dans le cadre du marché de l'énergie libéralisé, y a-t-il un choix préférentiel à effectuer ?

<sup>5</sup> Compressed Air Energy Storage (CAES)

<sup>6</sup> Énergie dépendant du bouquet énergétique du pays, pouvant être par exemple d'origine nucléaire en France, ou d'origine fossile (gaz) en Allemagne.

### a) Comparaisons entre STEP et CAES

Dans toutes les comparaisons chiffrées que l'on pourrait être amené à faire entre CAES et STEP, on ne doit pas oublier de confronter les résultats avec ceux que l'on obtiendrait avec des turbines à gaz TAC en cogénération chaleur/électricité, alimentées de façon continue en gaz, qui présentent trois avantages majeurs sur les STEP et CAES (rapidité de réponse, rendement élevé), et n'ont pas de problème de stockage de gaz, mais un inconvénient majeur : le prix de revient du kWh !

On ne peut pas faire de comparaison dans l'absolu entre les STEP et les CAES. La comparaison n'a de sens qu'au travers de scénarios de référence portant sur des objectifs d'utilisation précis, sur les investissements, les coûts d'exploitation, les quantités d'énergie à stocker, les durées de stockage et de production, etc.

EDF, en tant que producteur, estime que, sur tous les scénarios étudiés y compris pour les productions de pointe, les STEP présenteraient un bilan économique global plus favorable que les CAES malgré un investissement plus important, en tenant compte des coûts d'exploitation liés à l'absence de combustible et à un nombre d'heures de fonctionnement plus élevé (2400 heures /an contre 1200 pour un CAES). Pour EDF, derrière les STEP, viendraient plutôt les TAC que les CAES dans la plupart des scénarios.

### b) Comment utiliser cette réserve d'énergie électrique massive dans le cadre du développement durable ?

Dans un avenir proche, les capacités actuelles de stockage indirect de l'électricité en France et en Europe ne satisferont plus les besoins. En effet, la demande va continuer à croître, nécessitant davantage d'énergie de pointe supplémentaire. Par ailleurs, le développement programmé des énergies éoliennes risque de mettre à mal la stabilité du réseau, en raison du fonctionnement intermittent de ce type de procédé.

En conséquence de nouvelles installations de type STEP ou CAES vont devoir être construites pour augmenter les capacités de stockage indirect.

Les possibilités d'utilisation de ces stockages répartis sont multiples, en fonction des circonstances et des bilans économiques, à savoir :

- ✓ assurer une fraction de la production au delà de la base pour fournir une partie de la pointe ;
- ✓ servir d'outil d'arbitrage sur le marché spot de l'énergie électrique ;
- ✓ fournir de l'énergie au gestionnaire du réseau de transport RTE à sa demande ;
- ✓ se substituer aux énergies intermittentes pour stabiliser le réseau en cas de défaillance aléatoire ;
- ✓ éviter l'utilisation de centrales émettant du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère ;
- ✓ permettre la commercialisation spécifique d'énergie verte d'origine donnée (éolienne, hydraulique).

Néanmoins dans le futur, en plus des stockages de masse, des stockages par batteries électrochimiques de grande capacité pourraient être utilisés sur des réseaux locaux décentralisés pour récupérer le jour l'énergie électrique stockée pendant la nuit.

### c) L'utilisation de l'hydrogène comme stockage indirect<sup>7</sup>

Dans les années 1980, une production de masse d'hydrogène avait été envisagée pour stocker de façon indirecte l'énergie électrique. L'idée consistait à profiter des heures creuses de consommation pour faire fabriquer par les centrales nucléaires de l'hydrogène par électrolyse de l'eau. Cela présentait l'avantage d'assurer une marche sans contraintes thermiques des équipements de génération de vapeur des centrales nucléaires et à maintenir constante leur production d'électricité.

Bien qu'il soit compatible avec les règles du développement durable, ce projet a été rapidement abandonné pour des raisons économiques et technologiques (à l'époque on ne savait pas reconvertir l'hydrogène en énergie électrique sans utiliser de piles à combustibles).

Aujourd'hui on sait brûler l'hydrogène dans des centrales électriques spécialement équipées, et l'hydrogène stocké peut être considéré comme un stockage indirect de l'électricité. Cependant, pour des raisons économiques et technologiques, il nous paraît peu probable que l'on revienne demain à l'idée d'électrolyser de l'eau en basse température. Même si des piles à combustibles parviennent à être développées pour les applications stationnaires et pour les transports, d'autres méthodes semblent aujourd'hui plus efficaces et plus économiques que l'électrolyse pour produire en masse de l'hydrogène : par exemple les diverses dissociations thermiques possibles de la vapeur d'eau ou l'électrolyse de l'eau à haute température.

---

<sup>7</sup> Voir le livret 10 Questions sur l'hydrogène, paru en mars 2005 dans la même collection de l'Académie des technologies que le présent document.



---

## Q4. QU'EST-CE QUE LE STOCKAGE INERTIEL ?

---

Ce stockage est relatif à une utilisation locale d'énergie électrique, stationnaire ou mobile.

Il se fonde sur la conversion instantanée de l'énergie mécanique en énergie électrique et, réciproquement, conversion dont les machines électriques sont naturellement le siège suivant qu'elles sont génératrices (si elles sont entraînées) ou motrices (si elles sont entraînantes).

### Stockage d'énergie cinétique accumulée dans un volant (FES)<sup>8</sup>

Le FES est un stockage d'énergie cinétique accumulée dans un volant d'inertie accouplé sur une même ligne d'arbre à une ou deux machines électriques tournantes, l'une étant toujours un alternateur débitant sur un réseau secondaire que nous appellerons *aval* et l'autre un moteur alimenté par un réseau que nous appellerons *amont*. Il n'y a pas de limites de puissance autres que celles de la faisabilité dimensionnelle de chaque partie tournante et de la ligne d'arbre. Les moteurs et les alternateurs (dimensionnés suivant les applications) ont une puissance variant entre quelques kW et quelques MW, pour une vitesse de rotation de quelques 50 000 tours/min à quelques 1 000 tours/min.

La puissance massique stockée dépend du matériau constituant le volant, choisi pour sa résistance à la force centrifuge : 1700 W/kg pour l'acier fretté, 2800 W/kg pour un verre époxy, 3700 W/kg pour un kevlar époxy. Le nombre de cycles de charges/décharges peut être très élevé, limité par les contraintes de fatigue.

Ce dispositif désolidarise électriquement les réseaux amont et aval : Le réseau aval n'est plus soumis aux microcoupures pouvant intervenir sur le réseau amont ; de plus le réseau aval continue à être alimenté en cas de disparition du réseau amont pendant une durée de quelques secondes<sup>9</sup>. Ce dispositif correspond à ce que l'on appelle une source d'énergie ou une alimentation stabilisée.

