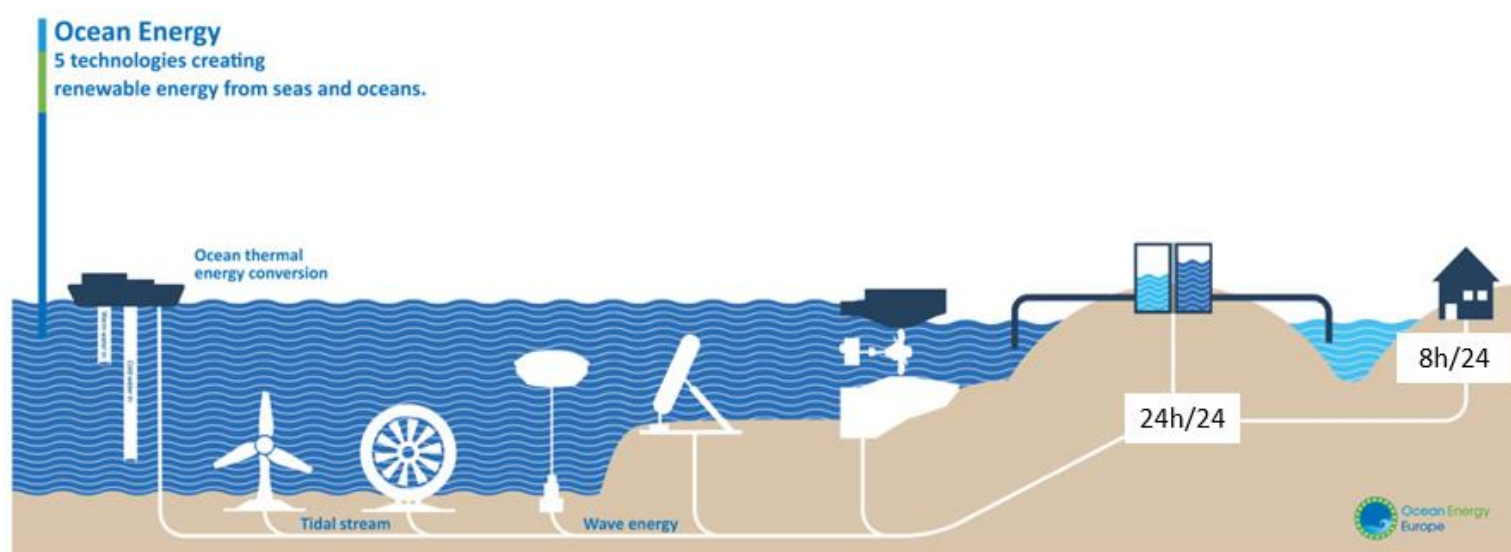


Régulation de l'énergie électrique fournie par les Energies Marines Renouvelables à un réseau ilien par un système inertiel

Rapport TIPE Yannaël Bossard



BOSSARD Yannaël – NANOT Florian – SIMON Alexandre

CPGE PTSI/PT* 2018-2020 Lycée Déodat de Séverac Toulouse

Remerciements :

Je tiens à remercier le responsable du projet Levisys de l'UTT de Troyes, Pierre-Antoine Adragna, de nous avoir accordé du temps pour répondre à nos questions et pour ses précieuses connaissances sur le sujet des volants d'inertie.

Je remercie également mes professeurs encadrants monsieur Brousseau et monsieur Redondo pour leurs aides et conseils tout au long du projet.

Je remercie également mes camarades de TIPE qui sont aussi mes camarades de khôlles, Florian Nanot et Alexandre Simon, pour avoir accepté de travailler sur le sujet du stockage d'énergie par volant d'inertie qui est un sujet qui me tenait à cœur.

Résumé :

La régulation de l'énergie électrique par un système inertiel de stockage d'énergie permet de répondre à des problématiques concrètes telles que l'intégration des EMR aux réseaux électriques isolés. Elle permet en effet de réduire l'incidence de l'intermittence de la production marine en stockant de manière temporaire les excès de production.

Les EMR se développent massivement mais leur production n'étant pas stable, cela les rend impropres à l'implantation directe sur des réseaux îliens de petites tailles. La régulation de la production de cette énergie permettrait aux îles d'utiliser la plus grande ressource énergétique à proximité.

