

## STOCKAGE DE L'ÉLECTRICITÉ



**Étudiants :**

**Guillaume GILLERY**

**Maxime LEMETAIS**

**André PHILIPPE**

**Jean PROST**

---

**Enseignant-responsable du projet :**

**Francois GUILLOTIN**



Date de remise du rapport :

**17/06/2017**

Référence du projet :

**STPI/P6/2017 – N°32**

Intitulé du projet :

**STOCKAGE DE L'ÉLECTRICITÉ**

Type de projet :

**BIBLIOGRAPHIQUE**

Objectifs du projet :

***L'objectif de ce projet est de définir les principaux moyens de stockage de l'électricité et d'étudier leurs différentes applications possibles.***

Mots-clefs du projet :

***stockage – électricité – technologies – applications***

## TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction.....	5
2. Méthodologie / Organisation du travail.....	6
3. Travail réalisé et résultats.....	7
3.1. Le stockage électrochimique.....	7
3.1.1. Classification.....	7
3.1.2. Les différents problèmes rencontrés par les batteries.....	11
3.2. Le stockage électromagnétique.....	13
3.2.1. Les condensateurs.....	13
3.2.2. Les supercondensateurs.....	13
3.2.3. L'usage des supercondensateurs pour le stockage de l'électricité.....	15
3.3. Le stockage mécanique.....	17
3.3.1. Le stockage par station de pompage.....	17
3.3.2. Le stockage par volant d'inertie.....	20
4. Conclusions et perspectives.....	24
5. Bibliographie.....	25

## 1. INTRODUCTION

L'un des problèmes les plus présents de notre temps est la production de l'énergie et de son stockage. Notre économie et les politiques actuelles nous font consommer de plus en plus quotidiennement. Les entreprises et les ménages deviennent gourmands en ressources à cause des nouvelles technologies qui ne fonctionnent, en majorité, qu'avec du courant électrique. Depuis quelques décennies, les centrales de production d'énergie se sont multipliées pour nourrir la demande croissante du monde et ne répondent à la demande qu'en temps réel. Ce procédé est efficace, mais présente certains défauts. La principale difficulté est de suivre la demande au cours de la journée, chaque mois et chaque année. En effet, la demande n'est pas constante au cours de la journée. La nuit, en milieu de matinée et d'après midi, nous observons des heures creuses de consommation de courant, et a contrario des heures pleines, où la demande explose.

L'intérêt du stockage de l'énergie est de récupérer l'énergie créée dans les heures creuses pour le distribuer quand il y a de la demande. Aujourd'hui, la plupart des centrales comme les centrales nucléaires, consomment aussi vite leur combustible qu'il y ait une faible ou une forte demande en électricité.

D'autre part, le développement de nouvelles technologies, telles que la voiture électrique ou les appareils électroniques, de plus en plus présents, est directement lié à l'augmentation des capacités de stockage de l'électricité.

Les problèmes du stockage de l'énergie sont le coût des technologies, leur viabilité, leur disponibilité, leur efficacité et leur domaine d'exploitation. Néanmoins, de nombreux systèmes de stockage existent déjà et sont couramment utilisés, pendant que d'autres sont en cours de développement. Dans ce projet physique, nous allons vous présenter différentes solutions au problème du stockage de l'électricité.

## **2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL**

Pour effectuer nos recherches bibliographiques de façon organisée, nous avons décidé de d'abord nous familiariser avec les différentes technologies de stockage de l'électricité, en effectuant des recherches globales. Ensuite, nous nous sommes répartis le travail de manière à étudier en détail un type de technologie de stockage de l'électricité. Puis, nous avons mis toutes nos parties en commun pour les relire et les commenter afin d'éventuellement corriger des passages si nécessaire. Au final, voici notre répartition des tâches réalisées :

### **3.1. Le stockage électrochimique :**

Maxime LEMETAIS

### **3.2. Le stockage électromagnétique :**

Jean PROST

### **3.3. Le stockage mécanique :**

#### **3.3.1. Le stockage par station de pompage :**

André PHILIPPE

#### **3.3.2. Le stockage par volant d'inertie :**

Guillaume GILLERY

### **Mise en page, relecture, introduction et conclusion :**

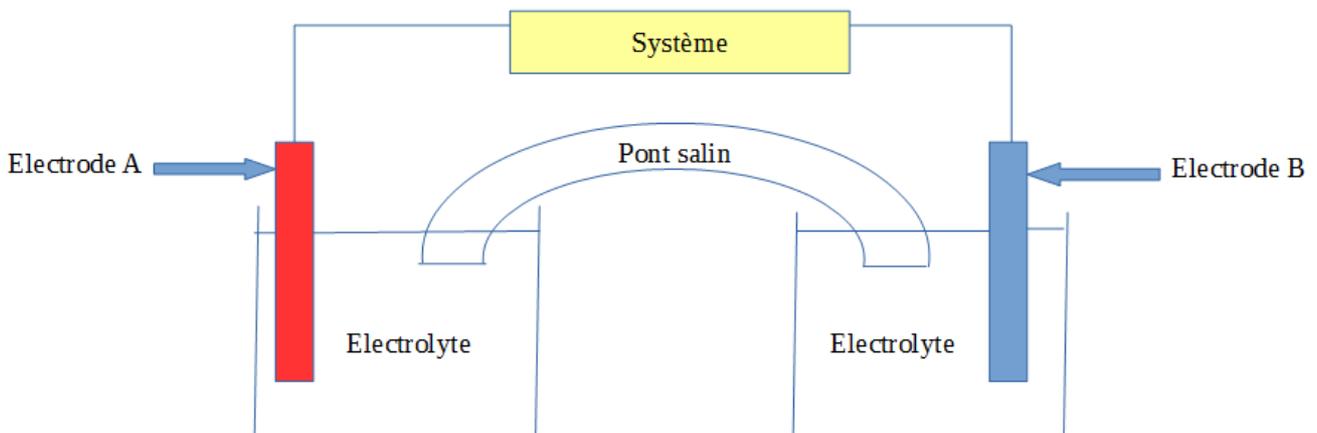
Guillaume GILLERY, Maxime LEMETAIS, André PHILIPPE, Jean PROST

### 3. TRAVAIL RÉALISÉ ET RÉSULTATS

#### 3.1. Le stockage électrochimique

Ce mode de stockage utilise des accumulateurs dont le principe repose sur le fait de séparer les ions des électrons afin de récupérer l'énergie liée au déplacement de ces derniers.

Le schéma d'une pile peut-être simplifié comme ci-dessous. Il faut un oxydant et un réducteur pour créer une différence de potentiel, une solution électrolyte pour permettre le déplacement des ions, et un pont salin pour le passage des ions d'une électrode à l'autre, deux électrodes munies de fils conducteurs (généralement en cuivre) pour transmettre l'énergie à notre système.



