

# Analyse des effets des matériaux sur le profil des contraintes appliquées au volant d'inertie

S.SAIDI<sup>1</sup>, A.DJEBLI<sup>2</sup>

1. Energétique, Mécanique des Fluides et Matériaux, Université Abdelmalek Essaâdi, FS Tétouan.

[sara\\_ing@hotmail.fr](mailto:sara_ing@hotmail.fr)

2. Energétique, Mécanique des Fluides et Matériaux, Université Abdelmalek Essaâdi, FS Tétouan.

[djebli\\_abdelouahed@yahoo.fr](mailto:djebli_abdelouahed@yahoo.fr)

## Résumé :

Les générateurs éoliens sont des générateurs dont la source primaire d'énergie est le vent. Il est bien connu que cette source a des caractéristiques très fluctuantes et imprévisibles donc il est impossible de prédire sa valeur pour un moment donné. Cela pose beaucoup de problèmes pour les gestionnaires des systèmes énergétiques au niveau de la stabilisation de la production électrique en particulier pour les sites non reliés au réseau électrique.

Nous avons choisi le système de stockage électromécanique qui peut apporter une solution pour régler le problème de la fluctuation de l'énergie éolienne dû aux changements brusques de la vitesse du vent.

L'objectif de ce travail est d'étudier le système inertiel de stockage d'énergie (SISE) associé à un générateur éolien qui permet d'assurer un équilibre entre la demande et l'offre de l'énergie électrique pour stabiliser le réseau électrique.

Dans ce travail nous avons choisi un matériau de faible masse volumique et de résistance à la rupture la plus forte possible. Aussi nous avons choisi un cylindre creux comme forme géométrique appropriée afin d'augmenter la capacité énergétique du SISE et son rendement.

Afin de modéliser notre structure, tout d'abord nous avons utilisé le logiciel ABAQUS CAE pour adapter la méthodologie d'éléments finis. Ensuite nous avons fait une comparaison entre trois technologies de volant : volant en fibre de Carbone à haute résistance (R), volant en kevlar et volant en verre à haute performance (R). Puis, nous avons appliqué une force de pression sur ces trois technologies de volant afin d'examiner leur capacité de déformation. En fin, nous avons retenu le matériau le moins déformé et le plus efficace à utiliser pour notre machine de stockage.

**Mots-clés:** *SISE, Volants d'inertie, Aérogénérateurs, Réseau électrique, Cylindre creux, Capacité énergétique.*

## 1. Introduction :

Le système inertiel de stockage d'énergie (SISE) est une des technologies développées pour le stockage de l'énergie éolienne. Les accumulateurs à volants d'inertie associés à des générateurs éoliens sont des systèmes de stockage électromécanique, ils permettent le stockage de l'énergie sous forme cinétique à l'intérieur d'un volant d'inertie notamment lorsque la vitesse du vent augmente. En outre, les accumulateurs permettent la restitution de l'énergie électrique au réseau lors de la diminution de la vitesse du vent.

Le système de stockage d'énergie par volant d'inertie est constitué d'un volant à grande inertie, couplé à un moteur générateur qui permet de transférer de l'énergie électrique au volant (accélération) puis de la récupérer (freinage), avec des paliers magnétiques. Afin de réduire les frottements, le tout est installé dans une enceinte sous vide (volant rapide) pour supprimer le frottement de l'air. Les paliers doivent permettre la rotation de l'ensemble avec un minimum de pertes.

L'objectif de ce travail est d'étudier la capacité énergétique du SISE selon le type de matériau et la forme du volant, afin d'augmenter leur performances énergétiques et leur rendement.

## 2. Formulation mathématique

Le fonctionnement d'un système de stockage inertiel est basé sur l'énergie cinétique de rotation  $E_c$  accumulée dans le volant :

$$E_c = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (1)$$

Où J est le moment d'inertie du volant et  $\omega$  sa vitesse de rotation.

Le moment d'inertie d'un cylindre creux a pour expression:

$$J = \frac{1}{2} M(R_{int}^2 + R_{ext}^2) \quad (2)$$

Où M est la masse tournante,  $R_{int}$  et  $R_{ext}$  se sont les rayons intérieur et extérieur du volant.