Au cours de ce dossier, nous allons étudier différents paramètres d'optimisation du stockage d'énergie par volant d'inertie. Nous verrons notamment l'importance de faire le vide dans la chambre du volant, nous étudierons les contraintes auxquelles le volant fait face et nous aborderons aussi les formes optimales pour un volant.

Table des matières

Remerciements	2
Résumé	2
Introduction.....	5
Problématique.....	6
Mes objectifs :	6
I/ Impact de la forme du volant sur son inertie	8
Discussion	13
II/ Mécanique et Contraintes d'un volant d'inertie :	14
(Dés)Equilibre et vibrations.....	15
Les effets de la gravité.....	18
Les contraintes exercées sur le volant :	19
Discussion	22
III/ Fluide :.....	23
Théorie	23
Expérimentations	25
1 ^{ère} expérience :.....	25
2 ^{ème} expérience :.....	26
3 ^{ème} expérience :.....	27
4 ^{ème} expérience :.....	29
Conclusion :	31
Références :.....	32

Table de figures

Figure 1 - Schéma présentant la répartition des pertes d'énergie d'un volant à stockage [5]	6
Figure 2 - Différentes formes et structures bien distinctes de volants d'inertie pour stockage.....	7
Figure 3 - Calcul de l'inertie d'une sphère.....	8
Figure 4 - Intégralité des volants et de leurs caractéristiques - Dessiné sur SolidWorks.....	11
Figure 5 - Répartition des 48 volants en fonction du rapport Inertie/Volume balayé en rotation.	12
Figure 6 - Utilisation et accident de système utilisant des volants d'inertie.....	14
Figure 7 - Illustration présentant la décomposition d'un équilibrage dynamique.....	15
Figure 8 - Comparaison des contraintes et déplacements	16
Figure 9 - Graphique présentant l'évolution des contraintes de déséquilibre	17
Figure 10 - Balance magnétique d'équilibre statique	18
Figure 11 - Contraintes mécaniques imposées à l'arbre par la gravité.....	19
Figure 12 - Différents facteurs de forme intervenant dans la contrainte maximale admissible	20
Figure 13 - Corrélation entre une partie simulation CAO et expérimentation pour la RdM	21
Figure 14 - Mise en évidence d'une défaillance dans ma simulation CAO RdM.....	21
Figure 15 - Simulation avec FlowSimulation de la température/des tourbillons	23
Figure 16 - Comparaison d'une simulation mécanique de fluide.....	24
Figure 17 - Photos de l'expérience écoulement du fluide autour d'un volant cylindrique.....	25
Figure 18 - Balance magnétique d'équilibrage statique.....	26
Figure 19 - Expérience de rotation d'en un fluide visqueux (Eau)	27
Figure 20 - Graphique montrant la différence de consommation des 2 volants	28
Figure 21 - Conception d'une boîte d'étanchéité pour l'expérience de rotation à vide	29
Figure 22 - Expérience de rotation dans une cloche en verre à vide	30
Figure 23 - Graphique de corrélation entre consommation moteur et pression ambiante	31

Introduction :

Les énergies marines renouvelables sont de plus en plus étudiées et utilisées. L'océan constitue une immense ressource d'énergie jusqu'alors négligée vis-à-vis d'autres énergies comme le nucléaire ou le charbon. Utiliser la ressource environnante est notamment un enjeu majeur pour les îles en vue d'atteindre l'indépendance énergétique.

Cependant, contrairement aux réseaux interconnectés métropolitains, les réseaux îliens (souvent isolés) sont beaucoup plus sensibles aux perturbations issues de la production renouvelable. En effet, la production marine n'est pas en phase avec la consommation et peut présenter de fortes variations qui peuvent entraîner une dérive en fréquence et en tension du réseau.

Ainsi RTE, gestionnaire du réseau de transport d'électricité, développe actuellement un logiciel de régulation dans le cadre du projet RINGO intégrant l'implantation d'importantes capacités de stockage et permettant de faciliter l'intégration des énergies renouvelables. Cependant les producteurs ont aussi un rôle important à jouer et ont intérêt à stocker l'énergie la moins chère, produite lorsque la demande est inférieure à la production, pour la vendre lorsque la demande est importante à un prix plus élevé.

