Revue 3EI n°48, mars 2007, pp. 18-29

Le stockage inertiel électromécanique

H. BEN AHMED (*), B. MULTON (*), N. BERNARD (**), C. KERZREHO (*)
(*) ENS Cachan – Antenne de Bretagne – SATIE-CNRS, (**) IUT Saint-Nazaire

Résumé : Le stockage cinétique ou inertiel est un moyen connu depuis l'antiquité (tours pour poterie). Il a ensuite été utilisé mécaniquement (transmission mécanique à rapport continûment variable) puis électriquement (Gyrobus, Yverdon, années 1950) dans le domaine des transports pour réduire les appels de puissance ou pour éviter les caténaires (recharge rapide en station). Il a également trouvé des applications électromécaniques dans l'industrie, notamment pour les laminoirs, encore pour lisser les appels de puissance électrique, mais également pour se prémunir des coupures d'alimentation électrique de faible durée. Dans la continuité de ces systèmes, les groupes électrogènes à inertie renforcée constituent des dispositifs à stockage inertiel électromécanique. Un nouvel engouement est apparu dans les années 1980 pour les automobiles électriques, car l'arrivée à maturité des matériaux composites (légers et à très haute résistance mécanique) offrait des perspectives très attractives. Les difficultés liées aux fortes contraintes mécaniques des applications embarquées (effet gyroscopique, résistance au crash, etc…) ont sévèrement réduit le champ d'applications dans le domaine des transports. Il semble aujourd'hui que les transports guidés (tramways notamment) constituent un champ d'applications réel tant en situation embarquée que stationnaire (lissage des pointe de puissance pour la source et donc moindre dimensionnement). Le second champ d'applications des accumulateurs à volant d'inertie se trouve dans les alimentations ininterruptibles où les appels de puissance de courte durée sont très sollicitant pour les batteries électrochimiques et nuisent à leur durée de vie. Notons enfin que les volants d'inertie sont utilisés dans certaines applications spatiales à la fois pour transférer de l'énergie et pour stabiliser ou orienter (effet gyroscopique) les satellites.

Dans cet article, nous présentons les lois fondamentales relatives au stockage inertiel. Les applications déjà matures ou en développement sont également présentées. Enfin, des exemples de systèmes existants seront décrits.

1. Introduction

Tout d'abord l'énergie cinétique est souvent une énergie subie dans les systèmes en mouvement. Cette énergie intervient dans le dimensionnement, par exemple, des systèmes de freinage ou encore, si cela est autorisé, de récupération. A titre d'exemple, la translation d'une masse M=2000 kg à une vitesse de 100 km/h (~28 m/s) correspond à une énergie cinétique « stockée » de $W_c = \frac{1}{2}MV^2 =$ 773 kJ ou encore 2 kWh[1,2]. Nous obtenons sensiblement la même quantité d'énergie que pour un disque de rayon 0.5m, de masse 200 kg et tournant à une vitesse 2400 tr/min.

Le stockage électromécanique ou inertiel de l'énergie représente, dans certaines applications et sous certaines conditions, une alternative intéressante au moyens de stockage usuels en particulier dans les dispositifs de production à faible et moyenne puissance. Le stockage inertiel (FES) se distingue par sa grande capacité au cyclage (possibilité de 10^6 cycles[3]) se traduisant ainsi par une durée de vie élevée et donc un coût de fonctionnement relativement faible. On peut également mentionné un contrôle aisé de la charge et de la décharge, une bonne connaissance de l'état de charge (image de la vitesse de rotation) et enfin un recyclage en fin de vie pouvant être peu coûteux économiquement et énergétiquement. Le stockage inertiel souffre cependant d'un certain nombre de handicaps délimitant ainsi son domaine de prédilection : son coût d'investissement élevé (sur la base de l'énergie stockée) par rapport aux solutions « usuelles » de type électrochimique, ses performances massiques réelles relativement faibles compte tenu des éléments auxiliaires, enfin les problèmes inhérents à son principe de fonctionnement que sont les aspects sécurité et l'effet gyroscopique, particulièrement restrictifs dans les applications non-stationnaires[4].

2. Constituants

Les principaux composants d'un dispositif de stockage électromécanique inertiel sont schématisés figure 1. On trouve ainsi en premier lieu le **volant** : élément principal de l'accumulation, puis le moteur-générateur, le tout guidé par des paliers éventuellement magnétiques, un convertisseur électronique de puissance et une enceinte à basse pression.

[1] Correspondance des unités 1kWh=3.6 MJ

[2] Rappelons que l'énergie calorifique contenue dans 1 litre d'essence vaut environ 36 MJ.

[3] On entend par cycle : une succession de charge et décharge de l'état de charge maximal au minimal. Mais un cycle, d'une façon générale, en situation réelle, est toujours beaucoup plus complexe.

[4] Signalons que l'effet gyroscopique peut être globalement compensé par un système à double volant en anti-rotation. Les efforts gyriscopique restent appliqués aux guidages mécaniques de chaque volant.

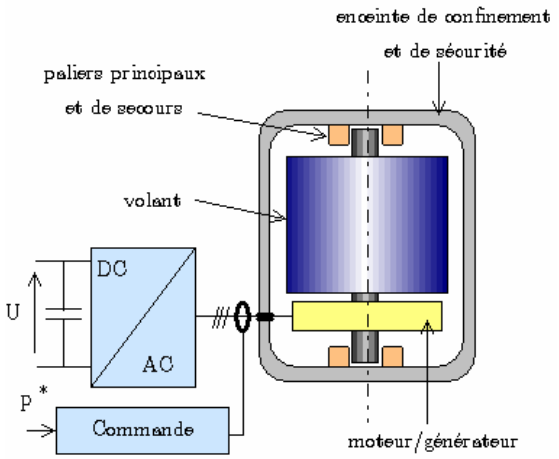


Figure 1. Principaux composants d'un accumulateur inertiele batterie électromécanique

2.1. Elément de stockage : volant d'inertie

Le type de matériau constituant le volant et sa forme caractérisent en grande partie les capacités énergétiques théoriques de la partie active de l'accumulateur. L'énergie stockée dans un volant en rotation s'exprime sous la forme :

$$W_c = \frac{1}{2} J.\Omega^2 = \frac{1}{2}\iiint_v V^2 dm \qquad (1)$$

où J est le moment d'inertie des parties tournantes, Ω la vitesse de rotation et V la vitesse tangentielle de l'élément tournant dm.

A titre d'exemple, le tableau suivant indique les moments d'inertie de quelques cas élémentaires.

Système élémentaire	Moment d'inertie
Masse m ponctuelle	mR^2
Cylindre plein de masse M	$\frac{1}{2}MR^2$
Cylindre creux de masse M	$\frac{1}{2}M\left(R_1^2+R_2^2\right)$
Barre de section rectangulaire de masse M et de longueur L tournant autour de son centre de gravité	$\frac{1}{12}ML^2$

Tableau 1. Moment d'inertie de quelques géométries

L'augmentation de l'énergie cinétique stockée nécessite donc à la fois de disposer d'un moment d'inertie élevé et d'une vitesse de rotation Ω importante. Cependant, en se limitant au volant, ce n'est pas la vitesse de rotation qui présente une limite mais la vitesse périphérique $V_p=\Omega R_r$ où R_r est le rayon du volant.
Ainsi, l'énergie stockée dépend directement de la vitesse maximale périphérique V_{pMax} admise par les parties tournantes compte tenu de leur résistance mécanique à la traction en limite élastique (R_e), de leur masse volumique (ρ) et de leur forme (relation 2). Pour ce dernier paramètre, on définit un coefficient de vitesse k_v, lié au coefficient de concentration de contraintes dans le volant et dépendant donc directement de sa géométrie.

$$V_{pMax} = k_v\sqrt{\frac{R_e}{\rho}} \qquad (2)$$

Pour une forme cylindrique simple de rayon extérieure R_{ex} et un rayon intérieur R_{in}, on montre que :

$$k_v = \begin{cases} \dfrac{3+\upsilon}{8} & : cylindre\ plein \\ \dfrac{3+\upsilon}{4}\left(1+\dfrac{1-\upsilon}{3+\upsilon}\alpha^2\right) & : cylindre\ creux \end{cases} \qquad (3)$$

où $\alpha=R_{in}/R_{ex}$ et υ correspond au coefficient de Poisson.

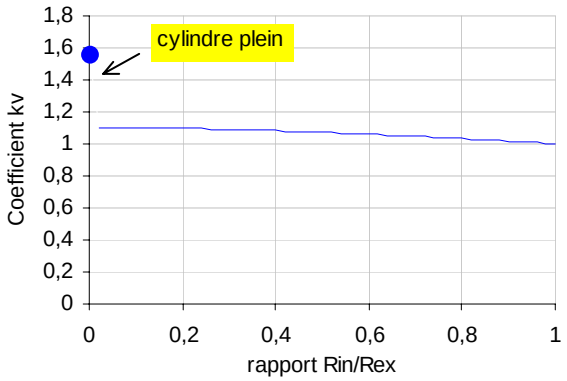


Figure 2. Variation du coefficient de vitesse en fonction du rapport des rayons dans le cas d'un cylindre et pour υ =0.3

La limite élastique est définie pour un matériau donné comme étant la densité de force de traction maximale admise sans effet d'allongement irréversible comme schématisé par la figure 3. Le tableau 2 donne des exemples de caractéristiques intrinsèques de quelques matériaux.

