



**C.E.R.I.S.I.C.**

A.S.B.L.

Avenue de l'Hôpital, 22  
B-7000 Mons

DOC.N° : **NT.001.doc**

ISS.DATE : 03/01/2004

ISS. : 1

REV. DATE : -

REV. : 0

PAGE : 1 de 11

# Stockage d'énergie par roues cinétiques

## Réflexions et recommandations

Contrat : **N.A.**

Rédigé par :	DATE	VISA
BEKEMANS M .	03/01/2004	
Approuvé par :		
BEKEMANS M.	03/01/2004	



**C.E.R.I.S.I.C.**

A.S.B.L.

Avenue de l'Hôpital, 22  
B-7000 Mons

DOC.N° : **NT.001.doc**

ISS.DATE : **03/01/2004**

ISS. : **1**

REV. DATE : **-**

REV. : **0**

PAGE : **2 de 11**

**REGISTRE DES ÉDITIONS**

<b>Édition Issue</b>	<b>Revision</b>	<b>Date</b>	<b>Pages modifiées</b>	<b>Observations</b>
1	0	03/01/2004		Nouveau document



**C.E.R.I.S.I.C.**

A.S.B.L.

Avenue de l'Hôpital, 22  
B-7000 Mons

DOC.N° : **NT.001.doc**

ISS.DATE : 03/01/2004

ISS. : 1

REV. DATE : -

REV. : 0

PAGE : 3 de 11

## Table des matières

<b>1.</b>	<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>4</b>
1.1.	GÉNÉRALITÉS .....	4
1.2.	RAPPEL SUR LE STOCKAGE CINÉTIQUE .....	4
<b>2.</b>	<b>CRITÈRES DE COMPARAISON DES SYSTÈMES DE STOCKAGE ÉLECTRIQUE</b> ..	<b>6</b>
2.1.	ENERGIE MASSIQUE W.H/KG .....	6
2.2.	PROFONDEUR DE DÉCHARGE (PDD) .....	6
2.3.	PUISSANCE MASSIQUE W/KG .....	7
2.4.	DURÉE DE STOCKAGE .....	7
2.5.	VIEILLISSEMENT DURÉE DE VIE.....	8
<b>3.</b>	<b>SYNTHÈSE COMPARATIVE</b> .....	<b>8</b>
<b>4.</b>	<b>PERFORMANCES ATTENDUES</b> .....	<b>8</b>
<b>5.</b>	<b>PARTICULARITÉS D'UNE APPLICATION SPATIALE</b> .....	<b>9</b>
5.1.	LE VIDE .....	9
5.2.	LE CONTRÔLE D'ATTITUDE ET MICRO VIBRATION .....	10
<b>6.</b>	<b>AVANTAGES / INCONVÉNIENTS</b> .....	<b>10</b>
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONS</b> .....	<b>10</b>

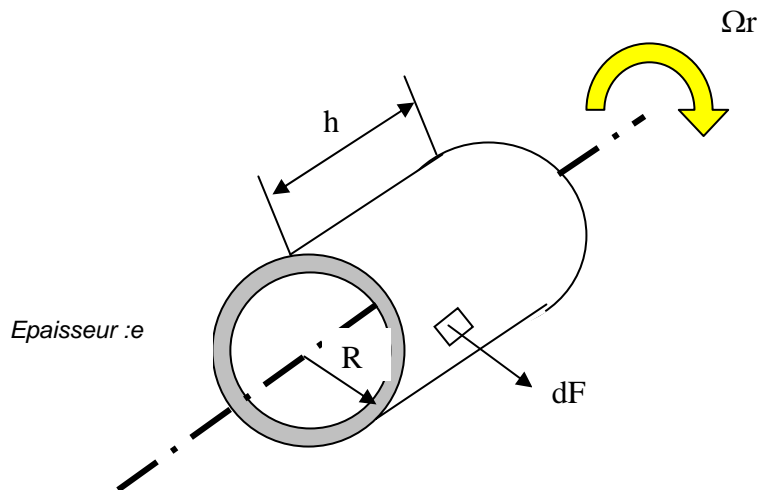


## 1. INTRODUCTION

### 1.1. Généralités

Il est important de bien définir les critères de comparaison des systèmes de stockage. Chaque technique de stockage possède ses caractéristiques propres. Une comparaison, réduite à l'examen de la performance d'énergie massique, pourrait malheureusement éclipser la réelle plus-value apportée par le stockage cinétique. Le paragraphe 2 présente un ensemble de critères qu'il faudra explorer dans le cadre du stockage cinétique.