De plus, l'entreprise américaine Beacon Power a développé plusieurs fermes de volants d'inertie (environ 200 unités) adaptées à des réseaux îliens. On peut en déduire que la capacité d'énergie stockable par un volant de dimension raisonnable est faible devant la quantité fluctuante d'énergie à stocker, le système de stockage et de redistribution globale doit par conséquent comporter une multitude de volants d'inertie. [1]

Ainsi le développement d'une solution de stockage permettrait d'augmenter l'intégration, jusqu'ici limitée, des énergies marines sur les réseaux îliens.

Le système doit pouvoir emmagasiner une surproduction d'énergie quand les conditions météorologiques sont favorables ou lorsque la demande est faible. L'appareil permet de stocker l'énergie est le volant d'inertie. Son fonctionnement est basé sur trois phases principales. Une première phase de conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique de rotation effectuée par un moteur. Puis une seconde phase de stockage où le moteur et le volant conservent leur énergie cinétique en attendant que l'énergie soit redistribuée sur le réseau. Or pendant la phase de stockage le moteur reste alimenté pour maintenir le volant à vitesse constante. Cependant, la liaison encastrement entre le volant et le moteur pourrait hypothétiquement être remplacée par un embrayage car cela permettrait de ne pas prendre en compte le rendement du moteur dans le rendement de la phase de stockage. Enfin la phase de restitution de l'énergie nécessite que le moteur puisse fonctionner en mode générateur. Le volant d'inertie joue donc le rôle d'une batterie mais de plus grosse capacité, moins polluante, avec une durée de vie bien plus importante et une (dé)charge plus rapide. [2]

La quantité d'énergie pouvant être stockée dans le volant d'inertie est la suivante :

$$E=0.5*J*\omega^2$$

Avec J le moment d'inertie, ω la vitesse angulaire.

Ainsi, pour stocker de grandes quantités d'énergie il faut la plus grande inertie possible et les vitesses angulaires les plus élevées (à privilégier car si on double la masse, on double l'énergie stockée mais si on double la vitesse, on quadruple l'énergie stockée) mais le volant doit pouvoir résister aux contraintes mécaniques causées par sa vitesse de rotation importante et sa masse. [3]

Pour atteindre ces vitesses élevées, le volant d'inertie doit être mis en rotation par l'intermédiaire d'un moteur/générateur. Le choix du moteur est très important car le rendement global du système est principalement imposé par le moteur. Le moteur synchrone à aimants permanents est adéquat à la situation car son glissement est nul et il induit peu de vibrations. [4]

La transmission mécanique des efforts sur un système comme les volants d'inertie est importante. En effet la vitesse de rotation des volants étant très élevée (jusqu'à 60 000 tr/min), le guidage en rotation pour réduire au maximum les frottements, et donc augmenter de manière pertinente le rendement, impacte fortement. Pour les volants d'inertie, le guidage par paliers magnétiques est le plus utilisé.

Problématique :

Le système visant à stocker et redistribuer de l'énergie, il est primordial d'en optimiser les paramètres influant les performances du système comme le volant. Quel est le volant le plus performant pour une ferme de volants et ses nombreuses exigences ?

Mes objectifs :

Mon objectif est d'étudier différents paramètres influant sur les performances du système de stockage par volants d'inertie. Comme le montre ce schéma, il y a 3 principales branches à étudier pour optimiser les pertes de stockage d'un volant. Mais ce que le schéma ne met pas en évidence et qu'il faut aussi optimiser la quantité initiale d'énergie stockable avant d'en étudier les pertes. Ici, une case fondamentale à ne pas oublier est donc "Puissance active Volant".

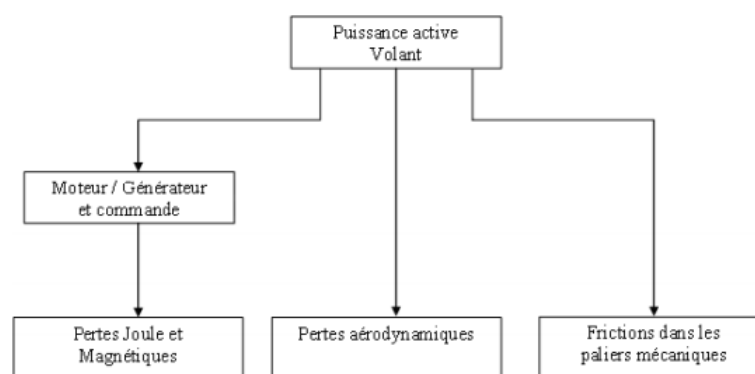


Figure 1 - Schéma présentant la répartition des pertes d'énergie d'un volant à stockage [5]