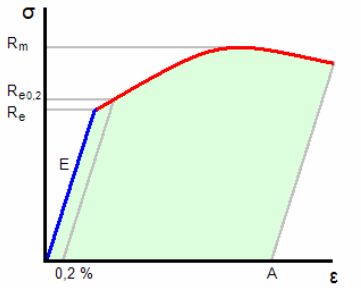


Figure 3. Définition de la limite élastique

Matériaux	Re (Mpa)	ρ (SI)	Re/ρ (Wh/kg)	Re (Wh/litres)
35NiCrMo16	880	7800	31	244
Maraging 300	1950	7800	69	542
TA6V	870	7800	55	241
10-2-3	1228	4420	77	341
2017A	280	2790	28	78
7049A	570	2800	57	158
Vezrre R /époxy	1655	2080	221	460
Carbone R/époxy	1380	1520	250	383
Aramide/époxy	1400	1370	284	388

Tableau 2a. Exemple de caractéristiques intrinsèques de quelques matériaux

Ainsi, pour un cylindre creux mince ($k_v\approx1$), les vitesses périphériques maximales admissibles varient en théorie entre 330 m/s pour un volant métallique (acier 35NiCrMo16, R_e=880 MPa et ρ=7800 kg/m3) à 1000 m/s pour un volant composite (Aramide/époxy, R_e =1400

MPa[5] et ρ=1370 kg/m3). Ce qui donne, pour un volant de diamètre extérieur de 20 cm, des vitesses de rotation limites respectivement de 44500 tr/min et 75000 tr/min. Pour un cylindre plein, le coefficient de vitesse est supérieur à l'unité et vaut k_v=1.56.

On peut également définir, comme pour tout dispositif de stockage, une densité maximale théorique d'énergie stockée massique ou volumique :

$$\varpi_m = K_m\left(\frac{R_e}{\rho}\right) \quad (4a)$$

$$\varpi_g = K_g\left(R_e\right) \quad (4b)$$

Remarque :
Hors considérations technologiques liées aux process de fabrication en particulier pour les volants composites, ces relations montrent qu'il n'y a pas d'effet d'échelle sur les performances théoriques intrinsèques.

Les coefficients K_m et K_g (ce dernier étant ramené au volume balayé), globalement indépendants du matériau, peuvent varier entre 0 et 1 suivant la géométrie du volant. Pour un cylindre plein, on obtient : $K_m = K_g = 0.6$. Pour un cylindre creux, ces coefficients varient inversement suivant le rapport α des rayons intérieur et extérieur. A titre d'exemple, nous obtenons :
$K_m = 0.47$, $K_g = 0.07$ pour $\alpha = 0.92$.

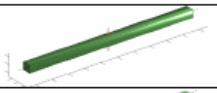
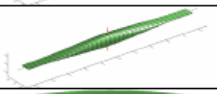
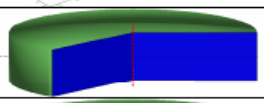
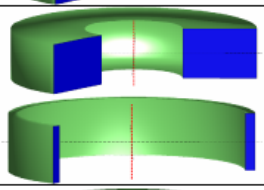
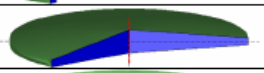
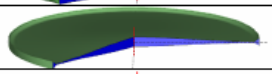
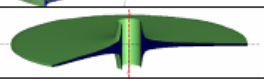
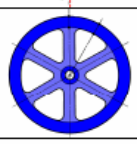
Type volant	Forme du volant et de sa section	K_m	K_g	k_v
Barre section carrée de côté le dixième de la demi-longueur		0,33	0,02	1,4
Barre exponentielle section carrée sur l'axe		0,49	0,015*	2,6
Cylindre plein		0,61	0,61	1,55
Cylindre creux rayon intérieur / rayon extérieur : 0,4 ou 0,92 (utilisé comme référence pour les matériaux composites)		0,84 0,47	0,28 0,07	1,1 1
Cône tronqué		0,8	0,36*	2
Exponentielle modifiée		0,9	0,35*	2,6
Tri-hyperbole creuse		0,65	0,1*	2
Roue à rayons		0,35	0,2*	1

Tableau 3 : Coefficients de forme et de vitesse des principales géométries [1]

[5] 1 Pascal = 1 N/m²

Application :
A ce stade, prenons un exemple simple d'un volant cylindrique plein et déterminant sa forme pour stocker 1 kWh. Pour un volant métallique de type 35NiCrMo16, l'énergie volumique maximale est de 146.4 Wh/litres, soit pour 1 kWh un volume de 6.8 litres. La vitesse périphérique admissible est de V_{pMax}=520 m/s. Quant à la vitesse maximale de rotation Ω_{Max}, elle dépend des dimensions du volant. Autrement dit, le rayon du volant R_r et sa hauteur H sont liés à la vitesse de rotation maximale choisie :

$$H = \frac{vol}{\pi\left(\frac{V_{pMax}}{\Omega}\right)^2} \quad (5)$$

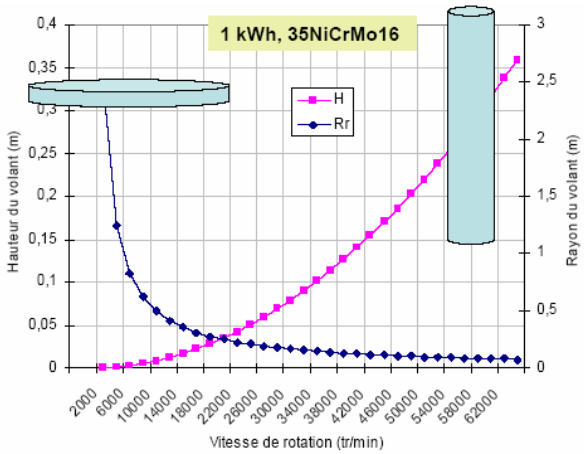


Figure 4. Variation du rayon et de la hauteur du volant cylindrique de 1 kWh en fonction de sa vitesse de rotation

Compte tenu des caractéristiques mécaniques des matériaux usuels et des formes possibles des volants, les meilleures performances volumiques (volant seul) sont obtenues pour les volants cylindriques pleins en acier haute résistance tel que le Maraging300 (330 Wh/litre). Les meilleurs performances massiques sont celles obtenues avec des volants en composite tel que l'Aramide/époxy (133 Wh/kg) [6].

Ces chiffres restent néanmoins très supérieurs aux valeurs obtenues en pratique. En effet, dans les différentes expressions précédentes, un certain nombre de facteurs réducteurs ont été omis. En particulier, le coefficient de pondération s lié à la fatigue du volant dû à son cyclage mécanique.
Pour un cyclage faible (<1000 cycles correspondant au cyclage des batteries électrochimiques usuelles), la valeur de s est approximativement égale à l'unité. Dans ce cas de figure, à cyclage identique, les performances massiques des volants en acier sont donc sensiblement proches de celles des batteries électrochimique « bas coût » plomb-acide (30 Wh/kg) [7].
A l'inverse, pour un cyclage important, s peut être très pénalisant. D'une façon simplifiée, la prise en compte de la fatigue peut être introduite à travers la résistance

[6] la forme considérée réalisable en composite est un cylindre creux où α=0.92.
[7] Il faut noter que pour le stockage inertiel, ces chiffres ne tiennent pas compte de la masse additionnelle des autres éléments : enceinte, moteur/générateur, paliers.

pratique tel que $\boldsymbol{R_p=s.R_e}$. La valeur de $\boldsymbol{s}$ pour un volant en acier dépend de l'état des contraintes, dans une moindre mesure du type de chargement (rapport de vitesse) et enfin du rapport de la résistance en limite élastique et la résistance en limite d'endurance en traction-compression alternée. Les travaux de C. Kerzrého [1] ont montré que pour un volant cylindrique en 25NiCrMo16 subissant 10^7 cycles, $\boldsymbol{s}$ est voisin de 0.5 pour un cylindre plein et 0.8 pour un cylindre creux. Concernant les volants en composites, le calcul de $\boldsymbol{s}$ est complexe du fait de l'anisotropie du matériau. Généralement, son évaluation est effectuée en adoptant une approche expérimentale. A titre d'exemple, les auteurs de [2] donnent, pour un cylindre creux et pour 10^5 cycles, des valeurs de $\boldsymbol{s}$ de 0.26 pour le Verre-époxy type R, 0.7 pour le carbone-époxy type E et enfin 0.8 pour le kevlar.