### 1.2. Rappel sur le stockage cinétique



$\Omega$  : Vitesse de rotation  $1/s$   
 $R$  : Rayon du Cylindre  $m$   
 $e$  : Epaisseur du cylindre  $m$   
 $\sigma$  : Limite de rupture  $N/m^2$   
 $\rho$  : Densité  $kg/m^3$   
 $M$  : Masse du cylindre  $kg$

Chaque élément de surface  $ds$  est soumis à une force radiale (force centrifuge).  
Cette force vaut :

$$dF = dm \cdot \Omega^2 \cdot R$$
$$dF = \rho \cdot e \cdot dS \cdot \Omega^2 \cdot R$$

Les efforts répartis sur l'ensemble du cylindre sont assimilables à une pression P.

La force de traction sur le cylindre est :  $F = P \cdot 2 \cdot R \cdot h$

Cette force entraîne une contrainte en traction :  $\sigma = \frac{F}{2 \cdot e \cdot h} = \frac{\rho \cdot e \cdot dS \cdot \Omega^2 \cdot R \cdot 2 \cdot R \cdot h}{2 \cdot e \cdot h} = \rho \cdot \Omega^2 \cdot R^2$



**C.E.R.I.S.I.C.**

A.S.B.L.

Avenue de l'Hôpital, 22  
B-7000 Mons

DOC.N° : **NT.001.doc**

ISS.DATE : 03/01/2004

ISS. : 1

REV. DATE : -

REV. : 0

PAGE : 5 de 11

Soit une vitesse de rotation max de :

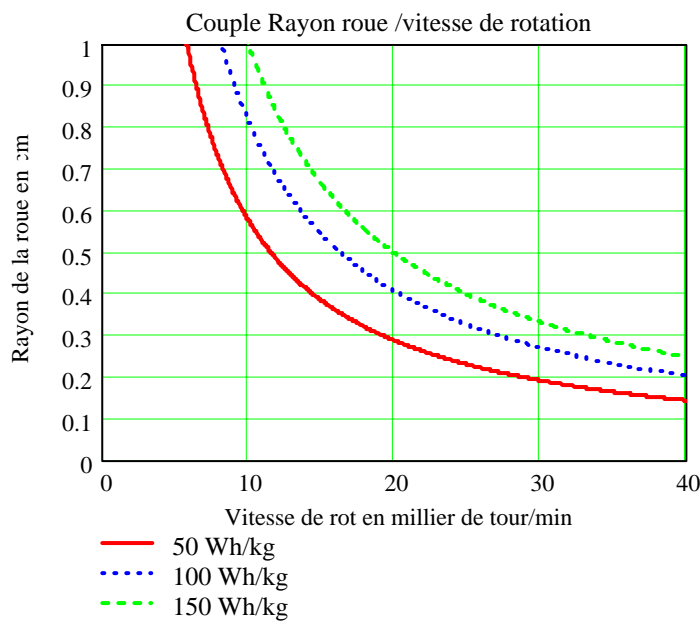
$$\Omega_m = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho \cdot R}}$$

Energie cinétique :  $E = \frac{M \cdot R^2 \cdot \Omega^2}{2}$  (J) Densité d'énergie  $dE = \frac{R^2 \cdot \Omega^2}{2}$  (J/kg)

La densité d'énergie max est atteinte à  $\Omega_m$  soit :

$$dE = \frac{\sigma}{2 \cdot \rho}$$

Comme on peut le constater, la densité maximum d'énergie est un élément intrinsèque du matériau, quelle que soit la géométrie de la roue. Voici les caractéristiques de rayon et de vitesse de rotation pour différentes densités d'énergies brutes.



Le choix du bon couple Rayon/Vitesse peut être obtenu en affectant à chaque accroissement (vitesse ou rayon) une fonction coût qui sera globalement minimisée.

Voici quelques exemples d'énergies spécifiques brutes.

Matériaux	Densité r kg/m <sup>3</sup>	Limite. Elast MN/m <sup>2</sup>	Energie spéc. W.h/kg
Steel (AISI 4340)	7800	1800	32
Alloy ( Al Mn Mg)	2700	600	31
Titanium (Ti Al6 Zr5)	4500	1200	37
Fibre de verre ( 60 % E-Glass)	2000	1600	111
Fibre de Carbone (60% HT-Carbon)	1500	2400	222



**C.E.R.I.S.I.C.**

A.S.B.L.