### Quelles applications pour le stockage inertiel ?

#### a) Marché des alimentations stabilisées

Le marché des alimentations stabilisées tournantes est considérable, parfois concurrent, parfois complémentaire de celui des onduleurs statiques de tension dans l'informatique, dans l'instrumentation et dans l'alimentation électrique des procédés de fabrication pour les produits finis.

En tant qu'équipements de secours, on utilise aussi des groupes électrogènes à volant, dont le dimensionnement est calculé pour maintenir constante la production d'énergie pendant

---

<sup>8</sup> Flywheel Energy Storage (FES).

<sup>9</sup> Cette durée dépend de la quantité d'énergie stockée dans le volant. Elle est calculée pour que, statistiquement, le réseau amont ait eu le temps d'être réalimenté ou pour que le procédé alimenté par le réseau aval (en rupture d'alimentation) puisse être arrêté, non pas en urgence, mais normalement, c'est-à-dire sans pénaliser la qualité de la production.

un temps statistique donné entre la disparition du réseau et sa réapparition (correspondant par exemple à la durée prévisionnelle des manœuvres d'enclenchement/déclenchement ou de commutation de réseaux).

### b) **Marché des transports**

Ces sources d'énergie sont aussi utilisées comme sources secondaires embarquées dans l'industrie des transports, autrefois dans les trolleybus pour les dérouter occasionnellement de leur ligne normale, et aujourd'hui en tant qu'alimentations autonomes pour certaines portions de lignes de tramways sur lesquelles on a décidé de supprimer les caténaires.

Cette solution est concurrencée par d'autres formes de stockage (super condensateurs en particulier).

### c) **Marché des sources de puissance tournantes**

Réciproquement, le réseau *amont* peut être rendu insensible aux à-coups transitoires de puissance dont la durée est de quelques dixièmes de seconde, générés par la charge sur le réseau *aval*. Pour ce faire, lors d'un à-coup de charge, le contrôle commande associé au groupe fait brutalement chuter la vitesse du moteur asynchrone<sup>10</sup> et du volant entraîné (de 5 à 10 % maximum), par rapport à la vitesse nominale.

Cette chute de vitesse de rotation provoquée libère de l'énergie cinétique que le groupe transforme en supplément d'énergie électrique, permettant de satisfaire la demande sans prélever d'énergie sur le réseau. Ensuite le contrôle commande fait remonter progressivement le groupe en vitesse jusqu'à la vitesse nominale de rotation, en prélevant de l'énergie sur le réseau. Autrement dit, la quantité d'énergie prélevée sur le réseau correspond à la quantité demandée par l'à-coup de charge, mais le système [volant alternateur contrôle commande] a effacé la pointe de puissance que le réseau aurait dû fournir s'il n'y avait pas eu l'inertie du volant, d'une part, et la conversion d'énergie mécanique en énergie électrique dans le moteur pour y remédier, d'autre part.

On parle alors de **source de puissance**. Ce dispositif était très fréquemment utilisé en métallurgie (sous le nom de groupe ILLGNER) dans des réseaux d'usine qui avaient une faible puissance de court circuit. C'était le cas de tous les équipements de laminage réversible jusque vers 1970 : l'énergie était fournie sous forme de courant continu aux moteurs des laminoirs réversibles par des groupes tournants à volant d'inertie accouplés à des moteurs asynchrones à glissement variable contrôlé alimentés par le réseau de l'usine (insertion de résistances rotoriques). Ce mode d'effacement d'à-coups de puissance par volants d'inertie est moins utilisé aujourd'hui du fait de l'augmentation de la puissance de court-circuit des réseaux de distribution et des possibilités de compensation dynamique de puissance réactive des réseaux électriques et de filtrage d'harmoniques apportées, en moyenne et haute tension, par l'électronique de puissance, en prélevant l'énergie nécessaire dans des condensateurs de puissance ([Voir Annexe 2 : Compensation de puissance réactive, page 62](#)).

### d) **Marché des sources impulsionnelles**

Hors les applications citées ci-dessus, les ensembles machines/volants d'inertie constituent des entraînements d'électrotechnique impulsionnelle capables de fournir d'énormes quanti-

---

<sup>10</sup> Un moteur synchrone ne conviendrait pas car il ne peut pas glisser (puisqu'il tourne à la vitesse constante dite de synchronisme imposée par la fréquence du réseau et par sa polarité), sinon il décrocherait par surcharge

tés d'énergie de décharge dans des temps très courts (quelques dixièmes de seconde) lors de fortes décélérations et ont leur place dans des applications spécifiques industrielles, nucléaires, militaires.

#### **e) Marché des procédés fortement dynamiques**

Le marché du stockage inertiel a repris de l'intérêt dans les procédés fortement dynamiques (temps de réponse inférieurs à la seconde) à la suite des progrès faits par les technologies associées : réalisation de machines électriques à grande vitesse de rotation (aimants permanents, rotors composites), mise en œuvre d'onduleurs alimentant ces moteurs en ondes de tension de moyennes fréquences (centaines voire milliers de hertz), volants en matériaux composites, paliers à grandes vitesses tangentielles (à vapeur d'huile, ou à gaz, ou à sustentation magnétique).



## Q5. QUELLE EST L'IMPORTANCE DU STOCKAGE PAR BATTERIES ÉLECTROCHIMIQUES ?

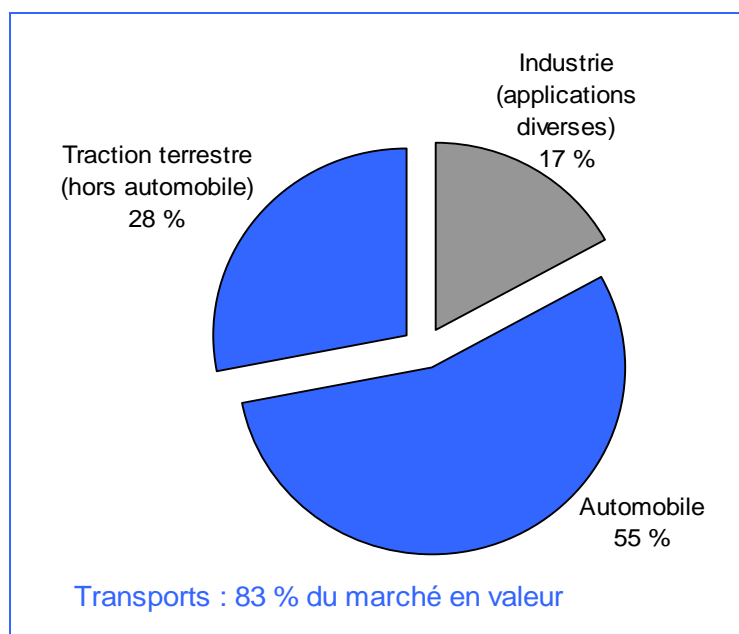
### Le stockage électrochimique réversible

Les exemples type sont les batteries électrochimiques (par définition rechargeables) et les piles (non rechargeables), qui fournissent de l'énergie électrique à un circuit extérieur sous forme de courant continu en basse tension, en transformant progressivement leurs éléments chimiques internes suivant une réaction d'oxydation/réduction aux électrodes. En fin de transformation (décharge), le stockage énergétique est vidé. Si la régénération des éléments initiaux sous l'effet du passage d'un courant électrique est possible (recharge), on parle de batterie. Dans le cas contraire, on parle de pile, jetable car non réutilisable.