##### 3.1.1. Classification

La nature d'une batterie électrochimique est principalement déterminée par le couple rédox la caractérisant. En fonction des couples, les applications sont différentes. De nombreuses propriétés de la batterie dépendent de ce couple. Ci-dessous, le tableau récapitule les différents couples rédox et leurs intérêts :

	Pb/Acide	Ni/Cd	Ni/MH	ZEBRA	Li/Phosphate	Li/ion	Li/polymère
Énergie spécifique Wh/kg	30 à 50	45 à 80	120	120	120 à 140	150 à 190	150 à 190
Densité d'énergie Wh/L	75 à 120	80 à 150	220 à 330	180	190 à 220	220 à 330	220 à 330
Puissance en pointe en W	700	inconnue	900	900	800	500 à 1000	200 à 300
Charge/décharge	400 à 600 (étanche)	2000	1500	800	>2000	500 à 1000	200 à 300

	1200 (tubulaire)						
Autodécharge par mois	5 %	20 %	30 %	12 %/jour	5 %	10 %	10 %
Tension nominale en V	2	1,2	1,2	2,6	3,2	3,6	3,7
Gamme de température de fonctionnement (en °C)	-20 à 60	-40 à 60	-20 à 60	-40 à 50	0 à 45 (charge)  -20 à 60 (décharge)	-20 à 60	0 à 60
Avantages	Faible coût	Fiabilité, performance à froid	Très bonne densité d'énergie	Très bonne densité d'énergie	Très bonne densité d'énergie	Excellente énergie et puissance	Batteries mince possibles
Inconvénients	Faible énergie, mort subite	Basse énergie toxicité	Coût des matériaux de base	Puissance limitée, auto-consommation	Charge à basse Température	Coût Sécurité des gros éléments	Performance à froids
Ordre de prix (E/kWh)	200 à 250	600	1500 à 2000	800 à 900	1000 à 1800	2000	1500 à 2000
Coût relatif	0,8 à 1	0,75 à 3	0,75 à 4				
Rendement	70% à 75 %	70% à 90 %	66 %	99,9 %	90 %	>90 %	99,9 %

L'énergie accumulée et non redonnée lors de la décharge est convertie en chaleur.

### Les batteries plomb-acide :

Les batteries au plomb sont apparues dès le XIXème siècle. C'est le type de batterie le plus utilisé à ce jour. Ce type de batterie est employé dans l'industrie notamment dans le domaine de l'automobile et de la traction. Il existe différentes sortes de batterie aux plomb se distinguant par leur conception et leur domaine d'application. Les recherches actuelles sur ce type de batterie reposent sur l'architecture interne de la batterie.

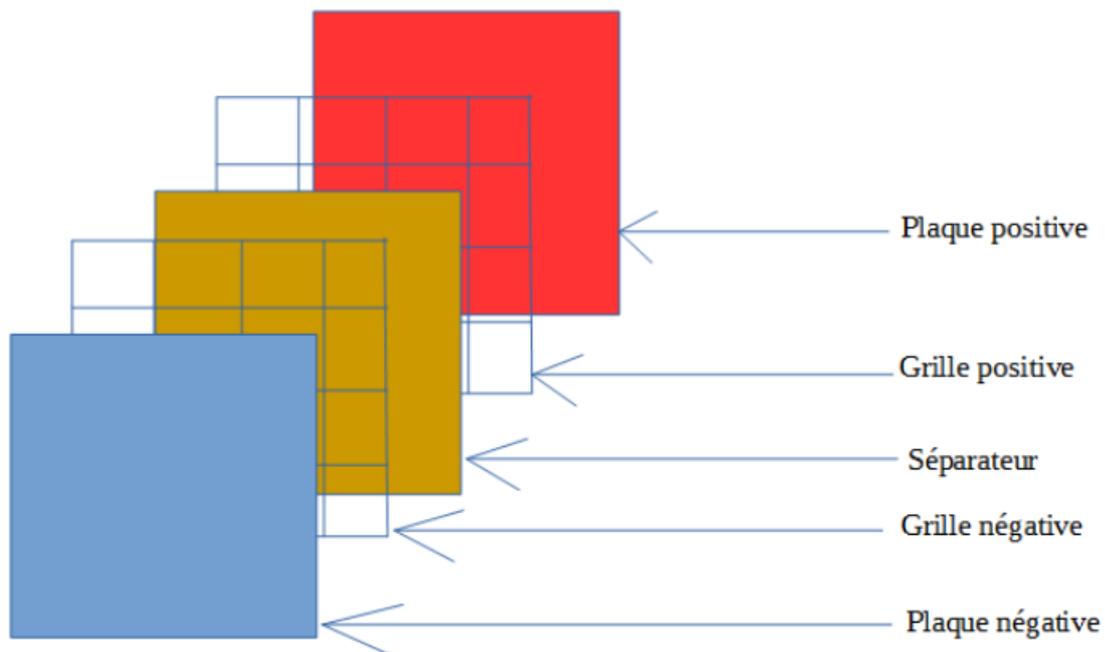
Les **batteries dites de démarrage** sont des batteries constituées d'un grand nombre de plaques fines qui leur permet de fournir une forte intensité au démarrage, par exemple pour une voiture (voir schéma ci-dessous). Elles doivent être en permanence chargées sous peine de se dégrader, résistent très mal aux décharges profondes et subissent une auto-décharge importante. Elles sont surtout utilisées dans le domaine de l'automobile.

Les **batteries de traction** sont des batteries constituées d'un grand nombre de plaques (voir schéma ci-dessous). Ces plaques sont plus épaisses que dans une batterie de démarrage. On utilise souvent un alliage Pb/Sb pour ce type de batterie. On utilise ces batteries pour des applications photovoltaïques.

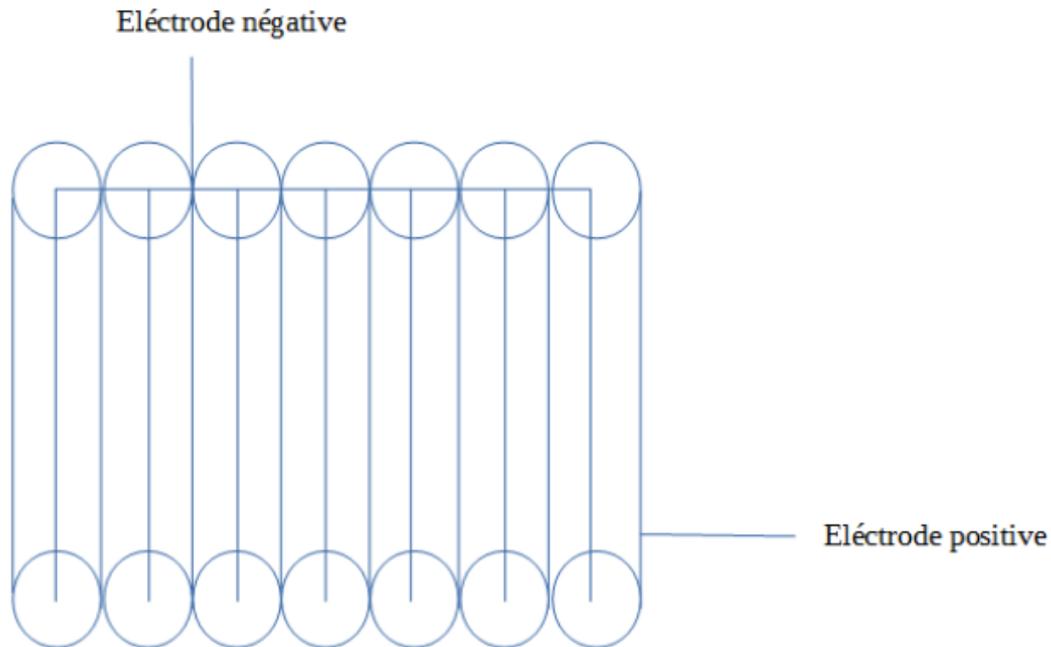
Les **batteries stationnaire de types ASI** (Alimentation Sans Interruption) sont utilisées pour des relais de télécommunications ou des salles informatiques. Elles sont généralement constituées d'un alliage Pb/Ca. Ces batteries ont une auto-décharge très faible de 1 à 2 % par an. Elles sont conçues pour être chargées en permanence. On appelle ces batteries stationnaires pour les distinguer des batteries de voitures.