Avenue de l'Hôpital, 22  
B-7000 Mons

DOC.N° : NT.001.doc

ISS.DATE : 03/01/2004

ISS. : 1

REV.DATE : -

REV. : 0

PAGE : 6 de 11

## 2. CRITÈRES DE COMPARAISON DES SYSTÈMES DE STOCKAGE ÉLECTRIQUE

### 2.1. Energie massique W.h/kg

C'est évidemment le premier critère considéré. Des applications cinétiques existantes atteignent aujourd'hui 45 à 90 Wh/kg <sup>1</sup> En ajoutant de 30% à 60% de masse système, ces performances retombent à des valeurs comprises entre 28 et 60 Wh/kg. Cet objectif de 60 Wh/kg est généralement reconnu comme raisonnable pour une profondeur de décharge de 95%.

Plus les travaux sur la jante permettront d'augmenter la résistance mécanique en réduisant la masse, plus les composants systèmes (stator, palier, électronique) conditionneront l'énergie massique net. Aujourd'hui cette masse représente déjà plus de 50% de la masse totale.

L'approche nouveaux matériaux devrait être globale et couvrir également les composants statiques et semi-statiques comme l'enceinte de confinement, les bras du rotor, etc.

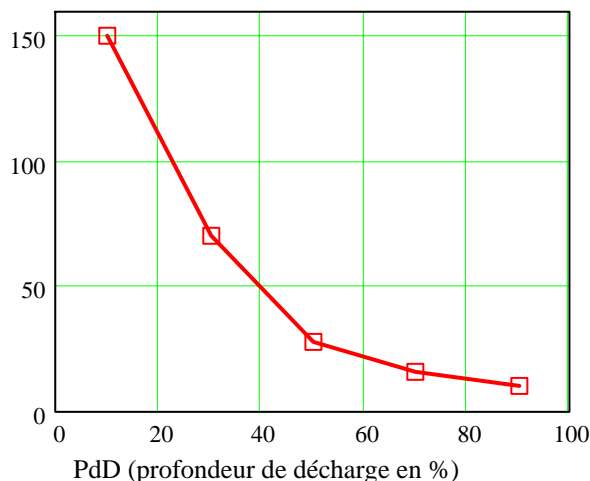
### 2.2. Profondeur de décharge (PdD)

La profondeur de décharge est un élément très important, **car il peut modifier considérablement l'énergie massique définie ci-dessus.**

Il faut parler de Wh utilisable par kg et pas seulement de Wh/kg stocké. La différence peut être considérable pour les batteries. La profondeur de décharge conditionnera le nombre de cycles. Voici un exemple pour les batteries NiH2 .

Cycle de vie en fonction de la PdD

Nb de cycles x 10<sup>3</sup>



Ainsi pour maximiser le nombre de Wh totaux fourni par la batterie sur sa durée de vie, il est nécessaire de réduire la profondeur de décharge. Ainsi, pour des satellites en orbite basse LEO où le nombre de cycles est important\* on atteint des profondeurs de décharge qui ne dépassent pas 20 à 30%. **Cela signifie que 80 à 70 % des W.h stockés ne sont pas utilisables.**

<sup>1</sup> Jack G ; Bitterly IEEE AES Systems Magazine, Aout 1998 Flywheel technology



**C.E.R.I.S.I.C.**

A.S.B.L.

Avenue de l'Hôpital, 22  
B-7000 Mons

DOC.N° : **NT.001.doc**

ISS.DATE : 03/01/2004

ISS. : 1

REV. DATE : -

REV. : 0

PAGE : 7 de 11

- Période de révolution +/- 1h40 soit 17 cycles/jour en LEO contre 1 cycle/jour en orbite GEO

<b>Profil de mission</b>	<b>PdD</b>	<b>Bat. NiH2</b>	<b>Bat. Li-Ion</b>
Stockage de secours	100%	50 Wh/kg	90 Wh/kg
Orbite GEO	70-80 %	35-40 Wh/kg	60-70 Wh/kg
Orbite LEO	20-30 %	10-20 Wh/kg	20-30 Wh/kg

(données datant de 1999)

Sur ce point particulier, le stockage cinétique permet d'obtenir des profondeurs de décharge proches de 100% typiquement 95%. Il faut cependant signaler que l'électronique de puissance doit s'accommoder de ces variations. Une décharge importante de la roue signifie en effet une réduction importante de la vitesse de rotation. A faible vitesse la réduction de la FEM sera alors compensée par un accroissement du courant se qui dégradera, les performances de rendement électrique.

La littérature considère généralement que la profondeur de décharge n'a pas de conséquence directe sur la fatigue du matériau. Cela ne signifie pas que le matériau ne se fatigue pas.