Les facteurs de mérite des batteries sont les suivants : le nombre de cycles de charge/décharge supportés avec un niveau de dégradation acceptable de l'électrolyte, la puissance massique, l'énergie massique, la durée de la recharge, la plage de température de fonctionnement, et évidemment le coût.

Les batteries sont pour l'essentiel utilisées dans les transports terrestres (notamment dans l'automobile), où elles sont souvent utilisées comme batteries de démarrage. La quasi totalité de ces batteries (95 %) sont de type plomb-acide.

Répartition du marché mondial des batteries  
11 milliards US\$



Les batteries actuelles présentent trois points faibles dans les applications (comme l'alimentation des voitures électriques) : en premier, l'insuffisance de l'énergie massique, en second, un nombre de cycles de charges/décharges trop faible pour la durée de vie des applications qui les utilisent, et surtout un temps de recharge trop grand. Les batteries et les piles (particulièrement) posent un problème de recyclage en fin de vie.

## Évolution des batteries pour les transports terrestres

Des améliorations considérables sont apportées par les constructeurs, qui résultent des progrès réalisés sur les matériaux et électrolytes utilisés, la refonte de la connectique, l'entrelacement des feuilles minces des matériaux conducteurs, isolants, électrolytes. On espère qu'une production de masse permettra d'en réduire le coût. Ainsi on est passé après 2000 d'une énergie massique de 30 Wh/kg pour une batterie au plomb/acide (autonomie d'un véhicule électrique de 50 km) à 140 Wh/kg en 2004 pour une batterie au lithium (autonomie de 220 km) avec un objectif de prix de 250 US\$/kWh, soit 2,5 fois le prix de la batterie de démarrage au plomb (100 \$/kWh) bas de gamme.

En 2005, on commercialisait des batteries lithium polymère, par exemple un modèle de 85 Ah, 217 Wh, 155 Wh/kg, pesant 1,4 kg. On prévoit la commercialisation prochaine de batteries de puissance massique de 180 Wh/kg avec le lithium polymère solide, et dans un futur plutôt lointain de 350 Wh/kg avec le lithium soufre ou en nanotechnologie ce qui amènerait l'autonomie des véhicules à quelque 500 km ! Ces batteries pourront-elles respecter les contraintes spécifiques au transport terrestre technologiques, environnementales et surtout économiques ? C'est une autre étape à franchir.

## Batteries de secours de réseau électrique.

Des batteries prototypes de très grande puissance ont été développées ça et là pour secourir des réseaux électriques locaux, dans les gammes de 10 à 100 MWh. Compte tenu du caractère expérimental de ces productions, elles sont en nombre très limité. Ce type de batterie pourrait être utilisé pour faire du stockage journalier nuit/jour.

Les procédés les plus connus sont les batteries Redox-flow et le procédé Regenesys de Innogy à circulation d'électrolyte liquide. La quantité d'énergie stockée dans les batteries classiques est limitée par la quantité de composés chimiques solides qui se déposent sur les électrodes lors des réactions électrochimiques. Pour obtenir de grandes quantités d'énergie stockée, il faut utiliser des composés solubles dans l'électrolyte et provoquer une circulation forcée de l'électrolyte au travers de la batterie, suivant deux circuits disposant chacun de sa cuve de stockage, un par polarité.

## Conclusion

Au delà du marché actuel des batteries commercialisées en tant que produits, devrait se développer à court terme, dans le domaine des énergies basse tension, un marché de systèmes basé sur l'intégration de batteries (seules ou associées à des super condensateurs) dans des architectures de puissance ayant pour objet la maîtrise de l'énergie électrique. Trois grands domaines seront concernés :

- ✓ la voiture électrique qui pourrait alors se généraliser (et dont les hybrides serie, monocarburant actuels et à venir ne sont que des précurseurs) – puissances unitaires de quelques dizaines de kW qui multipliées par le nombre de voitures représenteront des GW à fournir par le réseau ;

#### Q5. Quelle est l'importance du stockage par batteries électrochimiques ?

- ✓ le stockage tampon d'énergies renouvelables (puissances unitaires de quelques MW) d'abord en utilisation décentralisée puis en liaison sur réseau ;
- ✓ les alimentations de secours fixes et mobiles (puissance unitaire dans la gamme de la dizaine de kW).

Ces développements sont conditionnés par les résultats de la recherche sur les batteries et sur leur environnement qui butent, tantôt sur des points insuffisamment étudiés, tantôt sur des points durs mais certainement franchissables. Les améliorations à apporter aux batteries sont de quatre ordres :

- ✓ augmenter le nombre de cycles de charges/décharges sans dégradation (accroître la durée de vie) et accroître l'énergie massique ;
- ✓ améliorer les tenues en température ;
- ✓ accroître la sécurité ;
- ✓ réduire les prix.

D'autres améliorations doivent porter sur le système, à savoir le développement d'une électronique de puissance adaptée et à bas prix (charge rapide, génération de niveaux de tension de sortie, etc.) et le contrôle commande programmé de l'ensemble de la chaîne énergétique spécifique à l'application concernée (par exemple, dans le cas d'un véhicule, la gestion de l'énergie puis l'assistance à la conduite).

## Les trois grands secteurs économiques des batteries

### a) Les transports terrestres

- ✓ Dans l'automobile :  
marché de produit (le marché actuel des batteries de démarrage) ;  
marché de système (le marché du stockage d'énergie pour les véhicules hybrides mono et biénergies, et le marché futur de la propulsion des véhicules électriques).
- ✓ Dans le transport lourd :  
marché de produit (le marché traditionnel) ;  
marché de système (la propulsion des véhicules urbains de servitude).

### b) Les énergies renouvelables (stockage décentralisé)

marché de système

### c) Les équipements portables

Batteries d'énergies supérieures au kWh (batteries lithium/ion/polymères)

Batteries d'énergies inférieures au kWh concurrencées par les piles à combustible au méthanol à recharges jetables (Voir Q6. Les piles À combustible sont-elles un moyen de stocker de l'Énergie Électrique ?, page 43).



---

## **Q6. LES PILES À COMBUSTIBLE SONT-ELLES UN MOYEN DE STOCKER DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE ?**

---

En théorie, les piles à combustible ne devraient pas avoir leur place dans ce document. En effet, ce sont des convertisseurs d'énergie et non pas des éléments de stockage.