Dans une moindre mesure, le deuxième élément réducteur des performances réelles des volants concerne l'énergie extractible par rapport à l'énergie cinétique maximale accumulée. Le rapport de ces deux quantités définit la profondeur de charge ou de décharge (ie. PDC). Cette grandeur dépend dans le cas d'un stockage inertiel directement et simplement du rapport de vitesse de rotation $r = \Omega_{Max} / \Omega_{\min}$ tel que :

$$PDC = \frac{W_{cMax} - W_{c\min}}{W_{cMax}} = \frac{r^2 - 1}{r^2} \qquad (6)$$

Ainsi, pour extraire la totalité de l'énergie accumulée, il faut que $r = \infty$. La relation (6) montre cependant qu'un rapport de vitesse de 3 suffit pour extraire, au rendement de conversion prés, près de 90% de l'énergie accumulée (cf. figure 5). Cette plage de variation de vitesse devra être prise en compte dans le choix de la topologie du moteur/générateur et de sa commande.

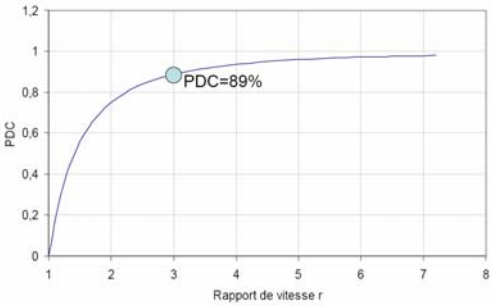


Figure 5. Variation de la profondeur de charge (PDC) en fonction du rapport de vitesse $r=\Omega_{Max}/\Omega_{min}$

Un troisième facteur réducteur est le rendement énergétique global du système correspondant au rapport du kWh électrique stocké sur le kWh électrique effectivement restitué. Ce rendement n'est pas un simple produit des rendements en puissance de chaque composant mais fait intervenir le mode de fonctionnement du dispositif. En effet, prenons le cas ultra-simplifié où la charge et la décharge sont supposées s'effectuer à puissance constante égale à la puissance maximale du convertisseur électronique (cf. figure 6) et où les pertes d'autodécharge s'effectuent également à puissance constante.

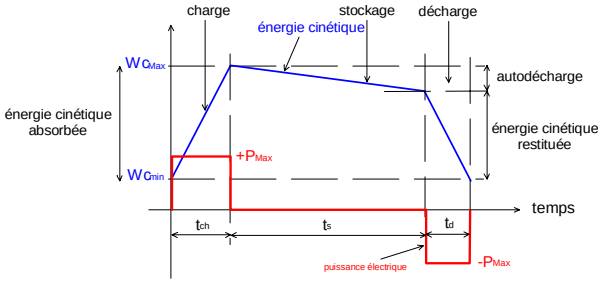


Figure 6. Cycle de fonctionnement schématique

Les énergies électriques restituée ou utile et absorbée sont notées respectivement $\boldsymbol{W_{eU}}$ et $\boldsymbol{W_{eAbs}}$. Leur rapport définit le rendement énergétique global du dispositif de stockage. A partir des considérations simplificatrices précédentes, le rendement énergique global s'écrit finalement sous la forme suivante :

$$\eta_{wg} = \frac{W_{eU}}{W_{eAbs}} = \frac{\eta_{conv}^2}{1 + \left(\frac{t_s}{t_d}\right)(1 - \eta_s)} \qquad (7)$$

où $\boldsymbol{\eta_{conv}}$ est le rendement (supposé constant) en puissance du convertisseur électromagnétique et son électronique d'alimentation et de commande, $\boldsymbol{\eta_s}$ est le rendement en puissance du système en mode stockage (phase de maintien en charge) compte tenu des diverses consommations et pertes liées aux éléments auxiliaires et au volant (paliers magnétiques, frottements, roulements de secours, pompe à vide, …). Ainsi, le rendement en mode stockage est pondéré par le rapport du temps de stockage $\boldsymbol{t_s}$ / temps de décharge $\boldsymbol{t_d}$.

Le choix d'une technologie adaptée est tributaire des différents éléments que nous venons de mentionner mais également des critères économiques de coût d'investissement lié au coût de matière et de mise en forme ainsi qu'au coût d'entretien (maintenance : vide…).

La combinaison de ses différents paramètres : forme, matériaux, coût, cyclage, PDC permet d'effectuer une première comparaison des différentes solutions de stockage inertiel. En effet, en se limitant qu'au volant lui même, les premiers calculs, réalisés par [1], ont permis de mettre en évidence différents compromis possibles entre les capacités énergétiques massique, volumique et les coûts correspondants (cf. figure 7)[8]. Au delà de la diminution précitée des performances pratiques par rapport aux chiffres théoriques, ce graphique montre que la solution volant cylindrique plein utilisant un acier relativement peu cher (35NiCrMo16) par rapport aux volants composites offre un bon compromis performances volumiques/coût et nous a semblé donc particulièrement adapté pour les applications stationnaires à fort cyclage où la masse est peu contraignante. Cette solution, par sa compatibilité magnétique (cet acier est ferromagnétique), permet en outre une forte intégration des différents éléments du système (volant, convertisseur et paliers). Le coût énergétique (volant seul) estimé de

[8] Cylindres pleins : $K_m=K_v=0.6$, cylindres creux isotropes : sauf pour les volants composites où α a été optimisé, volants iso-contrainte : $K_m=0.94$, $K_v=0.29$, rapport de vitesse $r=3$.

cette configuration est d'environ 1 euro/Wh pour 10 Wh/kg et 75 Wh/litre. C'est donc cette configuration qui a été retenue pour notre application.

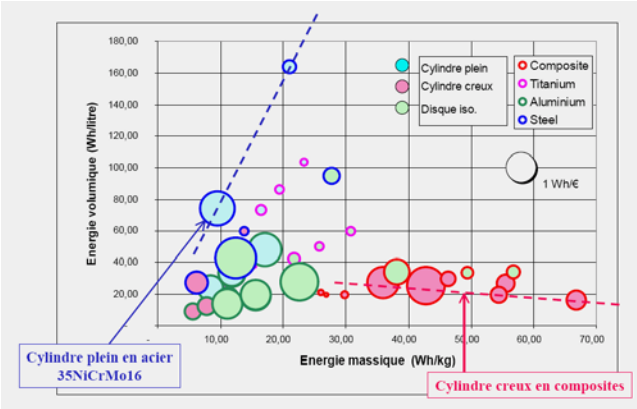


Figure 7. Performances « réelles » et coûts énergétiques de différents volants (le diamètre des cercles est proportionnel à la quantité Wh/Euro) [1]

Comparativement à une solution de stockage électrochimique de type plomb-acide (0.15 euros/Wh, 30 Wh/kg), la solution inertielle présente donc un surcoût en investissement important. Cependant, en coût global sur cycle de vie, elle peut être d'autant plus performante que le nombre de cycles charge/décharge est élevé. En effet, hors considérations de pertes et en prenant un modèle de coût de fonctionnement très simplifié, linéarisé, fonction uniquement du coût d'investissement et du nombre maximal de cycles admis, le nombre de cycle N_{cyc}^{*} à partir duquel la solution inertielle devient « rentable » par rapport à une solution de stockage s'écrit :

$$N_{cyc}^{*} = N_{cycMax}\frac{c-1}{1+c/n} \qquad (8)$$

où N_{cycMax} est le nombre de cycles de la solution inertielle, c est le rapport du coût d'investissement du système inertiel sur celui d'un autre système, n est le rapport du nombre de cycles maximal admissible du système inertiel sur celui d'un autre système.

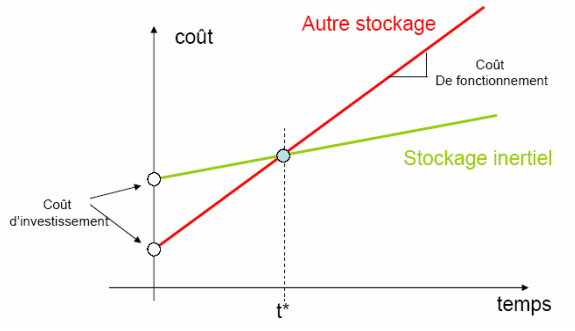


Figure 8. Variation schématique du coût global (hors pertes) du stockage électromécanique (EM) et électrochimique (EC)

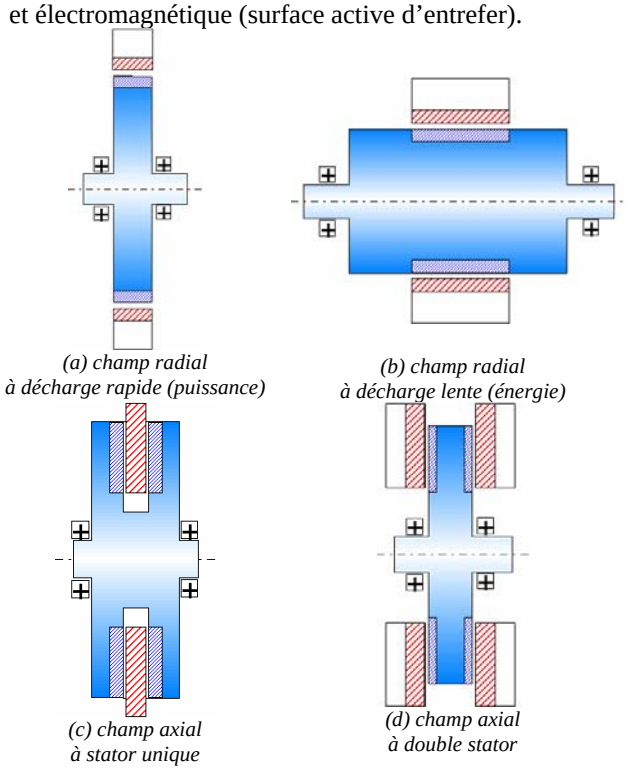
A titre d'exemple, pour un nombre de cycles maximal de 1500 cycles pour le stockage électrochimique (EC) et de 10^6 pour un stockage électromécanique (EM) et un rapport des coûts d'investissement de c=10, le stockage inertiel devient comparativement « rentable » à partir de seulement 16000 cycles correspondant à t^*=1.8 années pour 24 cycles/jour.