La fatigue existe également dans les roues cinétiques, mais contrairement aux batteries, ce n'est pas l'énergie max extraite qui stresse le matériau, mais plutôt l'énergie max stockée ( plus exactement le temps cumulé de fonctionnement à vitesse max)

Les recherches sur les phénomènes de fatigue ainsi que sur la fiabilité de l'ensemble permettront donc une comparaison objective entre les roues et les batteries en terme de Wh totaux fournis en fin de vie.

### 2.3. Puissance massique W/kg

La puissance massique correspond indirectement au temps de charge et de décharge. Le tableau présenté au paragraphe 3 montre que la performance de puissance crête du stockage cinétique est particulièrement intéressante. Elle dépasse d'un ordre de grandeur les valeurs obtenues par le stockage chimique . C'est donc une propriété à cultiver pour des applications spécifiques telles que le freinage d'éoliennes, les véhicules électriques, etc.

L'électronique de puissance devra particulièrement être adaptée.

### 2.4. Durée de stockage

La durée de stockage permet d'apprécier la puissance dissipée par Wh stocké.

Dans l'application de la roue cinétique ETCA la puissance dissipée était de l'ordre de 20W

Pour 15 Wh soit une durée de stockage de 45 min. C'est une valeur particulièrement faible, mais la fonction de cette roue n'était pas le stockage d'énergie, mais plutôt le contrôle d'attitude. Il faut cependant être réaliste c'est là un point faible du stockage cinétique face à ses concurrents chimiques qui ont des temps de stockage de plusieurs mois.





**C.E.R.I.S.I.C.**

A.S.B.L.

Avenue de l'Hôpital, 22  
B-7000 Mons

DOC.N° : **NT.001.doc**

ISS.DATE : 03/01/2004

ISS. : 1

REV. DATE : -

REV. : 0

PAGE : 9 de 11

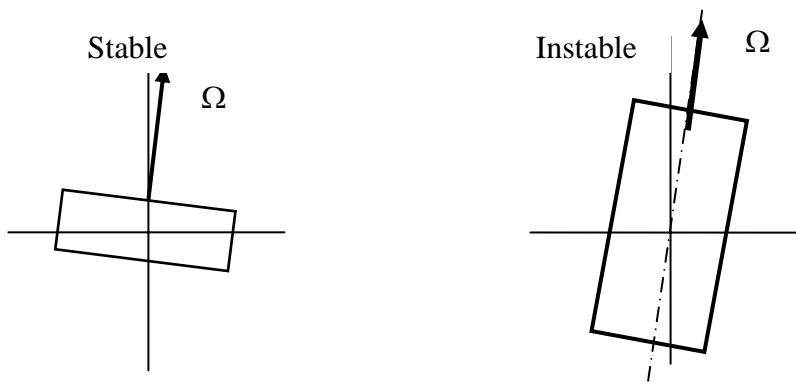
Energie spécifique brute : 150 Wh/kg  
Energie spécifique nette : 60 Wh/kg  
Vitesse de rotation : > 40 000 tr/min  
Rayon du rotor : < 25 cm  
Masse de la jante : 10 à 20 Kg  
Energie : 600 à 1200 W.h  
Puissance : 1kW

### Remarque sur la vitesse de rotation :

Rappelons que, à énergie constante, **la vitesse de rotation n'a aucune incidence sur la masse de la roue, mais agit simplement sur le rayon du rotor**. Par contre, il est clair que la réduction du rayon du rotor à masse constante permet de réduire le volume de l'enceinte et par conséquent le poids de l'ensemble.

Précisons également que la raideur du palier à une incidence directe sur les vitesses critiques de la roue (mode de précession et de nutation). Dans le cadre de roues sur palier magnétique il est impossible de placer ces vitesses critiques au-dessus de la vitesse de rotation. Les vitesses critiques sont généralement placées à des fréquences basses pour ne les croiser que lors de la première montée en vitesse. Ces vitesses critiques intimement liées à la performance du palier supra, conditionne donc la profondeur de décharge. On constate que les performances de stabilité gyroscopique, de profondeur de décharge, et d'amortissement des modes mécaniques, sont intimement liées à la caractéristique du palier (impédance de liaison).

Le rapport entre les inerties axiales et latérales est également important en terme de sollicitation des paliers.



L'analyse de la dynamique du rotor est un élément dimensionnant pour les butées magnétiques du palier et donc indirectement sur la hauteur de la jante.