Elles se comportent comme des groupes électrogènes tournants alimentés par des moteurs thermiques (par exemple un moteur diesel) : le stockage d'énergie est en fait le stockage du combustible. Dans le cas des moteurs thermiques, le combustible est le fuel, qui subit une combustion dans le moteur entraînant un alternateur. Dans le cas des piles à combustibles le combustible est l'hydrogène (ou un combustible riche en hydrogène, tel que le méthanol) : en présence d'oxygène, l'hydrogène subit une réaction électrochimique (inverse de l'électrolyse) produisant de l'eau en tant que résidu, de la chaleur ainsi que de l'électricité. Ces trois éléments, produits en quantités à peu près égales, sont récupérables en sortie du réacteur.

En langage de propulsion navale, on assimilerait les piles à combustibles à des turbo/alternateurs/redresseurs (T.A.R.).

Dans certaines niches d'applications, en particulier celles mettant en jeu de faibles énergies, des sous-ensembles [pile à combustible + réservoir de combustible rechargeable] ont de plus en plus tendance à se substituer aux batteries, car ils offrent une plus grande autonomie de fonctionnement.

En fait, il s'agit de remplacer les batteries lithium ions par des piles à combustible au méthanol DMFC<sup>11</sup>, sans reformeur, avec réservoirs de méthanol interchangeables de quelques dizaines de centilitres. A volume et masse à peu près équivalentes, ces piles à combustible offrent une autonomie dix fois plus grande que celle des batteries, et permettent d'intégrer des fonctionnalités nouvelles dans les appareils portables, telles qu'une caméra, un écran haute définition ou une puce Wi-Fi dans les téléphones portables de 3<sup>ème</sup> génération.

Les niches visées concernent le marché des équipements portables (téléphones, ordinateurs, notebooks, caméras, baladeurs, etc.) et une partie des alimentations d'équipements mobiles auxiliaires APU<sup>12</sup> ou sans coupures UPS<sup>13</sup>, d'énergie inférieure à 1 kWh. Il existe aussi des applications dans le domaine militaire.

Ce cas particulier de recherche de substitution ne peut être généralisé à d'autres secteurs d'activité car, d'une part, les piles à combustible ne sont pas suffisamment commercialisées, et, d'autre part, elles visent des applications de fourniture d'énergie électrique plus importante dans les transports (piles basse température PEMFC<sup>14</sup> alimentées en hydrogène), ainsi que de chaleur et d'électricité en cogénération dans le domaine stationnaire (piles PEMFC et piles à haute température SOFC<sup>15</sup>).

---

<sup>11</sup> DMFC (Direct Methanol Fuel Cell) : pile à combustible à réduction directe du méthanol.

<sup>12</sup> APU (Auxiliary Power Unit) : alimentation auxiliaire.

<sup>13</sup> UPS (Uninterruptible Power Supply) : alimentation sans coupure.

<sup>14</sup> PEMFC (dite aussi PEFC) : pile à combustible à membrane échangeuse de protons

<sup>15</sup> SOFC : pile à combustible à oxyde solide.

Aujourd'hui, les alimentations à base de piles à combustible sont nettement plus chères que les batteries. L'écart de prix est d'autant plus grand que la quantité d'énergie stockée est importante.

De même, la comparaison entre la voiture alimentée par pile à combustible PEMFC et la voiture électrique à batterie ne peut pas se restreindre à la comparaison entre [pile à combustible + stockage à bord d'hydrogène] d'une part et [batterie + recharge par le réseau] d'autre part.

Les deux chaînes énergétiques doivent être scrupuleusement comparées sur les quatre plans économique, environnemental, technologique, logistique et sociétal, pris dans leur intégralité, « du puits à la roue » suivant l'expression anglo-saxonne « from well to wheel ».

---

## **Q7. QUELLE PLACE POUR LE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE PAR CONDENSATEURS DE PUISSANCE ?**

---

### **Qu'est ce qu'un condensateur ?**

Les condensateurs sont des composants électrolytiques traditionnels à relativement faible évolution technologique. L'ordre de grandeur des capacités unitaires se mesure en microfarads, ou en millifarads dans le cas de capacités à films plastiques et électrodes multicellulaires.

Leur puissance massique étant très grande (100 kW/kg), ils conviennent à des décharges inférieures à quelques centaines de millisecondes. En revanche, leur énergie massique est très faible

Le stockage par condensateurs est utilisé principalement en électronique, c'est-à-dire en basse tension et en faible énergie, dans les alimentations à tension continue (redressement d'alternances). Cette solution sert à faire commuter les semi-conducteurs, et à filtrer, découpler, intégrer ou différencier des signaux analogiques.

En moyenne tension sur les réseaux électriques de distribution ou sur les réseaux d'usine (hors électronique de puissance mais en présence de stockage inductif), le stockage par condensateurs participe au filtrage passif d'harmoniques de tension et de courants de rang fixe et à la compensation de puissance réactive moyenne. En revanche, associé à l'électronique de puissance, il permet de rendre dynamiques ces fonctions et de les contrôler en temps réel, à savoir le filtrage actif d'harmoniques et la compensation dynamique de puissance réactive pour des circuits soumis à de fortes variations de charge.

Accessoirement, le stockage par condensateurs peut être utilisé comme source de puissance impulsionnelle. Sa limitation est la durée de vie réduite des condensateurs, qui supportent mal un trop grand nombre de cycles de charge/décharge.



---

## **Q8. QU'ATTENDRE DES SUPER CONDENSATEURS DE PUISSANCE DANS UN AVENIR PROCHE ?**

---

### **Qu'est-ce qu'un super condensateur ?**

Apparu vers 2000, le super condensateur de puissance est un composant électrotechnique dédié au stockage de puissance plutôt qu'à celui d'énergie. Il se présente sous la forme d'une cellule élémentaire (ressemblant physiquement à un condensateur électrolytique), dans laquelle le stockage est de type électrostatique et non pas électrochimique. Ce stockage résulte d'une répartition des ions issus de l'électrolyte suivant une double couche électrique au voisinage des deux électrodes de grande surface à base de charbon actif. Cela permet d'obtenir des puissances massiques élevées (de l'ordre de 10 kW/kg) et supportant de 500 000 à 1 million de cycles de charge/décharge.

Les cellules élémentaires des super condensateurs peuvent fournir ou absorber des puissances unitaires très élevées avec une constante de temps de quelques dizaines de secondes.

Pour fixer les idées, donnons les caractéristiques d'une cellule élémentaire relevées sur catalogue : capacité 2 700 farads, tension nominale 2,7 V, courant max. 600 A, poids 470 g, de forme cylindrique de 138 mm de hauteur et de 60 mm de diamètre, puissance massique 4 300 W/kg, mais atteignant des pics de 10 000 W/kg, résistance interne très faible de 0,4 mΩ, 500 000 cycles.

Cette solution commence à être commercialisée, sous forme de cellules élémentaires, et sous forme d'associations de cellules montées en série et en parallèle, dimensionnées en puissance et en durée de sollicitations, avec des possibilités de redondance en cas de défaut interne.