La vitesse périphérique maximale du volant a pour expression :

$$V_{p \max} = K_v \sqrt{\frac{R_e}{\rho}} \quad (3)$$

Les équations d'équilibre en coordonnées cylindriques :

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}}{r} + \rho f_r = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \sigma_{zr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{zr}}{r} + \rho f_z = 0 \quad (5)$$

L'équation différentielle en déplacement radial  $U_r$  :

$$\frac{d^2 U_r}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dU_r}{dr} - \frac{U_r}{r^2} = -\frac{1-\vartheta^2}{E} \rho \omega^2 r \quad (6)$$

La solution générale de cette équation différentielle est de la forme :

$$U_r(r) = Ar + \frac{B}{r} - \frac{1-\vartheta^2}{8E} \rho \omega^2 r^3 \quad (7)$$

Les composantes du tenseur des contraintes se mettent sous la forme :

$$\sigma_{rr} = \frac{A}{r^2} + B - \frac{\rho \omega^2 r^2}{8} (3 + \vartheta) \quad (8)$$

$$\sigma_{rr} = -\frac{A}{r^2} + B - \frac{\rho \omega^2 r^2}{8} (1 + 3\vartheta) \quad (9)$$

Où A et B sont deux constantes d'intégration.

Les conditions à limites retenues dans ce problème sont :

$$\sigma_{rr}(r = R_{int}) = \sigma_{rr}(r = R_{ext}) = 0 \quad (10)$$

Ce qui donne

$$A = -\frac{3+\vartheta}{8} \rho \omega^2 R_{int}^2 R_{ext}^2 \quad (11)$$

$$B = \frac{3+\vartheta}{8} \rho \omega^2 (R_{int}^2 + R_{ext}^2) \quad (12)$$

A l'aide des conditions aux limites, les contraintes s'écrit alors de la forme :

$$\sigma_{rr} = (3 + \vartheta) \frac{\rho \omega^2 R_{ext}^2}{8} \left[ \left( \frac{R_{int}}{R_{ext}} \right)^2 + 1 - \left( \frac{r}{R_{ext}} \right)^2 - \left( \frac{R_{int}}{r} \right)^2 \right] \quad (13)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = (3 + \vartheta) \frac{\rho \omega^2 R_{ext}^2}{8} \left[ \left( \frac{R_{int}}{R_{ext}} \right)^2 + 1 - \frac{1+3\vartheta}{3+\vartheta} \left( \frac{r}{R_{ext}} \right)^2 + \left( \frac{R_{int}}{r} \right)^2 \right] \quad (14)$$

L'équation finale de déplacement est :

$$U_r(r) = (3 + \vartheta)(1 - \vartheta) \frac{\rho \omega^2 R_{ext}^2 r}{8E} \left[ \left( \frac{R_{int}}{R_{ext}} \right)^2 + 1 - \frac{1+\vartheta}{3+\vartheta} \left( \frac{r}{R_{ext}} \right)^2 + \frac{1+\vartheta}{1-\vartheta} \left( \frac{R_{int}}{r} \right)^2 \right] \quad (15)$$

Les déformations du volant s'écrit sous la forme :

$$\varepsilon_{rr} = \frac{\rho \omega^2 R_{ext}^2}{8E} \left[ 3(\vartheta^2 - 1) \left( \frac{r}{R_{ext}} \right)^2 + (3 + \vartheta) \left[ (1 - \vartheta) \left( 1 + \left( \frac{R_{int}}{R_{ext}} \right)^2 \right) - (1 + \vartheta) \left( \frac{R_{int}}{r} \right)^2 \right] \right] \quad (16)$$

$$\varepsilon_{\theta\theta} = \frac{\rho \omega^2 R_{ext}^2}{8E} \left[ (\vartheta^2 - 1) \left( \frac{r}{R_{ext}} \right)^2 + (3 + \vartheta) \left[ (1 - \vartheta) \left( 1 + \left( \frac{R_{int}}{R_{ext}} \right)^2 \right) + (1 + \vartheta) \left( \frac{R_{int}}{r} \right)^2 \right] \right] \quad (17)$$

Avec :

Module d'Young

$$E = \frac{\mu(3\lambda + 3\mu)}{\lambda + \mu} \quad (18)$$

Coefficient de poisson

$$\vartheta = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \quad (19)$$

Deuxième coefficient de Lamé

$$\lambda = \frac{E\vartheta}{(1+\vartheta)(1-2\vartheta)} \quad (20)$$

Module de coulomb

$$\mu = \frac{E}{2(1+\vartheta)} \quad (21)$$

### 3. Géométrie et matériaux

Nous avons privilégié de travailler sur trois types de matériaux de faible masse volumique et de résistance à la rupture forte la plus possible. Aussi nous avons choisi la forme géométrique la mieux appropriée un volant sous forme d'un cylindre creux de diamètre  $d= 200$  mm, de rayon intérieur  $R_{int}= 300$  mm, de rayon extérieur  $R_{ext}= 500$  mm et de hauteur  $h= 1000$  mm. En outre, nous avons étudié trois technologies de volant à savoir : volant en Kevlar (type 49), fibre de Carbone à haute résistance et verre R dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Matériaux	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	E (GPa)	$\nu$
Verre R	2500	69	0.22
Carbone R	1750	240	0.3
Kevlar 49	1450	34.5	0.4

Tableau 1 : Propriétés physiques des matériaux

#### 4. Résultats

La figure 1 présente le volant étudié avant l'application de force de pression.