Rappelons toute fois que les coûts énoncés pour le stockage inertiel ne tiennent pas compte des autres éléments du système de stockage *paliers-convertisseur-auxiliaires*. Le surcoût engendré par ces éléments est d'autant plus important que la constante de temps charge/décharge est faible sauf pour l'enceinte de confinement dont le coût est lié au vide (plus important pour les longue constantes de temps) et à l'énergie stockée (résistance mécanique).

2.1.2. Elément de conversion : le moteur/générateur

Pour stocker et restituer cette énergie cinétique en énergie électrique, le deuxième élément fondamental est le **convertisseur électromécanique** (réversible) associé à son électronique de puissance et de commande. Ces deux éléments fondamentaux (volant+machine) peuvent être « intégrés » ou reliés simplement à travers un axe et un système d'accouplement.

Les topologies et architectures de machines électriques dédiées au stockage possibles sont illustrées par la figure 9. L'intégration convertisseur – volant, au delà des volumes de chaque fonction mentionné précédemment, repose sur l'adéquation de la structure électromagnétique avec la forme générale du volant. Une structure discoïde globale où la partie électromagnétique est à champ axial (configurations c et d) semble favoriser cette intégration du fait des contraintes mécaniques (vitesse périphériques) et électromagnétique (surface active d'entrefer).



(a) champ radial à décharge rapide (puissance)

(b) champ radial à décharge lente (énergie)

(c) champ axial à stator unique

(d) champ axial à double stator

Figure 9. Architectures intégrées de machine électrique possibles pour le stockage inertiel

Quant au choix du mode de conversion électromagnétique utilisé, au-delà des considérations économiques ou technologiques intrinsèques liées au savoir-faire du concepteur, il est établi en fonction de plusieurs critères. Notamment, la vitesse de rotation maximale, le temps de maintien en charge, la

compatibilité convertisseur-volant imposent le taux d'intégration, la puissance électrique et enfin l'étendue de la plage de fonctionnement à puissance constante. Les convertisseurs utilisés sont exclusivement à courant alternatif. Bien que l'on trouve dans la littérature des applications utilisant des convertisseurs de type asynchrones à rotor à cage, la proportion des solutions de type synchrone à excitation bobinée reste cependant dominante. L'excitation par aimants permanents augmente l'autodécharge, constituant ainsi un inconvénient majeur pour les applications à long temps de stockage.
Hormis quelques cas particuliers, la plupart des convertisseurs électromécaniques sont donc, naturellement de type synchrone.

Notons à ce stade que la quantité d'énergie stockée impose le volume du volant, le couple d'entraînement (puissance/vitesse rotation) impose celui de la machine électrique, la puissance (énergie/temps) impose l'électronique de puissance associée.

Application :
Reprenons l'exemple précédent. Pour une énergie de 1 kWh, une vitesse de rotation de 3000 tr/min et une constante de temps τ charge/décharge de 1 min, la puissance P vaut 60 kW ($P \sim W_c/\tau$) et le couple de la machine électrique C vaut 200 Nm ($C \sim W_c/\Omega\tau$). Si l'on diminue le temps de charge/décharge d'un facteur 10 passant à 6 s, la puissance vaudra que 600 kW et le couple sera de 2000 Nm. Si on augmente la vitesse de rotation d'un facteur 10 par rapport au cas de référence (passant à 30 000 tr/min), la puissance nécessaire sera identique (60 kW) mais le couple exigé de la machine sera divisé par 10 (20 Nm).

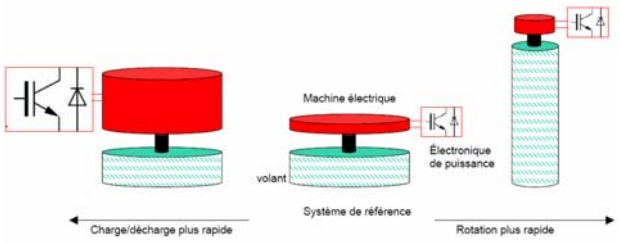


Figure 10. Evolution schématique du volume relatif des composants à même énergie stockée

2.1.3. Elément de guidage : les Paliers

S'ajoute au volant et au convertisseur un troisième composant que sont les **paliers**. Essentiellement, deux technologies sont utilisées. Les paliers avec et sans contacts. Les premiers généralement de type roulements à billes céramiques autorisent des vitesses périphériques importantes allant jusqu'à 130 m/s. Bien qu'ils offrent une grande simplicité de mise en œuvre et un bas coût, leur fonction est souvent limitée au guidage de secours et de démarrage. Cette restriction est en particulier présente dans les applications à long cycle de stockage et à haute vitesse de rotation où l'usure provoquée et les pertes de frottements sont importantes. En outre, le guidage mécanique impose la position de l'axe de rotation du volant ce qui nécessite un équilibrage précis de ce dernier pour que son axe d'inertie soit au maximum confondu avec celui de rotation. Dans les applications opposées (faible cycle et vitesse réduite), leur emploi en tant que paliers principaux reste cependant possible [3].

Les paliers magnétiques, actifs ou semi-actifs [9] suppriment la plupart de ces inconvénients. Ils remplissent généralement deux fonctions principales, à savoir centreur radial et butée axiale [4]. La stabilisation angulaire peut être, sous certaines conditions, issue des deux premières fonctions. Plusieurs configurations et dispositions sont possibles (cf. figure 11 issu de [5]).

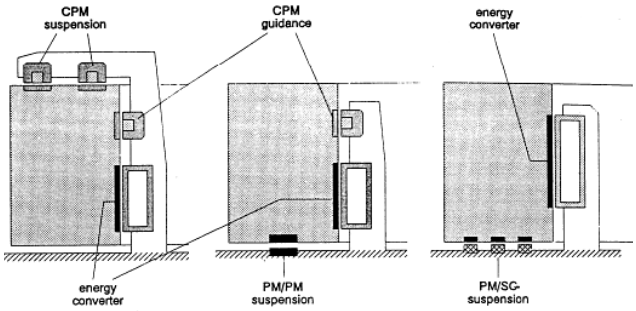


Figure 11. Exemples de dispositions de paliers magnétiques [5]

Les paliers magnétiques entièrement actifs, bien qu'offrant un grand nombre de degrés de liberté et une stabilité contrôlée, ils souffrent d'un coût élevé et d'une consommation énergétique importante. Les sustentations à supraconducteur sont incompatibles avec les applications à long cycle de stockage, bas coût et très faible consommation compte tenu du prix et de la consommation propre du dispositif cryogénique. Dans les applications basse et moyenne vitesse et à faible durée maintien en charge, un guidage mixte, comprenant une butée mécanique, un compromis *stabilité/simplicité/coût* peut être trouvé. A l'inverse, les limitations et les pertes générées, bien que plus faibles par rapport à une solution tout mécanique, rendent cette configuration inapproprié.

Les sustentations hybrides, présentant un axe actif de type électroaimant asservi et un axe passif à base d'aimants permanents, offrent quant à elle un compromis coût/consommation intéressant. En particulier, la solution consistant à utiliser un centreur à aimants permanent à réluctance variable et une butée hybride composée d'une partie active de type électroaimant asservi et d'une partie à aimants (polarisation) semble optimale en termes économiques et énergétiques. Cette dernière solution a été adoptée et développée par le LEG [7]. En fonctionnement normal (sans perturbation), le palier se met dans une position d'équilibre instable définie par la force magnétique d'attraction aimants/fer et les forces extérieures (poids, forces normales du moteur/ générateur). En mode perturbé, l'asservissement du courant dans la bobine autour de la valeur zéro permet d'atteindre rapidement la nouvelle position d'équilibre. Il

[9] Il faut au moins un axe actif ou un palier supraconducteur pour stabiliser le guidage (théorème de Earnshaw [6]).

ne s'agit donc pas ici d'asservir la position du volant à une valeur précise, celle-ci résulte de l'équilibre des forces mises en jeu, mais de contrôler activement la dynamique du volant. Ainsi, pour des perturbations relativement faibles, cette solution s'avère bien adaptée et compatible avec une basse consommation énergétique, un coût réduit et une intégration au système aisée car utilisant les éléments magnétiques du volant et/ou du moteur/générateur.