D'où la faculté de construire à la demande (pour des produits standardisés ou dimensionnés pour des applications) des sous-ensembles dédiés à une fonction de stockage dans des plages de 10 à 1 000 V, 50 à 1 000 A, avec des temps de charge/décharge de quelques secondes, supportant 500 000 cycles de charges/décharges avec un courant de fuite très faible (de l'ordre de 5 mA), ce qui correspond statistiquement à dix ans de fonctionnement, autrement dit à la durée de vie des applications, un temps de charge de quelques dizaines de secondes.

Cependant la mise en série de cellules élémentaires nécessite un dispositif d'équilibrage ou, à défaut, une surveillance des tensions individuelles des cellules.

La flexibilité dimensionnelle des sous-ensembles est grande, ce qui présente de l'intérêt pour les configurer en fonction des exigences des applications, en particulier dans le domaine du transport terrestre.

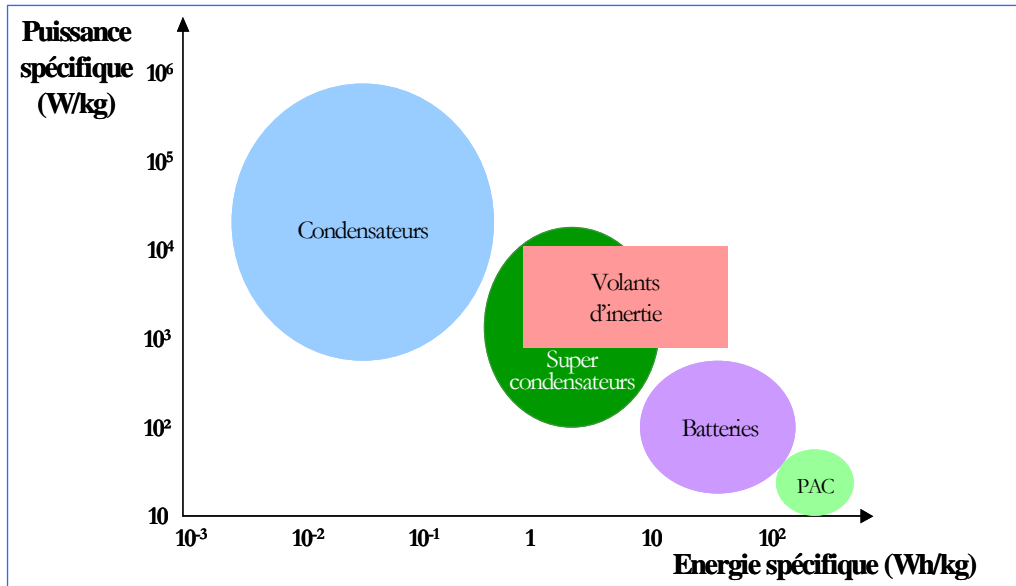
Remarquons que la puissance massique stockée dans des super capacités est du même ordre de grandeur que la puissance massique stockée dans des volants d'inertie.

Par contre les évolutions technologiques des cellules élémentaires sont loin d'être terminées (gain en performances de 5 entre 2000 et 2005 pour un prix divisé par 10). Certains développements permettent d'espérer voir commercialiser des cellules ayant des perfor-

mances en énergie massique se rapprochant de celles des batteries électrochimiques actuelles.

En fait, l'utilisation de super capacités nécessite l'emploi de convertisseurs d'électronique de puissance à faible tension et à forts courants de sortie pour gérer les échanges énergétiques, ce qui optimise les solutions mais renchérit les prix.

#### Positionnement relatif des moyens de stockage et d'énergie électrique



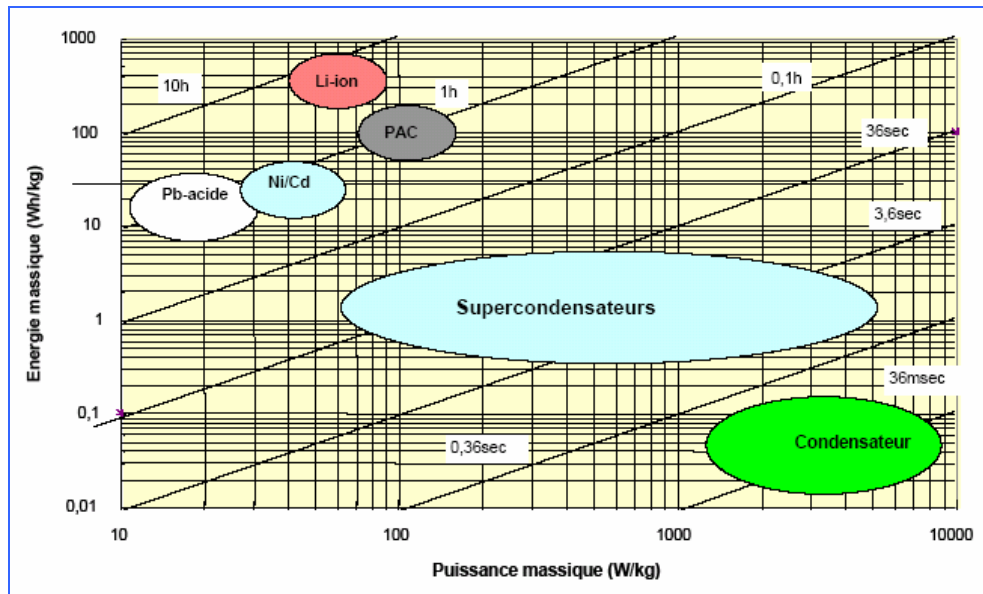
### Comparaison entre les performances des super condensateurs et celles des batteries

#### a) Puissance massique

Le diagramme de Ragone (page 39) rapporté au plan Énergie massique/Puissance massique montre que les super condensateurs peuvent libérer une puissance massique instantanée cinquante fois supérieure à celles des batteries électrochimiques, et une énergie massique plus grande que celle des condensateurs électrolytiques. Alors que les condensateurs électrolytiques conviennent pour des durées de décharge inférieures à quelques centaines de millisecondes, les super condensateurs permettent des décharges d'une durée comprise entre 1 et 10 secondes pour des temps de charge de quelques dizaines de secondes. De leur côté, les batteries offrent des décharges supérieures à la dizaine de minutes, mais nécessitent en compensation des temps de charge relativement longs, compris entre 1 et 5 heures.

#### b) Énergie massique

L'énergie massique des batteries est dix fois supérieure à celle des super capacités.

Diagramme de Ragone<sup>16</sup>

### c) Tenue en température

L'expérience montre que les super condensateurs ont une meilleure tenue en température que les batteries, mais leurs performances tendent à se dégrader entre -20 et -40 °C (augmentation de la résistance série).

### d) Durée de vie

La durée de vie espérée d'un super condensateur est de 10 ans, soit trois fois celle des batteries électrochimiques actuelles.