## 5. PARTICULARITÉS D'UNE APPLICATION SPATIALE

### 5.1. Le vide

La particularité du vide est favorable pour le ratio Wh/Kg en effet là-haut le vide ne coûte rien. Par contre, un problème particulier est la charge électrique du rotor. Celui-ci est bombardé par les charges de la ceinture de proton et d'électron. De nombreuses études ont été lancées en parallèle à la conception de la roue ETCA mais la décharge électrostatique du rotor reste un point ouvert non résolu pour les flywheels.



**C.E.R.I.S.I.C.**

A.S.B.L.

Avenue de l'Hôpital, 22  
B-7000 Mons

DOC.N° : **NT.001.doc**

ISS.DATE : 03/01/2004

ISS. : 1

REV. DATE : -

REV. : 0

PAGE : 10 de 11

## 5.2. Le Contrôle d'attitude et micro vibration

l'interaction avec le système d'attitude du satellite est l'un des points les plus critiques de la « spatialisation » des roues. L'ordre de grandeur des couples produits par les roues à réaction est de l'ordre de quelques mili N.m . De plus, le moment cinétique embarqué doit être nul. Il y aura donc nécessairement des paires de roues contrarotatives. Les deux moteurs devront être rigoureusement synchrones et le partage du courant fourni par les machines devra quant à lui être contrôlé de façon à garantir des couples de perturbation, lors des appels de charge, compatible de la spécification de microvibrations du satellite. Un TFE avec l'ULB avait été lancé en son temps sur ce problème avec Mr A. Genon (année académique 1999 2000) .

La spécification micro-vib pour applications aux satellites d'observation est particulièrement sévère 0.008 Nm jusqu'à 1Hz ensuite + 20 dB/dec pour les fréquences supérieures.

L'ondulation de couple générée par les courants élevés produits en fin de décharge devra également être attentivement examinée.

## 6. AVANTAGES / INCONVÉNIENTS

Examinons en conclusion les avantages et inconvénients du stockage cinétique

<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Grande puissance massique</li><li>• Rendement énergétique élevé</li><li>• Rendement de charge élevé</li><li>• Durée de vie indépendante du nombre de cycles</li><li>• Connaissance précise du niveau d'énergie stocké</li><li>• Gestion de la charge simplifiée.</li><li>• Moins de contraintes thermiques (Pour les applications spatiales, on utilise des réchauffeurs de batterie)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Faible durée de stockage</li><li>• Décharge complète à éviter (Rendement diminue, risque d'instabilité mécanique)</li><li>• Risque de rupture et d'éclatement</li><li>• Pour le spatial difficulté de maîtriser le moment cinétique et les micro-vibrations</li></ul>

## 7. CONCLUSIONS

Le stockage cinétique paraît séduisant pour des applications à fortes puissances spécifiques et aux nombres de cycles importants.

Les applications pour lesquelles le gain pourrait être le plus significatif sont les missions du type orbite basse LEO, dont la durée est aujourd'hui limitée par les batteries pour cause du nombre de cycles élevé.

Pour des applications sol on peut imaginer que le stockage cinétique soit intéressant dans le domaine des alimentations non interruptible (UPS) où il s'agit de fournir pendant un temps limiter une puissance élevée avant le déclenchement de groupes électrogènes de secours. Les alimentations de secours dans le domaine médical ou informatique sont à examiner. Les principaux avantages sont : le volume réduit et poids réduit, l'absence d'entretien, le monitoring permanent de l'état de charge, le respect de l'environnement, etc.

Les applications de type UPS par leur besoin de fortes puissances instantanées de décharge rendent les stockages chimiques peu adaptés. Le stockage cinétique est également particulièrement



# C.E.R.I.S.I.C.

A.S.B.L.

Avenue de l'Hôpital, 22  
B-7000 Mons

DOC.N° : NT.001.doc

ISS.DATE : 03/01/2004

ISS. : 1

REV. DATE : -

REV. : 0

PAGE : 11 de 11

intéressant pour des applications qui demandent une forte puissance instantanée de recharge (véhicule électrique). Ainsi, l'association du stockage chimique et cinétique permettrait d'obtenir un système de stockage intégré présentant à la fois des temps de recharges très courts (+/-10 fois plus court que le chimique seul) et des temps de stockage long (identique au chimique).

A l'examen des différents points analysés dans ce document on comprend aisément que la conception d'une roue à stockage est un problème complexe aux multiples interactions. La définition initiale des éléments intégrant une vision globale des différentes contraintes d'intégrations est un élément majeur dans la réussite d'un tel projet.