Les **batteries tubulaires** sont des batteries stationnaires. Elles se distinguent des autres technologies par le fait qu'une grande réserve d'électrolyte se situe au-dessus des électrodes (voir schéma ci-dessous). Ces batteries souffrent de la stratification de l'électrolyte.

### Schéma d'une batterie de traction et de démarrage



## Schéma d'une batterie tubulaire



### **Les batteries au nickel :**

Il existe différents types de batteries au nickel. Les batteries au cadmium, au zinc, au métal hydrure et à l'hydrogène.

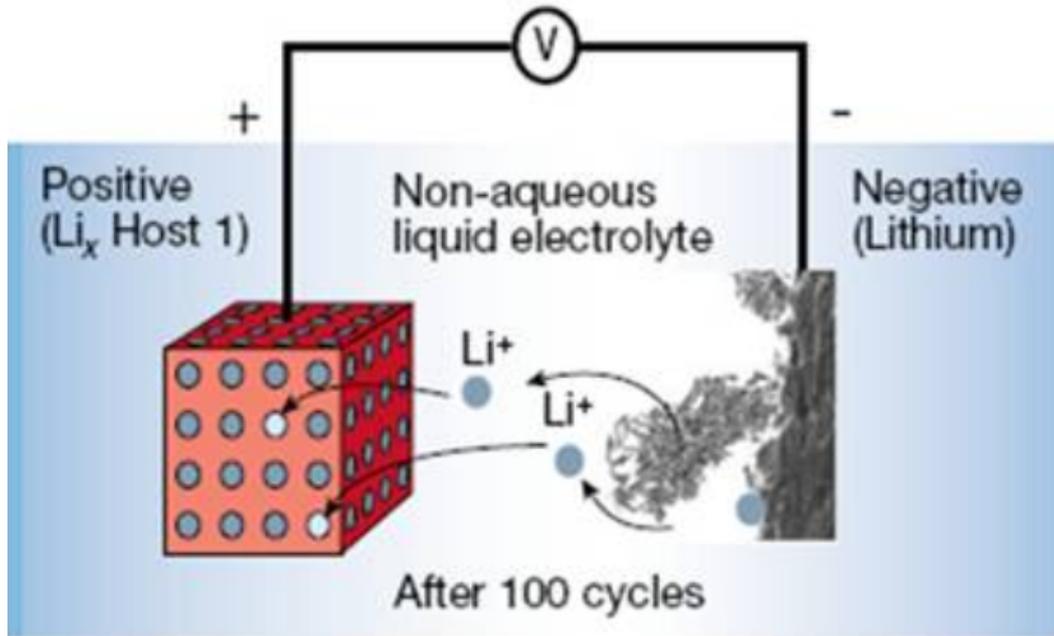
Les batteries nickel-cadmium (Ni/Cd) ont été développées en 1950 en Allemagne. Ces batteries nickel-cadmium sont principalement fabriquées avec des électrodes frittées ou en mousse. Auparavant, elles étaient faites en tubulaire. Malgré les très bonnes performances de ces batteries, il a été préféré celles en mousse car elles étaient moins coûteuses.

Les batterie nickel-métal hydrure (Ni/MH) ont une amplitude de variation de tension moins forte que les batteries Ni-Cd. Le grand avantage de ces batteries est le fait qu'elles possèdent une bonne cyclabilité et une forte puissance. En revanche, le coût des matériaux est élevé et elles possèdent une faible densité énergétique. Elles présentent également un danger toxicologique.

Ces batteries sont très utilisées en tant que batteries de secours pour les avions et la sécurité ferroviaire du fait de leur grande fiabilité.

### **Les batteries au lithium :**

Depuis quelques années, des batteries au lithium ont été développées. En effet le lithium, élément à la fois le plus électropositif et le plus léger parmi les métaux possède la meilleur densité énergétique. Toutefois, ces batteries possèdent un inconvénient majeur. Elles sont susceptibles d'exploser suite à la formation de dendrites à la recharge. Ces batteries sont utilisées dans nos ordinateurs, nos téléphones, et sont de plus en plus utilisées dans le transport automobile avec l'apparition des voitures hybrides et électriques, comme l'entreprise TESLA qui commercialise des véhicules et des moteurs électriques par exemple.



### Les batteries chaudes :

Ces dernières années, l'avenir des batteries semble se tourner vers des batteries au sodium (Na/S et Na/Air). On appelle batteries chaudes les batteries ZEBRA au Na/Cl développées depuis 1975, car elles doivent être en permanence maintenues à une température avoisinant 300°C.

## 3.1.2. Les différents problèmes rencontrés par les batteries

### Les problèmes de sulfatation :

La réaction chimique qui a lieu après la décharge de la batterie au plomb conduit à la formation de cristaux de sulfate de plomb sur les bornes positives et négatives. Lors de décharges profondes, les cristaux formés vont empêcher la réaction de se faire dans le sens inverse et donc la batterie de se recharger. Une couche de sulfate de plomb s'est formée entre les électrodes et l'électrolyte. Il est possible de dé-sulfater une batterie en envoyant de fortes impulsions électriques à la fréquence de résonance de la batterie pour « casser » la couche de sulfate de plomb. Toutefois, il n'est possible de dé-sulfater la batterie qu'au maximum 48 heures après la décharge complète. Après ce délai, la réaction devient irréversible et la batterie inutilisable.

### Les problèmes de stratification :

La stratification est un phénomène qui ne concerne que les batteries à électrolytes liquides. Le phénomène de stratification se produit dans une batterie plomb-acide lorsque l'acide de densité supérieure à l'eau tombe au fond de l'électrolyte. La partie inférieure de la batterie va alors être surchargée puis subir un phénomène de corrosion alors que la partie supérieure finira par sulfater. Pour remédier à ce phénomène, il faut procéder à un dégazage de la batterie tout en appliquant une tension de charge ce qui permet de mélanger à nouveau l'acide et l'eau dans l'électrolyte.

**Le phénomène de perte de masse :**

L'usage naturel de la batterie use la matière des plaques qui se dépose au fond de celle-ci. Ce phénomène se produit tout au long de l'utilisation de la batterie et est irrémédiable.

**Les problèmes de gazage :**

Sur une batterie étanche, lorsque celle-ci est surchargée, l'eau contenue se transforme en gaz  $O_2$  et  $H_2$ . Ces gaz vont déclencher l'ouverture de la valve de sécurité et la batterie va ainsi perdre de l'eau et donc de l'électrolyte.

**Le phénomène de corrosion :**

L'acide ou le cation contenu dans l'électrolyte va attaquer l'anode (ou l'électrode positive) et la détruire. Ce phénomène se produit surtout à hautes températures. Il est possible de prévenir la corrosion en appliquant un spray gras comme de la vaseline sur les électrodes. Si la corrosion a déjà commencé, il est possible de nettoyer les électrolytes et d'enlever la couche de corrosion.

**L'apparition de dendrites :**

Sur des batteries au lithium-ion, des dendrites peuvent apparaître. Les dendrites sont des pics de lithium qui, lors d'une violente recharge ou décharge vont se former sur les bornes positives et négatives. Lorsque deux dendrites se touchent, il y a un court-circuit et les batteries peuvent exploser. Lors des premières commercialisations des batteries lithium-ion, ce fut un véritable problème pour des constructeurs comme Sony ou Samsung qui ont dû rappeler des millions d'appareils.