Le stockage par super capacités ne se substitue pas aux stockages précédemment décrits. Il les complète et peut s'associer à eux de façon hybride. En particulier il peut s'associer au stockage des batteries électrochimiques. Seule une analyse technico-économique poussée permet d'optimiser la solution à retenir pour une application donnée : par exemple associer super capacité et batterie pour un système autonome à forte dynamique, ou encore associer pile à combustible et super capacité (à la place d'une batterie) pour une propulsion de véhicule...

## Quelles sont les applications dévolues aux super condensateurs ?

Ce sont typiquement les applications de stockage de l'énergie avec restitution sous forme de puissance active dans des décharges durant quelques dizaines de secondes. Les super condensateurs sont de plus en plus utilisés dans le domaine des transports terrestres.

<sup>16</sup> Extrait de REE N°8 (09/2004) : Utilisation des super condensateurs pour le stockage de l'énergie embarquée - Gualous/Berthon/Galla.

### e) Application dans l'automobile

Alimentés soit par la batterie à l'arrêt, soit par l'alternateur en condition de marche, les super condensateurs s'intègrent naturellement dans les architectures des véhicules hybrides parallèles.

Ils assistent le moteur thermique au démarrage, récupèrent l'énergie de freinage, et assurent l'arrêt et redémarrage au feu rouge (stop and go). Ils pourraient servir de source de puissance pour les chaînes de traction répondant à la norme 42/24 V en lieu et place du 12 V traditionnel, offrant davantage d'énergie et surtout de puissance.

### f) Application dans les transports urbains

Trains de banlieues et tramways : récupération d'énergie de freinage, suppression locale de caténaires, marche électrique des motrices diesels en zones sensibles (aux pollutions et émissions de CO<sub>2</sub> et de bruit), assistance au démarrage des moteurs diesels, vraisemblablement substitution aux batteries de démarrage.

Autobus : comme dans l'automobile, participation à l'hybridation des chaînes de traction des autobus.

### g) Application future

En association avec des piles à combustibles les super condensateurs serviront de tampon et d'échangeur de puissance électrique appelée par les chaînes de traction des véhicules.

### h) Applications diverses

Alimentation d'appareils consommables (appareils photo), alimentation de secours de mémoires en informatique, récupération d'énergie de freinage (ascenseurs, arrêts contrôlés des machines de finition lors des disparitions de réseau), alimentation de sous ensembles autonomes (portes de secours de l'A380 par exemple)...



---

## Q9. À QUOI SERT LE STOCKAGE ÉLECTROMAGNETIQUE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE ?

---

### Superconducting Magnet Energy Storage (SMES)

Le stockage électromagnétique se fonde sur l'accumulation d'énergie électrique dans une bobine selfique parcourue par un courant continu, et sur son stockage quand elle est fermée sur elle-même. L'énergie stockée varie comme le carré du courant, d'où l'idée de recourir à la supraconductivité pour faire circuler de forts courants et pour ainsi stocker de grandes quantités d'énergie.

Le SMES doit être nécessairement couplé au réseau au travers d'un convertisseur d'électronique de puissance fonctionnant en redresseur et en régulateur de courant pendant la mise en stockage et en onduleur pendant la restitution sur le réseau de l'énergie stockée.

Le dimensionnement de la bobine est limité par les efforts électromagnétiques exercés sur les spires (d'où sa forme cylindrique ou éventuellement toroïdale), ainsi que par les valeurs admissibles du champ électromagnétique au centre. La valeur maximale du champ dépend de la nature de l'alliage qui constitue les brins du film semiconducteur.

Le point faible est le comportement du cryostat : celui-ci doit en effet compenser les variations de température de la bobine correspondant aux cycles de charge et de décharge en courant. D'où l'idée d'utiliser de préférence des fils supraconducteurs céramiques à haute température critique (-200 °C) plutôt que des supraconducteurs basse température (-270 °C) à base d'alliages de niobium pour minimiser les contraintes sur le cryostat.

### Avantages des SMES

Le rendement d'un SMES est très élevé, de l'ordre de 90 %. Sa taille est modulable à la demande, pour des énergies de 1 à 10 MWh. Il se décharge soit en énergie, soit en puissance, pouvant fournir jusqu'à 50 % de l'énergie stockée, et cela en moins d'une seconde. C'est une solution très intéressante comme source d'énergie impulsionnelle.

En principe un SMES peut être situé sur n'importe quel réseau, n'importe où. Son emplacement peut être optimisé au voisinage d'un centre de production ou au voisinage d'un centre d'utilisation, en fonction de l'objectif recherché. Il peut être installé en position fixe, éventuellement enterré (grandes énergies), ou mobile sur camion (énergies de l'ordre de 1 MWh),

### Inconvénients des SMES

Cette solution est très onéreuse en raison du prix des matières premières qu'elle utilise. Le SMES nécessite un relèvement du facteur de puissance du réseau, car il se comporte à l'égard des autres abonnés au réseau comme une charge réactive. Si l'on stocke de grandes

énergies, il est nécessaire de compenser le champ de fuite axial rayonné (en général par une réalisation du SMES sous forme de deux bobines en push-pull coaxiales) pour éviter de créer d'éventuelles perturbations électromagnétiques dans l'environnement.

Actuellement, on ne sait pas fabriquer des fils supraconducteurs à haute température critique de longueurs suffisantes pour former des bobines utilisables dans des applications industrielles !

## Applications des SMES

Les applications de SMES sont actuellement en nombre très limité, uniquement dans le but de démontrer leur faisabilité. Elles ont lieu essentiellement aux États-Unis.

A notre connaissance, il n'y a pas d'application en stockage d'énergie, depuis l'arrêt de l'expérimentation de la centrale de la Bonneville Power Administration (USA).

Les SMES sont utilisés en alimentation ininterrompue (UPS) pour des équipements sensibles (essentiellement par équipements mobiles), et également en régulation (compensation de puissance active, et surtout compensation de puissance réactive).

---

## Q10. COMMENT EST ORGANISÉE LA RECHERCHE SUR LE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE ?

---

De même qu'il n'y a pas de marché global du stockage de l'énergie électrique mais des marchés de niches, il n'y a pas de programme général de recherches sur le stockage de l'énergie, dont l'énergie électrique. Les recherches se font à l'intérieur des secteurs d'activité dont elles relèvent. En revanche la plupart des études menées en Europe sont largement cofinancées par des programmes nationaux ou européens, dont le programme européen Investire.

Ces recherches font aussi appel à d'autres disciplines connexes, telles que l'électronique de puissance et sa commande, la supraconductivité à haute température critique, le développement et l'intégration des piles à combustibles dans des systèmes énergétiques (applications au transport terrestre par exemple).