Comme abordé précédemment, l'énergie stocké par un volant s'exprime comme le produit de son inertie et de sa vitesse au carré. Il faut donc jouer entre ces deux paramètres pour trouver le meilleur compromis. Choisir la forme la plus optimisé pour un volant est extrêmement complexe voire non solvable. En effet, l'on pourrait par exemple effectuer supposer un type de moteur, donc connaître sa vitesse maximale puis trouver le meilleur volant à cette vitesse-là. Cependant, il existe aujourd'hui des volants d'inertie jouant le rôle d'arbre de moteur. C'est donc un moteur fait sur mesure (figure 2 ci-dessous ([5] et [6])). L'on ne connaît alors pas les caractéristiques de vitesses maximales, ni de forme, sans parler des matériaux. Tout est à redéfinir. L'on ne connaît pas non plus l'énergie à stocker car l'on veut qu'elle soit maximale. Comme tout est à optimiser, il n'y a que des inconnus et le problème devient donc impossible sans poser des hypothèses tout du long. A priori, plus un volant est gros meilleur sera son rendement. Mais s'il est trop gros, il sera très coûteux, il prendra beaucoup de place donc ses possibilités d'utilisations seront réduites et les risques en cas d'accidents seront plus importants.

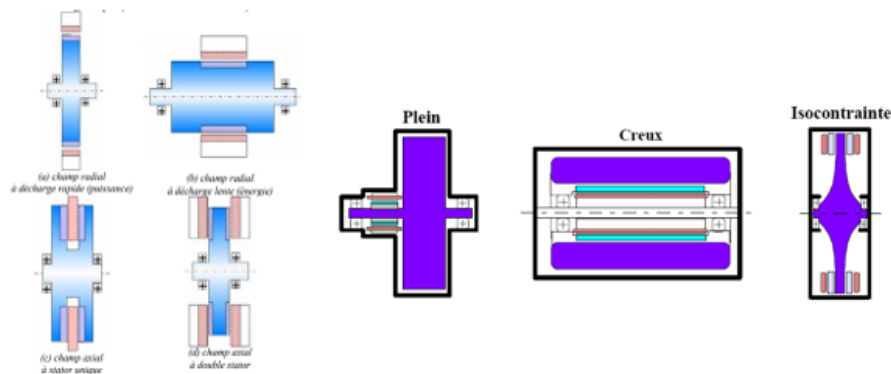


Figure 2 - Différentes formes et structures bien distinctes de volants d'inertie pour stockage

A l'aide de différentes expériences et logiciels, je pourrai mettre en évidence la nécessité de faire le vide dans l'enceinte du volant d'inertie. Je dessinerai en CAO un grand nombre de potentiels volants d'inertie et je développerai un programme informatique faisant ressortir les volants les plus performants en fonction de différents critères comme l'inertie et le volume. J'effectuerai ensuite une étude de matériaux sur ces volants afin de conclure qu'elle serait le (ou les) volant le plus efficace pour le système.

I/ Impact de la forme du volant sur son inertie

L'énergie que peut stocker le volant dépend de la vitesse que peut atteindre le volant ainsi que de son inertie. L'optimisation d'un système de stockage d'énergie se fait bien sûr en minimisant les pertes et consommations mais aussi en stockant le plus possible d'énergie au plus bas coûts et volume. La bibliographie nous a montré que la solution standard pour la forme d'un volant est une forme cylindrique pleine avec des matériaux lourds et résistants.

L'on peut se demander pourquoi utiliser un cylindre comme volant et pas une autre forme moins usuelle.

Pour optimiser le stockage, il faut à priori créer un volant avec la plus grande inertie possible et tournant le plus vite possible. C'est ici que cela se complique, il est possible d'atteindre de très grande vitesse de rotation mais alors les contraintes exercées par le volant et les contraintes internes au volant seront trop importantes et donc la solution ne sera pas réalisable. En effet, la formule de l'inertie ci-dessous montre que l'inertie dépend directement de la masse et du rayon. Plus un volant sera large et lourd, plus il emmagasinerait de l'énergie.