## 3.2. Le stockage électromagnétique

### 3.2.1. Les condensateurs

#### Principes de base :

Un condensateur est un composant électronique formé de 2 armatures conductrices (électrodes) en influence totale séparées par un matériau isolant (diélectrique). Le condensateur permet de stocker de l'énergie sous la forme d'un champ électrostatique. Dans un circuit électrique, il est représenté par le symbole suivant :



Lors de la charge du condensateur, les charges positives s'accumulent sur une électrode tandis que les charges négatives s'accumulent sur l'autre. Il se crée alors une tension aux bornes du condensateur.

Lors de sa décharge le condensateur se comporte comme un générateur : sous l'effet de la différence de potentiel, les électrons stockés dans l'électrode négative, attirés vers l'électrode positive se déplacent dans le circuit, créant ainsi un courant.

#### Capacité d'un condensateur et tension de service :

La charge stockée par le condensateur est proportionnelle à la tension à ses bornes. Par définition, la capacité  $C$  d'un condensateur, en Farad, correspond au rapport entre sa charge  $Q$  sur l'électrode positive ( en Coulomb) et la tension  $U$  à ses bornes (en Volt) :

$$C = \frac{Q}{U}$$

La capacité d'un condensateur dépend de la surface  $S$  de ses armatures (en  $m^2$ ), de la distance  $e$  entre les deux armatures (en m) et de la permittivité  $E$  du diélectrique (en  $F.m^{-1}$ ) :

$$C = E \frac{S}{e}$$

La capacité est la principale caractéristique du condensateur, avec sa tension de service, qui correspond à la tension maximale que l'on peut appliquer entre ses bornes pour l'utiliser dans des conditions optimales. Il est important de respecter cette tension, en effet, si elle est dépassée, on risque un claquage du milieu diélectrique, c'est à dire une transformation du milieu isolant en milieu conducteur sous l'effet d'un champ électrique trop élevé. Ce claquage entraîne un court-circuit et endommagement de manière irréversible le condensateur.

### 3.2.2. Les supercondensateurs

#### Principes de base :

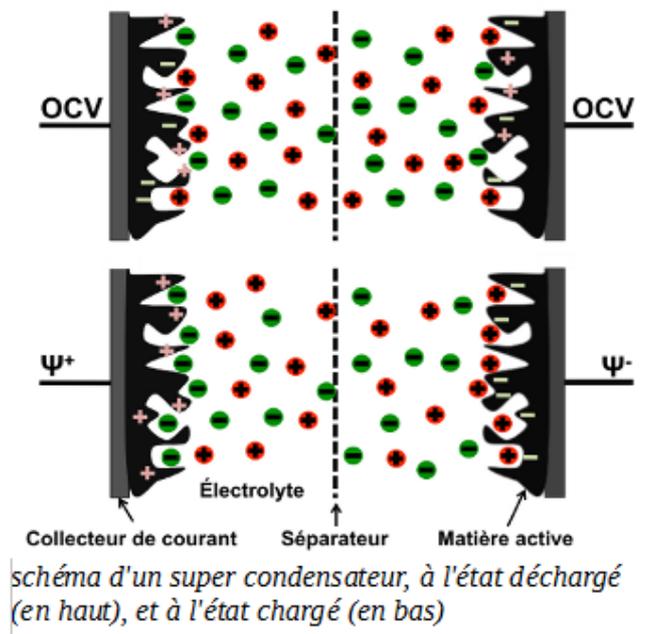
Le principe de fonctionnement du supercondensateur est à la croisée entre celui des condensateurs et celui des accumulateurs électriques (batteries). Comme le condensateur, le supercondensateur est composé des 2 armatures conductrices (aussi appelées électrodes), mais à la place du milieu

diélectrique, l'espace entre les 2 armatures est rempli d'un milieu électrolytique, contenant des ions positifs et négatifs pouvant se déplacer, comme dans les accumulateurs électriques.

A l'état chargé, comme pour le condensateur, une armature concentre les charges positives et l'autre les charges négatives. Ainsi les ions positifs contenus dans l'électrolyte, attirés par les charges négatives, vont se répartir sur la surface de l'armature chargée négativement, et, de même, les ions négatifs vont se répartir sur la surface de l'armature chargée positivement. C'est ce qu'on appelle la double couche électrique. Le stockage de l'énergie est donc électrostatique et non pas faradique (chimique) comme dans le cas batteries, puisqu'il n'y a pas de réaction électrochimique.

Pour augmenter la capacité des supercondensateurs, on dispose des matériaux poreux tels que le charbon sur la surface des armatures, afin d'augmenter la surface disponible pour le dépôt des ions, et ainsi augmenter le nombre de charges stockées. Ces matériaux poreux à la surface des électrodes constituent la matière active.

Entre les deux électrodes, un séparateur permet d'éviter les courts circuits en isolant électriquement les 2 électrodes tout en permettant le passage des ions.



### Les matériaux utilisés :

On distingue 2 types de supercondensateurs. Les supercondensateurs de type électrostatique dont le fonctionnement est essentiellement basé sur celui de la double couche électrochimique (voir ci-dessus), et les supercondensateurs électrochimique (hybrides) dans lesquels une réaction d'oxydo-réduction réversible vient s'ajouter comme dans les batteries.

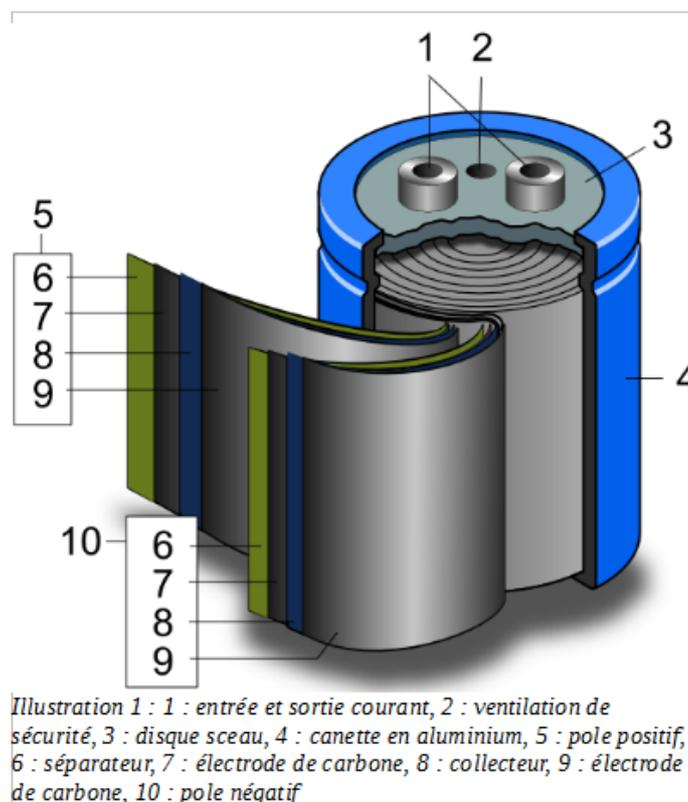
Dans le cas des supercondensateurs de type électrostatique, l'électrode doit empêcher la réaction des ions de l'électrolyte. Le carbone, remplissant parfaitement ce rôle, est le matériel le plus utilisé. De plus, sa grande surface spécifique liée à sa structure poreuse permet une capacité importante.