### Les acteurs de la recherche sur le stockage de l'énergie

- ✓ les constructeurs de produits tels que batteries, super condensateurs, dont les études (en général autofinancées) portent essentiellement sur les matériaux pour électrodes et leur mise en oeuvre, les électrolytes, les structures ;
- ✓ les laboratoires universitaires, qui s'intéressent aux caractérisations, modélisations, combinaisons et intégration dans des architectures nécessitant du stockage d'énergie électrique (applications de piles à combustibles par exemple) ;
- ✓ les industriels intégrateurs, en particulier dans le domaine des transports terrestres, qui étudient, au cas par cas, le mode de stockage optimal pour le problème particulier qu'ils ont à résoudre ;
- ✓ les militaires, qui s'intéressent aux applications portables, mobiles, aux armes électromagnétiques, occasionnellement à des applications diverses (catapultes électriques par exemple).

En France les grands organismes concernés par le stockage sont EDF, CEA, CNRS, Inrets, DGA. EDF est actif dans le stockage indirect massif de l'énergie électrique, et suit aussi avec intérêt le développement des véhicules électriques, ainsi que ce qui s'y rapporte (batteries électrochimiques entre autres).



---

## CONCLUSION

---

Nous avons présenté les moyens et les méthodes qui permettent aujourd'hui de stocker de l'énergie électrique dans toute la gamme des puissances utilisées. La plupart de ces stockages restent perfectibles, notamment les batteries électrochimiques.

Mais notre liste n'est pas limitative. Par exemple, nous n'avons pas mentionné l'énergie thermique pour stocker de façon indirecte l'énergie électrique. Or on sait que l'énergie thermique, insuffisamment exploitée jusqu'à ce jour dans le chauffage individuel et collectif par exemple, pourrait jouer un rôle très important dans le futur grâce aux progrès faits sur la tenue et le comportement thermiques de divers matériaux.

Le domaine de la recherche dans les matériaux, dans les produits, et surtout dans les systèmes pour stocker de l'énergie reste grandement ouvert.

Le contexte énergétique du 3<sup>ème</sup> millénaire diffère du précédent car l'utilisation de l'énergie doit répondre à trois impératifs interdépendants :

- ✓ réduire l'émission de gaz à effet de serre (d'un facteur 4 à l'horizon 2050 pour ce qui concerne la France) ;
- ✓ éviter autant que possible l'utilisation de carburants et de combustibles fossiles ;
- ✓ assurer l'indépendance énergétique nationale et européenne, tout en ne freinant pas la croissance économique et les modes de vivre individuel et social de chacun d'entre nous.

Dans le domaine de l'énergie, le stockage est un des moyens de participer à ce challenge, car il facilite le contrôle de la totalité de la chaîne énergétique sur les plans économique, environnemental et technologique, un peu à la façon dont l'énergie stockée dans un système physique permet de le stabiliser face à des perturbations extérieures, comme nous l'apprend la science de l'automatique.

Le potentiel d'actions qui en découle pour les ingénieurs et pour les économistes est énorme :

- ✓ permettre d'utiliser la totalité des énergies renouvelables intermittentes sous forme d'énergie électrique et de les utiliser localement ou de les envoyer sur le réseau ;
- ✓ régulariser la production et stabiliser le transport de l'énergie électrique ;
- ✓ éviter l'émission de gaz à effet de serre dans les transports terrestres et dans la production d'énergie électrique, en supprimant le recours aux centrales à combustibles fossiles polluantes ;
- ✓ donner une chance inespérée de construire des véhicules sans émission de gaz à effet de serre, ne dépendant plus du pétrole et du gaz naturel importés (dont les approvisionnements deviennent de plus en plus incontrôlables et onéreux pour des raisons géopolitiques) ;
- ✓ commercialiser l'énergie à meilleur compte.

Certaines de ces propriétés sont évidemment dépendantes les unes des autres.

À notre connaissance, il existe des réflexions sectorielles çà et là sur le stockage de l'énergie, mais aucune réflexion de synthèse. Pourtant, ce devrait être l'un des axes de la politique énergétique que la loi d'orientation sur l'énergie veut mettre en place. Il est temps de cesser de considérer le stockage comme une succession de niches indépendantes et autosuffisantes.

La conception d'un mode de stockage n'a de sens que de façon systémique, en partant d'une fonctionnalité à remplir au-delà du stockage proprement dit, incluant le contrôle des échanges, la supervision, la gestion du stock d'énergie. Transposée dans une entreprise de production de biens, cette synthèse correspond à la politique des stocks et des flux de produits en entrée et en sortie. On sait que ces politiques ont été à l'origine de bien des progrès dans les usines métallurgiques ou dans l'automobile. Pourquoi ne le seraient-elles pas dans la chaîne de production, de transport et d'utilisation de l'énergie ?

Ainsi que nous l'avons indiqué, il est nécessaire de faire progresser les batteries électrochimiques et les super condensateurs, puis leur tenue aux conditions d'exploitation des véhicules terrestres. Pourquoi ne pas rendre ces études prioritaires ?

Si l'on exclut la propulsion des véhicules par combustion directe de l'hydrogène, la plupart des prévisionnistes s'accordent à dire que l'automobile du futur (à l'horizon 2050) sera propulsée par l'électricité, et cela pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub>.

Trois solutions d'alimentations en énergie semblent encore concurrentes pour une même chaîne de traction électrique de véhicule :

- ✓ la voiture à pile à combustible associée à une batterie électrochimique ou mieux à un super condensateur ;
- ✓ la voiture électrique alimentée par batterie électrochimique, capable d'autonomie de plusieurs centaines de kilomètres, rechargée à partir du réseau électrique depuis un nombre très important de postes ;
- ✓ la voiture hybride série, bi-carburants, c'est-à-dire la voiture électrique précédente hybridée par un moteur thermique alimenté en carburant de synthèse permettant un complément d'autonomie kilométrique à celle fournie par les batteries, rechargées comme précédemment à partir du réseau.

Dans le premier cas, nous connaissons aujourd'hui les points durs sur lesquels butent les études sur la filière pile à combustible concernant la fabrication, la distribution, le stockage de l'hydrogène à bord, la circuiterie pour utiliser de l'hydrogène gazeux comprimé sous 700 bars ou liquide à -253 °C, puis celles concernant la fabrication, la catalyse, l'exploitation de piles à combustible basse température sous les contraintes environnementales spécifiques à l'automobile, sans parler des investissements à faire pour les infrastructures et autres acceptations sociales à obtenir concernant l'usage de l'hydrogène et la sécurité du public !

Dans les deux autres cas le périmètre des études à mener semble moins étendu, focalisé sur la batterie électrochimique et ses problèmes ardues de matériaux, de durée de vie ainsi que sur la recharge rapide à partir du réseau et la multiplicité des postes de recharge.

Dans un tel scénario, la production d'électricité d'origine nucléaire et la gestion des réseaux de transport et de distribution devront être revus, puisqu'une grande partie de

l'énergie dévolue au transport devra être fournie par eux, en plus de celle consommée dans l'industrie et l'habitat. Le déséquilibre dans la production entre jours et nuits, jours ouvrables et jours de repos, se trouvera en partie effacé et une partie de l'électricité produite quotidiennement se trouvera stockée dans les batteries !