2.1.4. Eléments auxiliaires

Aux trois composants fondamentaux que nous venons de décrire s'ajoutent les paliers de secours et l'enceinte de confinement. Les premiers ont pour fonction le maintien du volant en cas d'un disfonctionnement du guidage magnétique principal. Quant à l'enceinte de confinement, elle a pour fonctions l'absorption de l'énergie stockée en cas de rupture du volant et le maintien sous basse pression (de l'ordre de 1 Pa) des parties tournantes afin de réduire les pertes aérodynamiques, particulièrement contraignantes dans le cas des applications haute vitesse de rotation et long cycle de stockage (pertes d'autodécharge). En effet, le temps d'autodécharge, dû uniquement (si les pertes magnétiques du moteur-générateur et mécaniques des paliers sont négligeables) aux pertes aérodynamiques, correspond au rapport de l'énergie cinétique accumulée et des pertes, il s'exprime approximativement par :

$$t_{ad} = \frac{W_c}{p_{aéro}} \approx \rho \frac{K_\vartheta}{K_p (k_v)^2} \frac{\vartheta_{volant}}{S_{volant}} \frac{1}{\wp} \qquad (7)$$

où ϑ_{volant} est le volume du volant, S_{volant} est la surface enveloppe du volant en rotation, $\wp$ est la pression du gaz et K_p est un coefficient de proportionnalité dépendant de la nature du gaz ($K_p = 1.35\ 10^{-3}$ SI pour l'azote ou l'air).

Ainsi, pour un volant en acier de densité 7800 kg/m^3 de forme cylindrique plein tel que hauteur=rayon=10 cm, le temps d'autodécharge complet estimé selon la relation (7) est de 4 jours pour une pression de l'air de 0.1 Pa (1bar = 10^5 Pa).

Notons également que ces éléments « additionnels » bien qu'indispensables dégradent souvent considérablement les performances massiques et volumiques du système complet. A titre d'exemple, dans la référence [8], les auteurs indiquent une masse de l'enceinte de sécurité de l'ordre de 40 kg pour une masse « utile » volant de 6.5 kg ! Toutefois, les conséquences de cette dégradation sont à relativiser dans les applications stationnaires où la contrainte masse est souvent moindre.

3. Applications et exemples

Caractériser une application utilisant un stockage inertiel c'est définir, au delà de la valeur de l'énergie accumulée nécessaire, un ensemble d'autres critères. Parmi ces derniers, on peut citer :

- L'aspect **stationnaire** ou **non-stationnaire** de l'application. Dans le premier cas, il s'agira généralement de maximiser l'énergie volumique par l'utilisation de volants composés de matériaux à forte densité volumique et de forme « pleine », dans le second cas l'énergie massique : matériaux à forte densité massique et de forme « creuse ». En outre, dans ce dernier cas, l'effet gyroscopique et les sollicitions souvent élevées sur le système de guidage sont des aspects importants.

- La puissance maximale associée à la « **constante de temps** » du système, à savoir le rapport énergie/puissance. Cette grandeur est un élément déterminant dans le choix de la technologie volant-convertisseur. Notons que l'énergie stockée est limitée par les caractéristiques intrinsèques du volant, la puissance électrique échangée est quant à elle imposée par le convertisseur électromagnétique et son électronique de puissance associée. Enfin, le temps de stockage ou d'accumulation plus au moins long indique l'importance relative du rendement de stockage et donc celle des pertes d'autodécharge. Les conséquences directes de ce critère se retrouvent sur le système de guidage et sur la valeur de la basse pression nécessaire.

- Le troisième critère est relatif au **nombre de cycles charge/décharge** définissant ainsi la capacité de cyclage attendue.

La **vitesse de rotation** est liée à la vitesse périphérique admise imposée par le type de matériau utilisé, et au rayon extérieur (R_{ex}) du volant, sa hauteur (H) étant conditionnées par la quantité d'énergie stockée et par les contraintes de stabilité dynamique. A matériaux et énergie donnés, les systèmes à basse vitesse de rotation sont donc à géométries plutôt plates ($R_{ex}/H>>1$).

De façon simplifiée, les applications du stockage inertiel peuvent être classées en **trois grandes catégories** : source cinétique, source de puissance, source d'énergie. Chacune d'elle définit la nature de la source que représente le dispositif inertiel. Des ordres de grandeurs sont présentés au tableau 4 issu de [9]. Dans le tableau 5 sont présentés des exemples de sociétés commercialisant des volants d'inertie.

Applications	Puissance crête	Energie stockée MJ (kWh)	Vitesse max. tr/min	Vitesse périphérique m/s	Matériau rotor	Masse rotor kg
Satellite	2 kW	1.4 (0.4)	53 000	900	Composite	30
UPS	400 kW	4.7 (1.3)	10 000	400	acier	1400
Bus hybride	150 kW	7 (2)	40 000	900	Composite	60
Station spatiale	3.6 kW	13 (3.7)	53 000	900	Composite	75
Véhicule militaire hybride	350 kW	25 (14)	18 000	540	Composite	280
Lanceur électromagnétique	5-10 GW	50-150 (14-42)	10 000	450	Composite	4000
Train	2 MW	470 (130)	15 000	950	Composite	2500

Tableau 4. Exemples d'applications du stockage électromécanique [9]

Société	Volant	Exemple de produits
RWE Piller (UK)	métallique	1.65 MW- 4.6 kWh
Active Power (USA)	métallique	100 kW à 850 kW
Urenco (UK)	composite	200 kW-2.44 kWh
AFS Trinity (USA)	composite	100 kW-0.42 kWh 200 kW-2kWh
Flywheel Energy Sys. (Cana)	composite	50 kW-1.3 kWh
Beacon Power (USA)	composite	1 kW-2kWh 1kW-6 kWh

Tableau 5. Exemples d'entreprises commercialisant des volants d'inertie (les 5 premiers exemples concernes des applications Puissance - UPS, le dernier exemple celle de l'énergie)

3.1. Source cinétique :

Dans la première catégorie, le dispositif de stockage correspond à une **source cinétique**. Cela consiste en l'utilisation de l'effet gyroscopique pour la stabilisation et le positionnement d'objets tel que les satellites spatiaux [10]. Les volants utilisés sont généralement en composites (maximisation inertie/masse) montés sur paliers magnétiques afin de garantir une durée de vie suffisante.

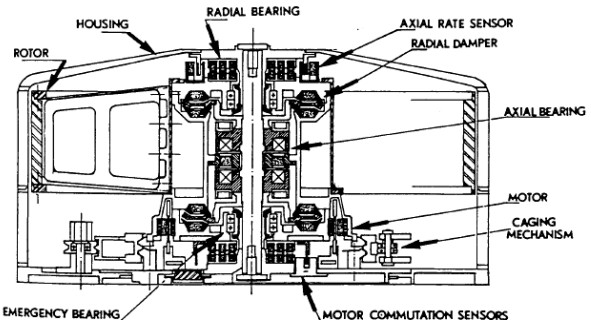


Figure 12. Volant composite de positionnement du satellite SPOTE (aérospatiale) [10]

3.2. Source de puissance :

Dans les applications de puissance, le volant permet soutirer (décharge) ou d'injecter (charge) une puissance électrique donnée pendant une durée très courte (allant de la ms à la minute au maximum). Les éléments de conversion machine électrique et électronique de puissance associée représentent ici des éléments majeurs dans l'évaluation des performances globales du système tant en terme de coût et que de celui du rendement. On trouve dans cette catégorie principalement les **alimentations ininterruptibles** ou onduleurs de secours (UPS) pour lesquels le stockage inertiel est une source intermédiaire palliative au dysfonctionnement de la source principale (réseau) et au manque de réactivité de la source secondaire éventuelle (groupe diesel par exemple). C'est probablement dans ces applications que la technologie inertielle est la plus aboutie et l'offre commerciale la plus étendue (cf. tableau 5, les 5 premières lignes).

Le premier exemple illustré à la figure 13 est le système de la société américaine AFS-Trinity concepteur d'un module de 200 kW-2 kWh, pour une vitesse de rotation maximale de 40 000 tr/min. Le volant est composite (fibre de carbone).

Le deuxième exemple (figure 14) est proposé par la société Active Power qui commercialise des volants « basse vitesse » (7000 tr/min) dans une gamme allant de 160 à 800 kW. Les temps de charge sont de l'ordre de 20 min avec une puissance qui n'est pas maintenue constante durant la décharge (couple maximal constant). les temps de décharge peuvent atteindre 5 s. Active Power utilise une machine à reluctance variable. Le guidage est assuré par un système hybride : paliers mécaniques et assistance magnétique passive.