Pour les supercondensateurs électrochimique, l'électrode, en plus de capter les ions à sa surface, doit aussi permettre des réactions d'oxydoréduction. Pour cela, on utilise comme matériaux différents oxydes de métaux.

L'électrolyte doit avoir une conductivité ionique suffisamment grande pour minimiser la résistance interne, et une conductivité électronique suffisamment faible pour réduire au maximum le courant de fuite, c'est à dire les pertes. On distingue 2 types d'électrolyte : les électrolytes organiques tels que le carbonate de propylène ou l'acétonitrile, et les électrolytes aqueux, comme l'hydroxyde de potassium ou l'acide sulfurique.

### **La fabrication des supercondensateurs :**

Comme pour les condensateurs, la capacité des supercondensateurs est proportionnelle à la surface des électrodes. Pour optimiser le rapport volume/surface, les composants (électrodes, électrolyte, séparateurs) sont empilés pour former une longue bande qui est enroulée autour d'elle même et disposée dans une « canette » cylindrique en aluminium.



Les supercondensateurs sont des composants asymétriques. Si les branchements sont effectués dans le mauvais sens, la capacité risque d'être diminuée, et dans certains cas, le composant peut même exploser. De même si la tension appliqué à ses bornes est supérieure à la tension préconisée, le supercondensateur peut aussi exploser.

### **3.2.3. L'usage des supercondensateurs pour le stockage de l'électricité**

Les supercondensateurs se démarquent par leur puissance spécifique importante (>1000 W/kg). Ainsi, même si leur densité d'énergie est plus faible que celle des batteries électrochimique, les supercondensateurs restent tout de même une solution intéressante pour le stockage de l'électricité

dans des systèmes embarqués. De plus les supercondensateurs présentent l'avantage de posséder une cyclabilité très importante (100 000 cycles de recharge, contre 2000 cycles environ pour les batteries électrochimiques) ainsi qu'un temps de recharge très faible (quelques dizaines de secondes).

On retrouve des supercondensateurs dans de nombreuses applications, telles que les transports (bus, tram, trains, voitures électriques), la sauvegarde de mémoire sauvegarde d'urgence, ou encore le stockage des énergies renouvelables.

La légèreté des supercondensateurs et leur temps de recharge relativement faible en font un moyen de stockage de l'électricité particulièrement intéressant pour les systèmes de transports, électriques ou hybrides. Ainsi, même si leur faible densité d'énergie ne permet pas d'alimenter totalement un véhicule, on peut en revanche trouver de nombreux systèmes où les supercondensateurs sont utilisés parallèlement à d'autres sources d'énergies (combustible, accumulateurs électro-chimiques ...) afin de les rendre plus propres, plus efficaces énergétiquement et d'en réduire les coûts.

Par exemple, dans certaines voitures électriques ou hybrides les supercondensateurs sont utilisés pour les actions ponctuelles (démarrage, accélération), nécessitant une forte puissance, tandis que les accumulateurs électro-chimiques sont préférés pour la traction du fait de leur plus forte densité d'énergie. De plus, les supercondensateurs sont aussi utilisés pour récupérer de manière efficace l'énergie de freinage grâce à leur temps de recharge rapide.

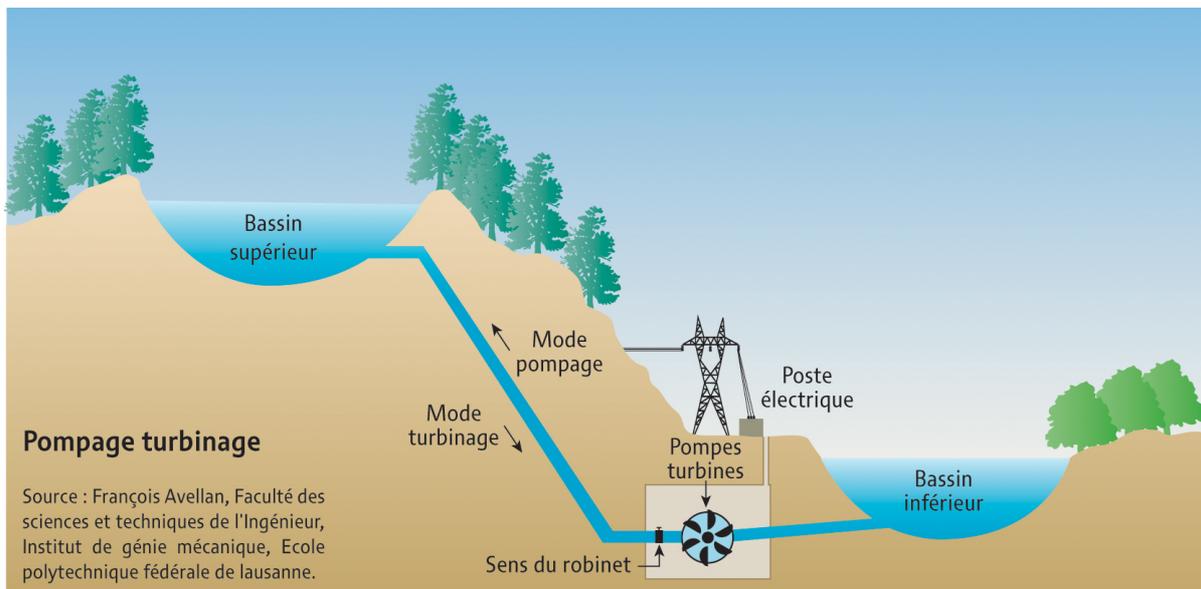
On retrouve aussi les supercondensateurs dans les transports en communs. Par exemple, à Shanghai, notamment afin de répondre aux problématiques de la pollution et de la qualité de l'air, des bus 100 % électriques, alimentés uniquement par des supercondensateurs ont été testés. Ces bus, ayant une autonomie allant de 3 à 6 kilomètres sont rechargés à chaque station. Le temps de recharge est de 30 secondes pour recharger le bus à 50% et de 80 secondes pour le recharger à 100%.

Mais les supercondensateurs ne sont pas seulement utilisés dans le domaine des transports. En effet, on les retrouve dans de nombreux secteurs où leurs caractéristiques rendent leur usage intéressant. Par exemple, ce sont des supercondensateurs qui sont utilisés pour alimenter le système d'ouverture d'urgence des portes de l'airbus A380, pour orienter les pales des éoliennes, ou encore pour alimenter certains chariots élévateurs. On retrouve aussi les supercondensateurs dans le domaine de l'électronique grand public, pour alimenter les systèmes de sauvegarde ou pour assister les batteries dans les équipements portatifs.