---

## ANNEXES

---

### Annexe 1 : Principes de gestion du réseau

Le réseau électrique mutualise l'ensemble des moyens de production pour fournir en énergie électrique tous les consommateurs abonnés, c'est-à-dire raccordés à ce réseau.

A tout instant, le gestionnaire du réseau doit équilibrer la demande des abonnés et la production en énergie, puisque, d'une part, l'électricité ne peut pas se stocker directement et que, d'autre part, un excès de demande peut conduire à des coupures ou à un décrochage de centrales.

L'ajustement de l'offre à la demande est réalisé par l'agent « dispatcheur ». Il se fait suivant trois niveaux progressifs d'intervention :

- ✓ **un niveau primaire** correspondant à une réserve d'énergie immédiatement disponible : réaction automatique (régulation) de fourniture d'énergie correspondant à l'appel demandé en moins de 10 secondes par tous les groupes turbines alternateurs connectés sur le réseau ;
- ✓ **un niveau secondaire** : réaction automatique de rééquilibrage des échanges entre différentes zones et différents pays, entre 1 et 10 minutes ;
- ✓ **un niveau tertiaire**, opéré par le gestionnaire du réseau, qui reconstitue en 1 à 10 minutes les réserves d'énergie nécessaires pour les deux premiers niveaux d'ajustement.

L'ajustement fonctionne par démarrage d'unités supplémentaires, dans des délais qui varient de quelques minutes à trente minutes suivant les types de centrales électriques sélectionnées. On distingue deux niveaux d'ajustement :

- ✓ **le niveau tertiaire rapide**, constitué par des usines hydroélectriques classiques (en priorité celles de hautes chutes) et les STEP, par des centrales à turbines à gaz à cycle ouvert, et par la sélection de clients à effacer en urgence (ayant fait l'objet d'accords commerciaux négociés) ;
- ✓ **le niveau tertiaire différé**, constitué par des centrales thermiques et des centrales nucléaires.

Les énergies d'ajustement tertiaire rapide font l'objet de transactions d'achat et de vente à des cours généralement élevés.

En cas de baisse soudaine de production, l'incident non maîtrisé risque de se propager sur le réseau, et de provoquer des coupures de grande ampleur non contrôlées, qui peuvent avoir des conséquences sociales et économiques lourdes. Ces baisses de production ont pour origine des dysfonctionnements graves, des pannes dans les moyens de production (déclenchements de centrales), voire la baisse soudaine de production d'énergies renouvelables comme l'éolien ou le solaire.

Deux aspects sont à souligner : la soudaineté et l'imprévisibilité de la défaillance. La soudaineté se paie au travers des trois niveaux d'ajustement, en rémunérant les offreurs de réserve (production et effacement), ce qui correspond en France à quelques TWh/an (de 2 à 7). L'imprévisibilité se paie également, puisque le marché spot se fait la veille pour le lendemain (en fait à 6 heures avec facturation des écarts toutes les ½ heures) et qu'il est nécessaire d'annoncer la production et de tenir la prévision (correspond à 12 à 15 TWh/an). En cas de non-exécution de l'engagement le producteur défaillant est pénalisé.

En revanche l'hydraulique avec réserve d'eau, et en particulier les STEP, trouvent leur valeur dans la fourniture de capacité d'ajustement et cela dans des conditions de rentabilité satisfaisante.

## Annexe 2 : Compensation de puissance réactive

Dans un courant alternatif, la composante active de la puissance électrique totale est celle qui est transformée en travail utile (par exemple en couple et vitesse de moteurs électriques) ou en chaleur dans des récepteurs. L'autre composante, dite réactive, est celle qui est nécessairement dépensée pour créer les flux d'excitation des moteurs, des alternateurs et autres transformateurs, les flux de fuite électromagnétiques (par exemple dans les lignes de transport d'énergie), ou qui participe au stockage de l'énergie dans des inductances et dans des capacités localisées ou réparties. La consommation de puissance réactive se fait donc tout le long du réseau.

Les alternateurs des centrales sont dimensionnés pour fournir au réseau une certaine quantité de puissance réactive. Toute demande supplémentaire de puissance réactive conduit à des échauffements des alternateurs s'avérant nuisibles. C'est pourquoi il est nécessaire, sur un réseau, de maintenir constant le rapport entre puissance active et puissance totale (dit facteur de puissance, ou  $\cos \varphi$ ), quels que soient les aléas subis par le réseau.

Pour maintenir constant le facteur de puissance, on réinjecte sur le réseau, de façon contrôlée, de la puissance électrique stockée dans des capacités, des inductances, des batteries électrochimiques montées dans ce but en certains points des lignes, et jouant le rôle de compensateurs de puissance réactive ou de filtres d'harmoniques. C'est la compensation de puissance réactive.

Sur les réseaux dans lesquels les consommations de puissance réactive sont régulières, on se contente de maintenir le facteur de puissance à une valeur constante par exemple 0,8, en connectant directement sur le réseau des compensateurs passifs dimensionnés pour le niveau de puissance réactive souhaité.

Sur les réseaux dans lesquels les consommations de puissance réactive sont fortement variables, comme dans les réseaux d'usines métallurgiques (aciéries, laminoirs), on fait de la compensation de puissance réactive dynamique en connectant au réseau de façon sélective plus ou moins de capacités ou d'inductances au travers de convertisseurs d'électronique de puissance (jouant le rôle d'interrupteurs), dont le contrôle maintient en temps réel au niveau souhaité la puissance réactive sur le réseau. Des équipements similaires (mais spécialisés) peuvent aussi faire du filtrage actif d'harmoniques sur les réseaux, afin de les dépolluer des harmoniques dûs à des résonances ou à des commutations de composants d'électronique de puissance.

Les puissances mises en jeu sont de l'ordre du mégawatt.

Pour être complet sur le chapitre de la puissance réactive, mais aussi à titre anecdotique, citons le cas du transport de l'énergie électrique à très haute tension sous forme de courant continu (HVDC). Ce procédé nécessite des postes de conversion à chaque extrémité de ligne : redresseur d'un côté et onduleur de l'autre, à base de thyristors autopilotés par la fréquence de chaque réseau alternatif. Ces réseaux se trouvent donc désynchronisés, tout en échangeant de l'énergie électrique. Dans chaque convertisseur, il faut fournir ou absorber la puissance réactive de commutation nécessaire à l'allumage et à l'extinction des thyristors à partir d'inductances de phase de très faibles valeurs.

Ces applications relatives au réseau de transport d'énergie ne sont que la transposition, dans le domaine des grandes puissances, de techniques bien connues en électronique, à savoir les conversions alternatif/continu et continu/alternatif, le filtrage, la régulation de tension qui, toutes, supposent un stockage d'énergie électrique dans des capacités et des inductances.