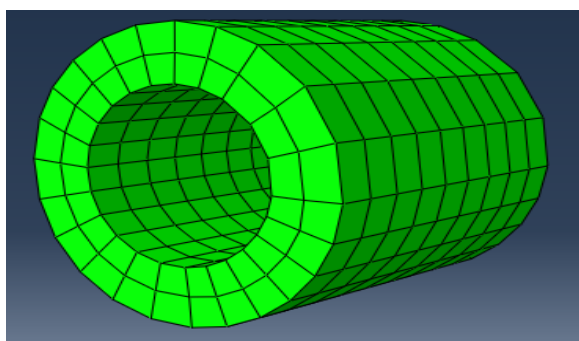


Figure 1 : le volant d'inertie

Les figures 2, 3 et 4 présentent les trois volants étudiés après l'application de force de pression.

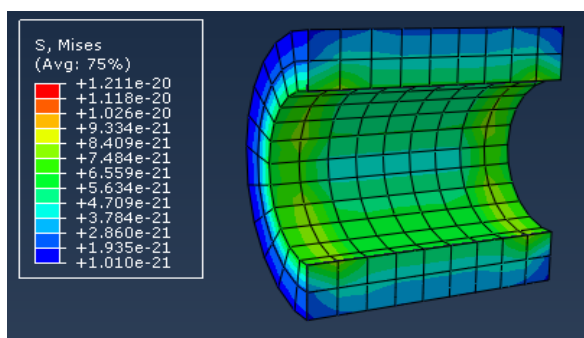


Figure 2 : le volant d'inertie en Carbone à HR

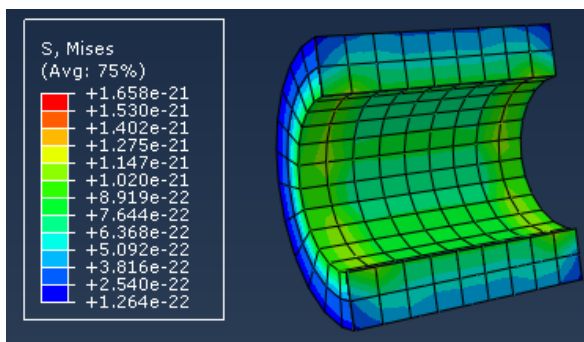


Figure 3 : le volant d'inertie en Kevlar 49

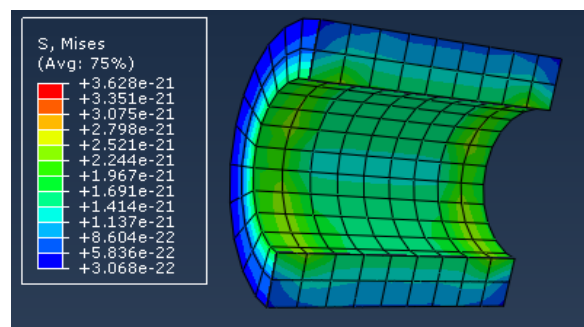


Figure 4 : le volant d'inertie en Verre R

#### 5. Conclusion

En guise de conclusion à propos ce présent travail, il y a lieu de souligner que nous avons travaillé sur un volant spécifique ayant la forme d'un cylindre creux qui représente la forme géométrique la plus appropriée au système de stockage, et ce afin d'augmenter la capacité énergétique du SISE et son rendement. Finalement, nous avons retenu que le matériau carbone à haute résistance est le matériau le moins déformé et celui aussi qui résiste mieux à la rupture, parmi les trois matériaux étudiés susmentionnés.

#### Référence:

- [1] M.Maya, *cours de mécanique des milieux continus*, arts et métiers paristech, centre d'enseignement et de recherche de cluny, 2014.
- [2] N. Bernard, *conception, dimensionnement et commande d'un moteur/générateur synchrone a excitation homopolaire et a bobinages dans l'entrefer pour accumulateur électromécanique d'énergie*, sciences de l'ingénieur [physique], ENS de Cachan, 2010.
- [3] C. Kerzrého, *caractérisation et optimisation d'une batterie électromécanique sous chargement cyclique*, thèse de doctorat, ens cachan.
- [4] H. Ben Ahmed, B.Multon, N.Bernard, C. Kerzreho, *Le stockage inertiel électromécanique*, revue 3EI, 2007.
- [5] F.Faure, *Suspension magnétique pour volant d'inertie*, Sciences de l'ingénieur [physique], Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2003.