### 3.3. Le stockage mécanique

#### 3.3.1. Le stockage par station de pompage

La STEP ou Station de Transfert d'Énergie par Pompage est une technologie de stockage qui repose sur la gravitation. Une station de pompage est composée de deux retenues d'eau situées à des altitudes différentes, une inférieure en aval et une supérieure en amont. Ces deux réservoirs sont reliées par une conduite forcée constituée d'un ensemble de canalisations, de pompes et de turbines. Pendant les heures creuses (demande et coûts faibles), ces pompes transfèrent l'eau du bassin inférieur vers le bassin supérieur, permettant ainsi de stocker l'électricité sous forme gravitaire. Lors des heures pleines (demande et coûts élevés), l'opération inverse est réalisée, en faisant fonctionner le système comme une centrale hydroélectrique classique, à l'aide des turbines. Ceci permet alors de restituer au réseau l'électricité préalablement stockée. Le cycle de stockage-déstockage correspond donc à un pompage-turbinage. Ci-dessous, un schéma résumant le principe de fonctionnement d'une STEP :



Les STEP se distinguent en deux catégories différentes :

- les STEP « pures » qui fonctionnent en circuit fermé avec un apport d'eau extérieur minime ;
- les STEP « mixtes » qui fonctionnent en recevant un apport supplémentaire naturel d'eau. Les deux réservoirs d'eau sont situés sur un cours d'eau ou à proximité de celui-ci. Ces apports extérieurs d'eau permettent ainsi d'actionner les turbines pendant environ 250 heures par an, sans avoir recours aux pompes. Le volume d'eau prélevé pour le pompage-turbinage effectuée en général 4 à 5 cycles avant d'être restitué au cours d'eau.

Il existe également des STEP marines, installées sur les façades maritimes. Pour ces sites, la mer est utilisée en tant que retenue inférieure d'eau.

Le travail fourni par une masse  $m$  d'eau qui tombe d'une hauteur  $h$  se calcule grâce à la formule suivante :  $W = m.g.h$  avec  $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$ . En Wh, la formule devient :  $W = (m.g.h)/3600$ . Ainsi, une masse d'eau de 1 tonne qui chute d'une hauteur de 100 mètres fournit une énergie  $W = (1000.9,81.100)/3600 = 272 \text{ Wh}$  soit 0,272 kWh, ce qui est relativement faible au vu de l'importance des valeurs précédentes. Il est donc primordial que l'eau bénéficie d'une hauteur de chute ou d'un débit conséquent de façon à fournir rapidement une quantité importante d'énergie.

Dans le monde, on compte actuellement 380 STEP opérationnelles ou en construction dont un peu plus de soixante d'une puissance de turbinage (donc de capacité de déstockage instantanée) supérieure à 1000 MW. Elles sont essentiellement réparties en Chine, au Japon et aux États-Unis, où se situe la plus importante STEP du monde (Bath County en Virginie) d'une puissance dépassant les 3 GW. En général, la puissance de pompage est très légèrement inférieure à celle de turbinage. La puissance totale de pompage hydraulique installée dans le monde est estimée à 140 000 MW, ce qui représente 99 % de la capacité mondiale de stockage.

En France, il existe 6 STEP majeures possédant une puissance de turbinage significative (supérieure à 100 MW), classées ci-dessous par ordre de puissance :

Centrale	Puissance (MW)	Volume de stockage (millions de m <sup>3</sup> )	Hauteur de chute (m)
Grand'Maison (Isère)	1790	137	930
Montézic (Aveyron)	930	30	260
Super-Bissorte (Savoie)	730	39	1110
Revin (Ardennes)	720	8,5	250
Le Cheylas (Isère)	460	5	415
La Coche (Savoie)	330	2,1	930

De plus, l'usine marémotrice de la Rance en Bretagne est assimilée à une STEP mixte de 150 MW de puissance. En effet, celle-ci fonctionne en mode pompage lorsque la marée et la demande du réseau sont décalées.

Ces sites ont été aménagés pendant les années 1970-1980. Aujourd'hui, ils sont tous gérés et exploités par EDF.

Ce mode de stockage présente plusieurs avantages. Tout d'abord, cette technologie permet de stocker et de restituer de très grandes quantités d'énergie électrique en terme de puissance (voir tableau ci-dessus). De plus, les délais de mise en fonctionnement des pompes et des turbines sont de l'ordre de quelques minutes, ce qui permet de déclencher le processus de stockage ou de déstockage très rapidement. Ceci permet alors de sécuriser le réseau électrique de façon quasi immédiate. Ensuite, les

quantités d'électricité stockables sont très conséquentes au vu des volumes de stockage d'eau disponibles (voir tableau ci-dessus). Le rendement est également très élevé, situé entre 70 et 85 %. Enfin, cette technologie qui a été développée depuis la fin du XIXème siècle est très fiable, économique sur le long terme et les ouvrages possèdent une durée de vie très longue, supérieure à 40 années.

Cependant, cette technologie possède également quelques points négatifs. En effet, les projets de construction se heurtent à la faible disponibilité de sites propices, en particulier en France. Toutefois, la Bretagne et la Normandie ont été désignées en tant que territoires offrant de nombreuses possibilités pour la construction de STEP marines. De plus, les temps de constructions s'étalent sur plusieurs années et les travaux à réaliser sont très conséquents. Ceci, en plus de nécessiter des investissements considérables, peut poser certains problèmes environnementaux, liés en particulier à la taille importante des ouvrages et à l'espace qu'ils occupent, qui engendrent des perturbations sur la faune et la flore locale.

En France, les STEP sont principalement utilisées pour soulager le réseau électrique lors des pics de consommations. Cela a pour effet un lissage des prix. De plus, lorsque les énergies renouvelables produisent de l'électricité de façon conséquente et que la demande est faible, les STEP permettent de stocker cette énergie superflue, qui aurait été perdue sans leur intervention.

L'île d'El Hierro située dans l'archipel des îles Canaries constitue un exemple intéressant de l'utilisation des STEP à plus petite échelle. En effet, cette île de 11 000 habitants est totalement autonome en énergie grâce à 5 éoliennes fournissant une puissance totale de 11,2 MW. Le surplus d'électricité produit est alors stocké à l'aide d'une STEP (voir photo ci-dessous). L'eau du bassin inférieur d'une capacité de 150 000 m<sup>3</sup> est pompée vers le bassin supérieur d'une capacité de 550 000 m<sup>3</sup>. Ce dernier est installé 700 mètres plus haut. L'énergie stockée peut ensuite être restituée à l'aide de 4 turbines d'une puissance totale de 11,3 MW. Ceci survient principalement pendant les heures pleines mais aussi parfois lorsque le vent est trop peu puissant, périodes où les éoliennes ne suffisent plus à répondre entièrement à la demande en électricité.

Le recours à la technologie de stockage gravitaire permet donc d'assurer une indépendance énergétique propre à l'île d'El Hierro, tout en évitant l'importation annuelle de 6000 tonnes de pétrole, autrefois nécessaire pour satisfaire le besoin électrique de l'île.