Le troisième exemple (figure 15) est un système Mitsubishi qui utilise une machine asynchrone de puissance 5 kVA pour une énergie stockée faible de 90 Wh. Le volant de 27 kg est en acier et tourne à une vitesse de 1500 tr/min.



Figure 13. Le système AFS-Trinity 200 kW - 2 kWh, masse: 540 kg, 40,000 tr/min, 100 000 cycles



Figure 14. Le système Active Power gamme 160à 800 kW, masse 1400 à 2250 kg, 7000 tr/min, temps de charge 20 min, temps de décharge 15 à 5 s, machine à réluctance variable, vide partiel, paliers hybrides mécanique + magnétique passif

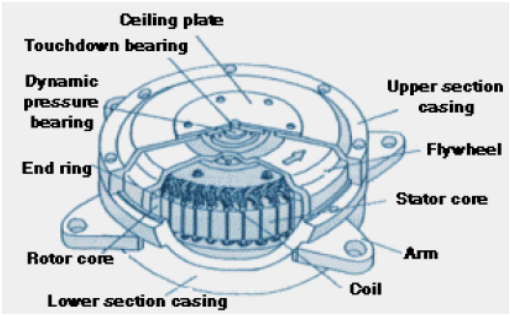


Figure 15. Le système Mitsubishi, 90 Wh, 5 kVA pendant 1 min, volant en acier de 27 kg, masse totale 130 kg, 1500 tr/min, machine asynchrone

Toujours pour des applications de type UPS, le cinquième et dernier exemple (figure 16) est celui développé par la société britannique Urenco Company. Les performances sont 100 kW – 5 kWh. La vitesse de rotation est de 42000 tr/min. La masse totale est de 1600 kg. Il est garanti pour 10 millions de cycles (~20 ans). Le volant est en composite (fibre de verre). Ces systèmes ont été installés pour expérimentation notamment dans une sous station du métro londonien (puissance 300 kW).

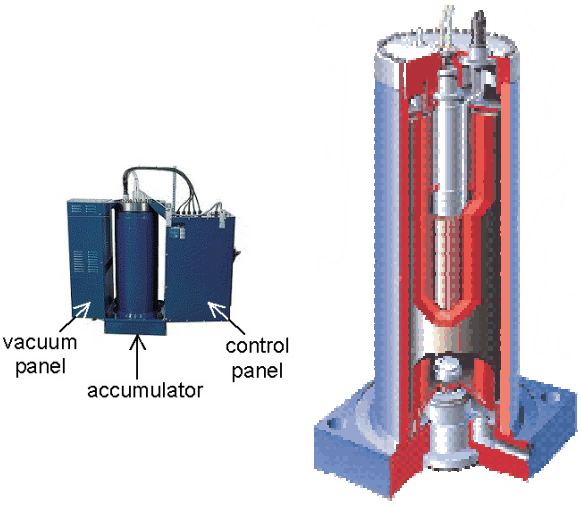


Figure 16. Système Urenco 100 kW - 5 kWh - 42000 tr/min, masse totale 1600 kg (1.6 m x 1.6 m x 0.9 m) 10 millions cycles (20 ans)

Dans la même catégorie mais avec une constante de temps encore plus faible, on trouve les **applications impulsionnelles** utilisées pour les alimentations de lanceurs électromagnétiques (~GW - 10 ms) [11].

Enfin, citons les applications embarquées de **transport** électrique ou hybride (traction, hybridation du stockage, récupération). C'est probablement dans ce contexte que les travaux et études associées sont les plus nombreux dans la littérature spécialisée bien que dans la réalité industrielle, la solution inertielle reste au moins aussi marginale que celle des véhicules électriques, la sécurité représentant encore un verrou technologique qu'il reste à surmonter. Les puissances électriques mises en jeu varient entre 20 kW à 100 kW pour une énergie stockée de l'ordre du kWh. Elles peuvent cependant atteindre le MW-100 kWh dans la traction ferroviaire [12]. Les transports guidés sont en effet moins contraignants. Signalons l'exemple du petit tramway (6 tonnes, 20 sièges + 14 places debout) de Bristol mis en service en 1998 sans caténaire qui utilise un volant d'inertie [13] avec un moteur de recharge différencié du générateur de décharge (cf. figure 17).

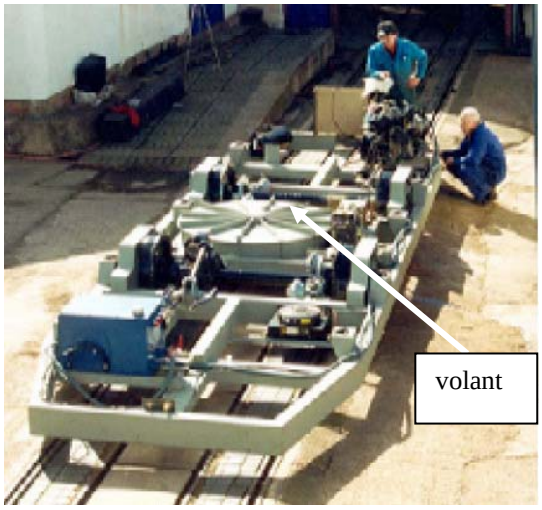


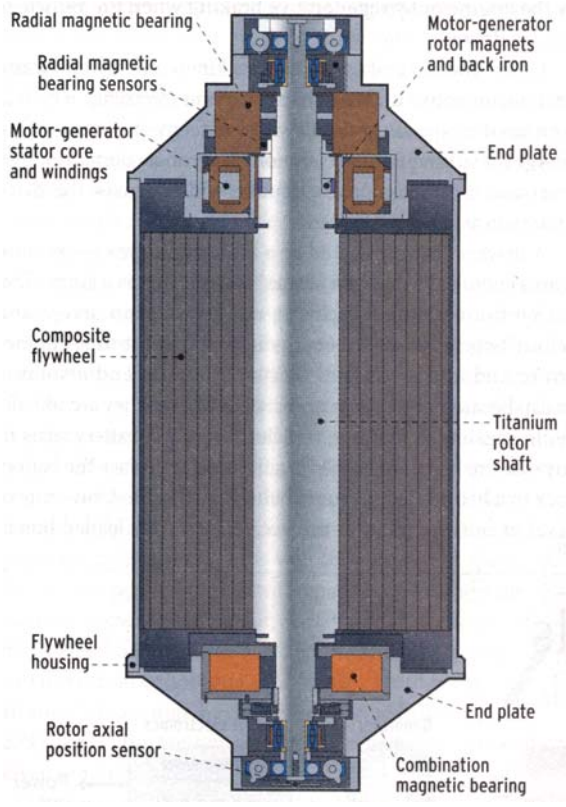
Figure 17. Châssis du tram de Bristol (au centre se trouve le volant d'inertie) [13]

L'autonomie est de 3,2 km/h (52 km/h maximum) avec un accumulateur de 500 kg à volant en acier. Une transmission mécanique continûment variable (CVT) est utilisée car le moteur n'est pas défluxable. La tram se recharge à quelques stations (sous 72 VDC) ce qui évite les caténaires ou rails conducteurs. La recharge se fait en 90 s. Il y a un système de stockage de secours (batterie électrochimique) pour alimenter les équipements de bord et, en cas de problème (circulation stoppée), pour 6 recharges du volant.

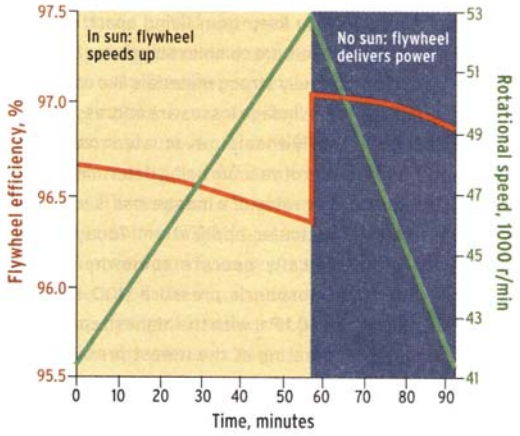
Depuis 2005, Alstom expérimente à Rotterdam un tramway Citadis également sans caténaire et à volant d'inertie en composite (fibre de carbone) associé à un moteur-générateur à aimants, le tout monté en toiture.

3.3. Source d'énergie :

Dans la troisième catégorie, la charge ou la décharge s'effectuent en un temps relativement long, de l'ordre de l'heure, le stockage est alors qualifié de **source d'énergie**, car l'énergie stockée est le critère de dimensionnement dominant. L'une des principales applications concerne la production d'électricité à partir de ressources renouvelables intermittentes, voire en compléments à des dispositifs plus classiques comme les groupes électrogènes. Ces systèmes peuvent être en site isolé (éventuellement dans l'espace, voir fig.18) ou raccordés à un réseau principal. D'une façon générale, le rôle principal du stockage permet d'assurer **l'adéquation production / consommation**.