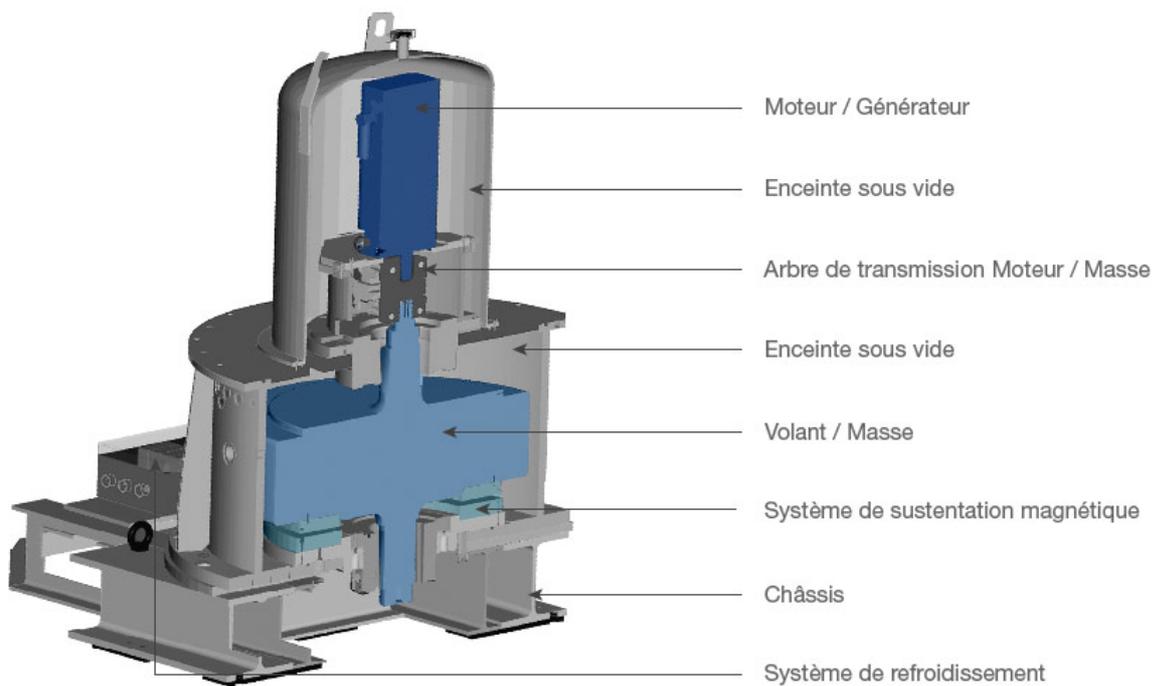


### 3.3.2. Le stockage par volant d'inertie

#### Présentation :

L'objectif du volant d'inertie, comme les autres technologies, est de conserver l'énergie électrique. Le principe est donc de faire tourner une masse, assez vite pour qu'elle acquiert de l'énergie. L'idée consiste à faire tourner ce volant pendant les heures creuses où le courant produit est moins coûteux et pas forcément consommé.

C'est donc un moteur électrique qui fait tourner un volant, constitué de béton entouré d'un cylindre de métal (voir photo ci-dessous). Le volant tourne dans une enceinte privé de tout atmosphère et de liquide pour limiter les frottements. Le moteur le fait tourner de plus en plus vite, jusqu'à ce que sa vitesse de rotation d'utilisation soit atteinte, où il est dit chargé. Au moment voulu, son inertie pourra être convertie en courant électrique par l'intermédiaire du moteur, utilisé en tant que générateur. Cette technologie sera utilisé dans ce sens lors des heures où la demande en électricité est plus importante. Il permet donc de réguler le rapport demande/production mais aussi de lisser la production liée aux énergies renouvelables. C'est à dire qu'il permet de récupérer et stocker l'énergie produite par des panneaux photovoltaïques, éoliennes, énergies houlomotrices, etc, pendant la journée lorsqu'ils produisent, quand la demande est faible. Par la suite, les volants d'inertie redistribueront le courant, par exemple pendant les heures du soir.



Cette technologie est plutôt innovante, économe en ressources et très peu polluante. Pour donner ses caractéristiques, nous commençons par les défauts. Le plus gros désavantage se situe dans son poids important. Pour avoir un rendement et une autonomie maximale, les masses utilisées sont colossales, plusieurs tonnes sont mises en rotation pour gagner le plus d'énergie possible grâce à l'inertie. Cette charge conséquente force cette technologie à être principalement immobile. Le deuxième défaut réside dans son autonomie. En effet, son temps d'utilisation pour le déstockage est d'environ 15 minutes, ce qui est donc plutôt court, car la vitesse du volant va en diminuant.

Maintenant, voyons les points forts. En premier lieu, parlons du rendement. Celui-ci s'élève à des valeurs très intéressantes de 85 à 97%. De plus, ce pourcentage ne varie quasiment pas. En effet, les cycles de charges/décharges ne modifiant pas l'état physique ou chimique des matériaux, l'ensemble subit un minimum de contraintes. Rajoutons également que le temps de chargement du volant est rapide, de l'ordre de quelques secondes ou minutes. Et du fait du petit nombre de pièces et de la simplicité de ce système, la réponse à une demande électrique est très rapide, quasi immédiate.

L'utilisation complète de cette technologie est totalement propre car elle ne met pas en jeu des produits chimiques (seulement de l'huile pour l'entretien) et aucune zone dangereuse du type explosive ou biologique. La pollution générée est inexistante, excepté celle liée à sa fabrication et production. C'est une technologie fiable, simple et qui peut même durer très longtemps. En effet, comme les volants en mouvement sont situés dans le vide, il n'y a pas de frottement et donc plus de problèmes d'oxydation ou d'altération.

### **Application au stockage de l'électricité :**

Pour commencer, nous verrons où sont apparus les premiers volants d'inertie. Nous pouvons prendre comme exemple les moulins à eau, qui grâce à la force du courant, actionnaient une roue qui elle-même actionnait de nombreux outils. Et de par sa masse et l'intensité du courant, la roue avait plus ou moins d'inertie. Les potiers utilisaient aussi les volants d'inertie. Une pédale faisait tourner une masse qui laissait en mouvement la table où se tenait le pot ou le vase, que l'artisan fabriquait. Et dans la vie quotidienne, nous connaissons un système qui utilise un volant d'inertie. Tous les moteurs thermiques l'utilisent. Ce dernier permet au moteur d'avoir l'énergie nécessaire pour faire bouger le piston quand le cycle n'est pas moteur (quand il n'y a pas d'explosion dans le cylindre).

En France et dans le monde, de nombreux complexes et centrales font l'usage de volants d'inertie. Voici trois cas d'utilisation de cette technologie de stockage :

Tout d'abord, le métro de Rennes récupère l'énergie lors du freinage des trames à l'aide de volants d'inertie. Dans ce premier exemple, le gain en énergie obtenu grâce à ce système représente 11 jours de consommation par an, soit 230 000 kWh. Il a été mis en marche il y a 7 années, et a coûté 260 000€, entièrement payé par la métropole de Rennes.

Le deuxième exemple reste dans le domaine des transports, plus exactement dans la Formule 1, en particulier dans les écuries Ferrari et McLaren. Étonnamment, c'est un domaine que l'on ne soupçonnerai pas d'avoir recours à cette technologie. Mais elle n'a été qu'éphémère. Comme pour le métro de Rennes, le but était d'utiliser l'énergie de freinage pour repartir plus facilement. Malheureusement, les contraintes dues au poids du volant ont été fatales à cette technologie, qui a été abandonnée pour la Formule 1.

Nous passons maintenant à un bâtiment bien fixe, la centrale de régulation électrique de Stephentown dans l'état de New York aux États-Unis. Elle appartient à la société Beacon Power, leader de cette technologie dans le pays. La centrale stocke le surplus de courant électrique produit et peut redistribuer 20MW en quasi permanence grâce à ses 200 volants (voir photo ci-dessous). Elle soutient la production d'électricité de l'ordre de 10 % des besoins de la ville de New York.



Dans toutes ces applications, il est possible de discerner deux catégories de volants : ceux jouant sur la masse et ceux sur la vitesse.