(a)



(b)

Figure 18. Volant d'inertie pour application spatiale développé par la NASA [9]

Dans le cas d'un site raccordé, l'optimisation correspond à la maximisation de l'utilisation des énergies auto-produites ou encore à l'écrêtage de la puissance appelée du réseau. Il permet également de disposer d'une autonomie suffisante en cas de disfonctionnement du réseau principal et d'une auto-production suffisante. Dans le cas d'un site isolé, cela correspond à l'optimisation du dimensionnement et du fonctionnement des moyens d'auto-production (éoliens, solaires, groupes électrogènes, …).

Les études liées à ce contexte sont relativement récentes et sans doute ont permis un regain d'intérêt nouveau du stockage électromécanique. Les contraintes majeures spécifiquement liées à ce type d'applications sont la nécessité d'un stockage à forte tenue en cyclage et/ou une durée de vie élevée.

Les sollicitations du stockage dépendent pour ce contexte des profils de consommation et de production. Elles dépendent également de la présence ou non d'un réseau principal, celui-ci peut en effet contribuer aussi bien à la production qu'au stockage. En tout état de cause, les sollicitations du stockage résultent à la fois d'un dimensionnement optimal basé sur une prédiction de consommation et de production et sur une gestion optimale pré-établie ou « temps réel ».

Un exemple est présenté à la figure 19 issu de [14]. Il s'agit d'une batterie tampon associée à des panneaux photovoltaïques alimentant des phares ou des balises sur les côtes canadiennes. Ce module, de 1 kW, utilise un volant en composites à fibres de verre et de carbone. L'énergie accumulée est de 8.5 kWh. Le temps de charge est de 8 h30.

Les produits commerciaux à longs cycles dédiés aux applications stationnaires sont peu nombreux. On peut signaler cependant le récent développement, par la société américaine Beacon Power, d'un système de stockage inertiel à long cycle 6 kWh-2kW utilisant un volant de 800 kg en fibre de carbone tournant à 22500 tr/min dans une enceinte sous vide (autodécharge complète en 30 heures) et sur paliers magnétiques semi-actifs. Ce produit est dédié à l'alimentation énergétique, en remplacement de batteries électrochimiques, de postes de télécommunication [15].

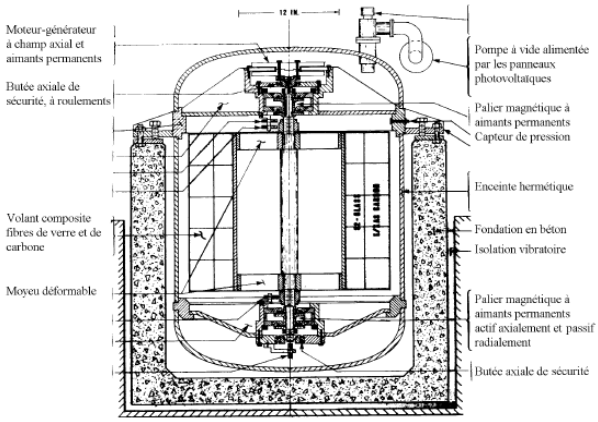


Figure 19. Vue d'ensemble d'une unité de stockage stationnaire [14]

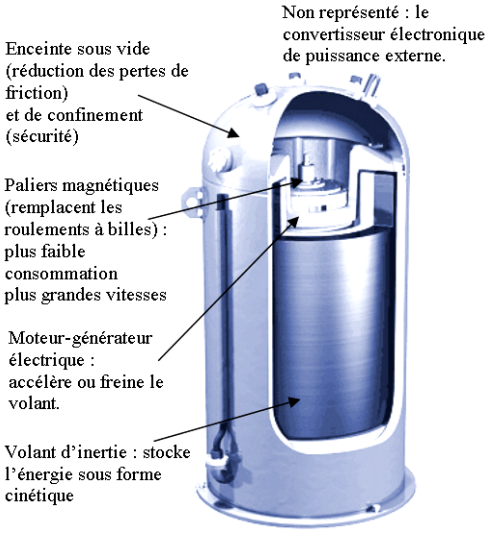


Figure 20. Système Beacon Power : 6 kWh - 2 kW , 22500 tr/min, hauteur: 120 cm, diamètre: 68 cm, masse: 800 kg

A titre d'exemple, sur la figure 21a , issue des travaux du laboratoire L2EP de Lille [18], un dispositif de production d'énergie électrique à partir d'un système composé d'une éolienne (turbine+générateur asynchrone), d'un groupe diesel et d'un stockage inertiel. La gestion des transferts d'énergie du dispositif de stockage est représenté à la figure 21b. Cette gestion est basée sur la minimisation des variations de puissance du groupe diesel.

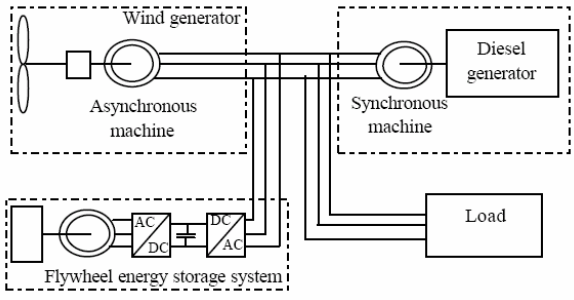


Figure 21a. Schéma général d'un système éolienne+groupe diesel+stockage inertiel [18]

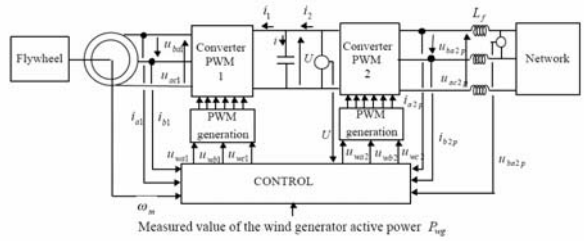


Figure 21b. Schéma de régulation des transferts de puissance du stockage inertiel [18]

Un exemple de variation instantanée de l'énergie stockée obtenue, donc de la vitesse instantanée de rotation du volant, est donnée à la figure 21c.

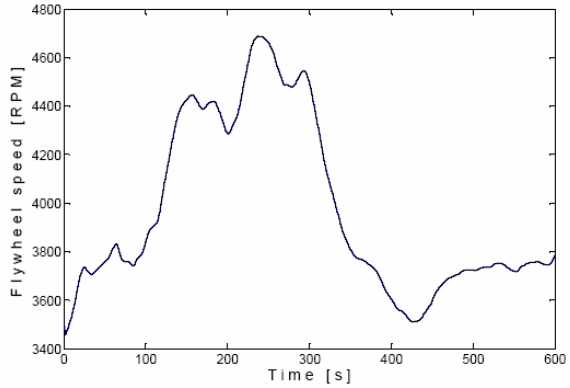


Figure 21c. Exemple de variation de la vitesse du volant

3.4. Système de stockage SATIE

Dans le cadre des activités traitant de la production d'électricité d'origine renouvelable et intermittente, l'équipe SETE du SATIE[10] a effectué des études autour du stockage inertiel à constante de temps élevée (de l'ordre de l'heure). Le volant retenu est massif et cylindrique et en acier (voir §2.1).
Les différentes contraintes de conception liées au convertisseur électromagnétiques fixées dans le cadre de cette étude et les implications structurelles correspondantes sont :

- Pour des raisons de résistance mécanique, le rotor devra être entièrement passif (ne comportant ni bobinage, ni aimant) et de préférence massif isotrope ;
- Pour minimiser les pertes magnétiques dans le fer, toutes les parties ferromagnétiques devront être tournantes (fixes par rapport au champ magnétique). Ceci implique donc une architecture à bobinage d'induit située au sein de l'entrefer et fixe. Sa distribution devra en outre permettre un champ tournant aussi parfait que possible ;
- Pour obtenir une large plage de vitesse à puissance constante, l'excitation devra être bobinée réglable, mais également située au stator (système balais collecteur impensable) ;

Pour atteindre un bon niveau d'intégration au volant d'inertie en acier ferromagnétique, une architecture disque à champ axial se distingue. Un dispositif répondant simultanément à ces contraintes a été alors conçu dès 1998 [16]. Ce dispositif (figure 22) est composé de deux disques ajourés réalisés dans un matériau magnétique doux, d'un bobinage induit fixe triphasé situé dans l'entrefer et produisant une force magnétomotrice la plus sinusoïdale possible, et enfin d'un bobinage inducteur solénoïdal fixe.

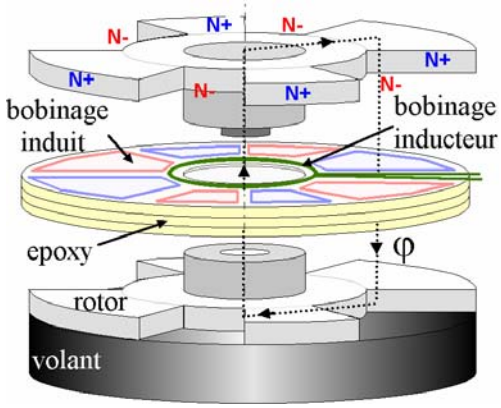


Figure 22. Structure générale du moteur-générateur pour stockage inertiel développé par le SATIE [17]

Le principe de fonctionnement de l'actionneur est fondé sur la « commutation de flux » à savoir : l'alternance du flux inducteur vu par une phase du bobinage d'induit (fixe) est obtenue par combinaison d'une excitation homopolaire et variation locale de réluctance. Cette variation est assurée par le déplacement relatif du rotor.