Les premiers vont faire varier la masse pour influencer sur la quantité d'énergie stockée. Le but est d'obtenir la masse la plus importante pour que le volant soit au maximum rentable. Ici, les masses mises en mouvement s'élèvent à plusieurs tonnes et à près de 20 tonnes pour les plus gros volants. Par conséquent, le premier problème rencontré est de trouver la façon et l'équipement qui permettraient de soutenir la structure. En effet, le poids très conséquent cause des efforts très importants. Par exemple, les roulements à billes reçoivent beaucoup de contraintes physiques qui causent du frottement. Cela nuit alors au bon stockage de l'énergie. Pour y remédier, les fabricants optent pour la répulsion magnétique, ce qui diminue énormément ce problème, mais coûte également beaucoup plus cher. Au final, la vitesse de rotation atteint 10 000 tours par minute lorsque le volant est chargé, donc en mode stockage.

La deuxième catégorie de volant va faire varier la vitesse de rotation, pour qu'elle soit la plus élevée possible, et ainsi obtenir plus d'énergie. Dans ce cas la, la vitesse de croisière des volants atteint 50 000 tours par minute. C'est pourquoi le volant doit être assez résistant pour pouvoir résister aux contraintes d'inertie qui le poussent à voler en éclats. Et là aussi, à cause de la vitesse élevée du volant, les frottements obligent les structures à être équipées de roulements à billes hautes performances ou à être en suspension magnétique.

# énergiestro

Pour le moment, en France, seules deux entreprises commercialisent cette technologie, qui sont Enegiestro et Levisys, toutes les deux pour le stockage de l'électricité. La première

est située au sud de Chartres et la deuxième près de Troyes. Avec une décennie d'expérimentation, l'entreprise Enegiestro est très prometteuse mais se confronte à quelques difficultés. En effet, l'investissement pour la création des premiers volants coûte plutôt cher. Il s'approche des 2000 € par kWh stockable. C'est à dire que pour payer ces premiers volants, le montant à déboursier pour qu'un volant puisse fournir emmagasiner 1 kWh est de 2000€. Mais l'entreprise affirme que si de nombreux volants sont fabriqués et utilisés, donc que le marché fonctionne, le prix peut facilement descendre à 200€ du kWh. En comparaison, aujourd'hui, le prix d'investissement pour une batterie lithium-ion est situé aux alentours de 400€.



Le coût d'exploitation et d'utilisation pour la redistribution sur le réseau électrique en France reviendrait moins cher que les autres technologies de stockages existantes. De plus, l'utilisation des volants d'inertie ne nécessite qu'un entretien minime. Mais nous ne sommes qu'aux prémices de cette nouvelle source de stockage d'électricité. C'est pourquoi pour le moment, le coût très variable de cette technologie de stockage ne représente pas fidèlement le coût réel de du stockage.

#### 4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Dans l'axe du développement durable, le stockage de l'énergie est l'une des priorités du XXIème siècle. Avec l'essor des énergies renouvelables et la disparition prochaine des énergies fossiles comme le charbon, le pétrole ou l'uranium sous forme de combustible nucléaire, le stockage de l'énergie est essentiel pour pouvoir aligner production et consommation d'électricité. En effet un panneau solaire ne produira pas électricité la nuit alors que ce sera à ce moment que l'habitant aura besoin d'énergie pour se chauffer et s'éclairer.

Le stockage de l'énergie est aussi un des axes de développement essentiels en ce qui concerne les transports et leurs autonomie. Ainsi, dans le secteur automobile, de nombreux constructeurs se sont lancés dans le pari de développer des voitures fonctionnant sans essence.

Au cours de ce projet, nous avons pu constater que de nombreuses formes de stockage d'énergie sont apparues et ont évolué en fonction de la demande et des différents besoins, chacune présentant des dimensions, des caractéristiques, des avantages et des inconvénients qui lui sont propres. Cette très grande diversité de technologies de stockage de l'électricité propose ainsi un très large choix pour répondre aux besoins et aux enjeux énergétiques actuels.

Au final, nous tenions à remercier notre enseignant M. GUILLOTIN pour nous avoir proposé ce sujet et nous avoir encadré tout au long de ce projet, qui s'est révélé être une expérience très positive.

## 5. BIBLIOGRAPHIE

### **3.1. Le stockage électrochimique :**

[https://www.college-de-france.fr/media/jean-marie-tarascon/UPL51353\\_courshistoirefinal\\_Tarascon.pdf](https://www.college-de-france.fr/media/jean-marie-tarascon/UPL51353_courshistoirefinal_Tarascon.pdf)

[http://www.seenrgy.com/webservice/document/\\_getStream.asp?id=B47D44B0-BFE3-4B04-B9D6-568878A2A7A3](http://www.seenrgy.com/webservice/document/_getStream.asp?id=B47D44B0-BFE3-4B04-B9D6-568878A2A7A3)

<http://forums.futura-sciences.com/electronique/212134-batteries-dite-stationnaire.html>

<http://www.masolise.com/comparatif-technologie-batterie>

<http://www.batterie-solaire.com/types-batteries-plomb.htm>

[http://www.gfp.asso.fr/wp-content/uploads/Fauvarque\\_JFF.pdf](http://www.gfp.asso.fr/wp-content/uploads/Fauvarque_JFF.pdf)

<http://erh2-bretagne.over-blog.com/page-1256110.html>

<http://erh2-bretagne.over-blog.com/page-1256110.html>

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00008901/document>

[http://www.gfp.asso.fr/wp-content/uploads/Fauvarque\\_JFF.pdf](http://www.gfp.asso.fr/wp-content/uploads/Fauvarque_JFF.pdf)

[http://www.inter-mines.org/docs/2013082456\\_stock2005\\_15.pdf](http://www.inter-mines.org/docs/2013082456_stock2005_15.pdf)

### **3.2. Le stockage électromagnétique :**

Badin, F., Biscaglia, S., Bonal, J., Clavreul, R., Fauvarque, J., Skiredj, J., Lajnef, W., Lefèvre, P., Lesueur, H., Multon, B., Pincemin, S., Rojey, A., Ruer, J., Stevens, P. and Odru, P. (2013). *Le stockage de l'énergie*. 1st ed. Paris: Dunod.

<https://en.wikipedia.org/wiki/Supercapacitor>

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Condensateur\\_\(%C3%A9lectricit%C3%A9\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Condensateur_(%C3%A9lectricit%C3%A9))

<http://www.supercondensateur.com/>

### **3.3. Le stockage mécanique :**

#### **3.3.1. Le stockage par station de pompage :**

Badin, F., Biscaglia, S., Bonal, J., Clavreul, R., Fauvarque, J., Skiredj, J., Lajnef, W., Lefèvre, P., Lesueur, H., Multon, B., Pincemin, S., Rojey, A., Ruer, J., Stevens, P. and Odru, P. (2013). *Le stockage de l'énergie*. 1st ed. Paris: Dunod.

<http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/hydroelectricite-stations-de-transfert-d-energie-par-pompage-step>

<http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=stockage-technologies>

[http://www.ecosources.info/dossiers/Station\\_stockage\\_transfert\\_pompage\\_turbine](http://www.ecosources.info/dossiers/Station_stockage_transfert_pompage_turbine)

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Pompage-turbine>

#### **3.3.2. Le stockage par volant d'inertie :**

[http://www.ecosources.info/dossiers/Stockage\\_energie\\_volant\\_inertie](http://www.ecosources.info/dossiers/Stockage_energie_volant_inertie)

<http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/volant-dinertie>

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Volant\\_d%27inertie](https://fr.wikipedia.org/wiki/Volant_d%27inertie)

<http://www.lemoniteur.fr/article/stockage-d-electricite-un-volant-d-inertie-enfin-abordable-29071490>

**Illustration en page 1 :**

<http://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/le-stockage-de-l-electricite-la-portee-des-particuliers>