En outre, on notera la spécificité suivante : vue de toutes les parties ferromagnétiques, l'induction d'excitation est constante. En outre, pourvu que le bobinage d'induit génère, de par sa construction et son alimentation, une induction d'entrefer parfaitement sinusoïdale, l'induction magnétique résultante ainsi créée est également constante dans le temps. Ce qui implique que les pertes magnétiques dans le fer sont sensiblement nulles et que les forces magnétiques axiales exercées sur toutes les parties ferromagnétiques sont quasi-constantes. La première propriété autorise l'utilisation d'un circuit magnétique massif compatible avec les exigences mécaniques de grande vitesse et avec l'architecture massive du volant. La seconde propriété a pour conséquences des efforts parasites d'origine magnétique très réduits (très faible bruit acoustique et très faible sollicitation des guidages magnétiques) ainsi qu'une ondulation du couple électromagnétique très faible.

La qualité de conversion souhaitée est essentiellement tributaire de la distribution du **bobinage d'induit**. Afin de se rapprocher des conditions idéales de fonctionnement, la distribution du bobinage a été optimisée pour générer une force magnétomotrice sinusoïdale. Pour cela, la solution retenue consiste à réaliser une variation optimale dans le sens orthoradial des sections des conducteurs d'induit (cf. figure 23). Chaque phase du bobinage induit est ainsi composée de plaques de circuit imprimé double face appelée galette autorisant une largeur de conducteurs variable. L'induit, triphasé, est ainsi constitué de galettes superposées convenablement connectées.

[10] SETE : Systèmes d'Energie pour les Transports et l'Environnement, SATIE : Systèmes et Applications des Technologies de l'Information et de l'Energie (laboratoire ENS Cachan/CNRS).

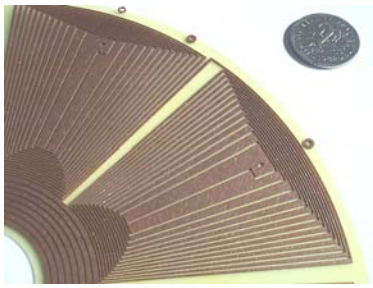


Figure 23. Photo d'une partie des bobinages d'induit et d'excitation (enroulement central) en technologie circuit imprimé double faces [17]

Un prototype fut réalisé (figure 24). Ses caractéristiques sont :

- matériau du volant utilisé : acier 30CrNiMo8
- volant : diamètre 20 cm, hauteur 10 cm, masse 29 kg
- Vitesse de rotation maximale : 30000 tr/min
- Energie maximale stockable : 1 kWh
- Puissance maximale (de 10 à 30 000 tr/min) : 1 kW

Notons qu'il a été réalisé sur roulements à billes et sans enceinte sous vide, ce qui fait qu'il n'a pas pu être testé aux performances maximales. Enfin, le bobinage du moteur-générateur a été réalisé avec un facteur de remplissage en cuivre trop faible ce qui lui confère un rendement insuffisant en charge.



Figure 24. Prototype SATIE réalisé (sans le bobinage) [1], [33]

4. Conclusion

Pourvu que l'on utilise des matériaux à haute performances, un guidage robuste et peu consommateur d'énergie, un vide maîtrisé, des coûts de mise en oeuvre raisonnables, le stockage inertiel peut représenter une bonne alternative aux autres types de stockage d'énergie électrique malgré des performances massiques et volumiques intrinsèques modestes. Sa grande tenue en cyclage lui confère en effet un avantage important dans les applications à fortes sollicitations dynamiques, il se trouve ainsi en compétition direct avec les supercondensateurs. En outre, les problèmes de sûreté de fonctionnement et l'effet gyroscopique privilégient son utilisation en mode stationnaire, mais il existe quelques applications embarquées (satellites, transports terrestres sur rail).

Sachant qu'une solution idéale unique de stockage n'existe pas, la combinaison de plusieurs moyens de stockage représente souvent la meilleure garantie d'un dimensionnement optimal d'une installation électrique.

5. Bibliographie

[1] **C. Kerzrého** : « Caractérisation et optimisation d'une batterie électromécanique sous chargement cyclique », thèse de doctorat de l'ENS Cachan, 8 janvier 2002. Fichier téléchargeable à http://www.bretagne.ens-cachan.fr/pdf/mecatronique/Page_SystemesEM_HautesPerf/These_kerzreho_jan02.pdf

[2] **M. Munro, R. Flanagan** : « High Energy Density Fibre Composite Flywheel Rotors : Critical Materials Failure Properties », Canadian Fracture Conference CFC12, May 1984, pp. 14-21.

[3] **J.A. Kirk, D.K. Anand** : « Overview of a Flywheel Stack Energy Storage System », Proceedings of the 23rd intersociety energy conversion engineering conference, D. Yogi Goswami, The American Society of Mechanical Engineers, Vol. 2, 1988, pp. 25-30.

[4] **J.P. Yonnet** : « Permanent magnet bearing and couplings », IEEE Trans. On Magnetics, vol. 17, N°.1, 1981, pp. :1169-1173.

[5] **H. Weh, C. Wrede, A. Steingröver, H. Mosebach** : « Magnetically Levitated Flywheel Energy Storage System with an Integrated Energy Converter », ICEM'96 (Vigo SP), Vol. 3, pp. 331-335, Septembre 1996.

[6] **S. Earnshaw** : « On the Nature of the Molecular Forces which Regulate the Constitution of the Luminiferous Ether », Trans. Cambridge Philos. Soc. 7, pp. 97-114, 1842.

[7] **F. Faure** : « Suspension magnétique pour volant d'inertie », thèse de doctorat de l'INP de Grenoble, 20 Juin 2003. Téléchargeable : http://www.bretagne.ens-cachan.fr/pdf/mecatronique/TheseFabienFaure_LEG_2003.pdf

[8] **R. Flanagan** : « Programme de Développement d'une Batterie Electromécanique : Phase de Définition », Flywheel Energy Systems Inc., Centre de développement des transports du Canada, Rapport TP 13212F, mars 1998.

[9] **R. Hebner, J. Beno, A. Wallis** : « Flywheel Baterries : Comme around again », IEEE Spectrum, april 2002, pp. :46-51.

[10] **J.P. Yonnet** : « Le Stockage d'Energie par Volant d'Inertie », Journée d'études SEE « Stockage de l'énergie électrique », 1er février 1996, CNAM Paris.

[11] **G. Reiner, N. Wehlau** : « Concept of a 50 MW / 650 MJ Power Source Based on Industry-Established MDS Flywheel Units », Pulsed Power Plasma Science, 2001. PPPS-2001. Digest of Technical Papers ,Volume: 1 , 17-22 June 2001, pp. : 187-190.

[12] **R.F. Thelen, J.D. Herbst, M.T. Caprio** : « A 2 MW Flywhell for Hybrid Locomotive Power », Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Fall. 2003 IEEE 58th, Volume: 5 , 6-9 Oct. 2003, pp.: 3231-235.

[13] http://www.parrypeoplemovers.com/pdf/041020PPMChassisSpec.pdf

[14] **F.C. Flanagan** : « Design, Manufacture and test Results for four High Energy Density Fibre Composite Rotors », IECEC'86, pp. 901-907, 1986.

[15] **W. E. Staton, J.R. Saliba, S. T. Piela** : « Beta Site Testing of the 20C1000 Flywheel Energy Storage System », Telecommunications Energy Conference, 1999. INTELEC '99. The 21st International , 6-9 June 1999, 6 pages.

[16] **H. Ben Ahmed, C. Kerzreho, J.Y. Cognard, J. Delamarre, B. Multon, N. Bernard** : « Moteur/générateur à réluctance excitée et à bobinage dans l'entrefer », brevet international PCT/FR00/003459, déposé le 8 dec. 2000.

[17] **N. Bernard** : « Conception et dimensionnement d'un moteur/générateur synchrone à excitation homopolaire dans l'entrefer pour accumulateur électromécanique d'énergie ». Thèse à soutenir à l'Antenne de Bretagne de l'ENS de Cachan, fin 2001. Fichier téléchargeable : http://www.bretagne.ens-cachan.fr/pdf/mecatronique/Page_SystemesEM_HautesPerf/These_Nicolas_Bernard_dec01.pdf

[18] **L. Leclerq, A. Kamagate, B. Robyns, J.M. Grave** : « Modelling and simulation of a flywheel energy storage system associated with wind and diesel generators », ICEM 2002, 5 pages (CDROM).