Prenons une sphère de densité homogène ρ .

Le moment d'inertie est:

$$I = \int r^2 dm$$

De plus, on a:

$$dm = \rho dV$$

où V est le volume. Ici, r est la distance à l'axe de rotation.

Travaillons en coordonnées cylindriques, bien adaptées à ce problème.

On a donc:

$$dV = 2\pi r dr dz$$

Il reste à exprimer r en fonction de z afin de pouvoir intégrer:

On place le plan équatorial de la sphère en $z = 0$.

On a donc:

$$r(z) = \sqrt{R^2 - z^2}$$

où R est le rayon total de la sphère. On a donc finalement:

Figure 3 - Calcul de l'inertie d'une sphère

Cependant, plus il sera large, plus les forces en périphéries du volant seront importantes et donc plus le volant devra être résistant. Plus il sera lourd, plus la moindre imperfection en termes d'équilibre créera des vibrations à haute vitesse. Il en résulte que la vitesse maximale atteignable sera

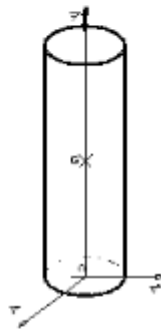
réduite. Il faut donc jouer entre un petit volant à haute vitesse et un plus gros volant à vitesse plus faible.

Dans cette partie, je souhaite ne pas supposer que le cylindre est la meilleure forme de volant. Je vais énumérer une grande quantité de forme de volant d'inertie plus ou moins viable puis comparer leurs caractéristiques afin de voir si une forme de volant en ressorts plus convenable que les autres. Je vais concevoir les volants sur SolidWorks et les égaliser en volume (donc en masse car je ne préoccupe pas encore du matériaux). Je pourrais alors obtenir un graphique corrélant les inerties aux les volumes balayés (le volume balayé est le volume qu'occupe la volant lorsqu'il est mis en rotation sur un axe spécifique (x/y ou z)). En théorie, les volants qui ont la plus grande inertie pour les plus petits volumes balayés sont les meilleurs volants car ils n'occupent pas beaucoup d'espace. Cela permet notamment d'exclure les volants très grands qui auront donc une grande inertie (car beaucoup de matière éloignée par rapport au centre de rotation) mais qui ne sont pas viable en termes de réalisation).

Exemple de calcul d'inertie :

Calcul de la matrice d'inertie d'un cylindre (LateX)

February 23, 2022



: Cylindre de centre G, de rayon R et hauteur L, dans (O,x,y,z)

1 Calcul de la matrice

1.1 Calcul général

Une matrice d'inertie est de la forme :

$$I(O, S) = \begin{pmatrix} A & -F & -E \\ -F & B & -D \\ -E & -D & C \end{pmatrix}_{(O, x, y, z)} = \begin{pmatrix} \int_S (y^2 + z^2) dm & \int_S xy dm & \int_S xz dm \\ \dots & \int_S (x^2 + z^2) dm & \int_S yz dm \\ \dots & \dots & \int_S (x^2 + y^2) dm \end{pmatrix}_{(O, x, y, z)}$$

1.2 Simplification par symétrie

Dans le cas du cylindre, (O, \vec{z}) est un axe de révolution donc les produits d'inertie (D,E,F) sont nuls et on a $A=B$.

La matrice d'inertie devient alors :

$$I(O, S)_{\text{cylindre}} = \begin{pmatrix} A & 0 & 0 \\ 0 & B & 0 \\ 0 & 0 & C \end{pmatrix}_{(O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})}$$

1.3 Calcul des composantes

On a :

$$A + B = \int_s (x^2 + y^2) dm + 2 \int_s z^2 dm = C + 2 \int_s z^2 dm$$

Or $A = B$, donc :

$$A = \frac{C}{2} + \int_s z^2 dm$$

1.4 Calcul de C

On sait :

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = r^2 \\ dm = \rho dV \\ dV = 2\pi r dr L \\ \rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{\pi R^2 L} \end{cases}$$

Ainsi :

$$C = 2\pi L \rho \int_0^R r^3 dr = 2\pi L \rho \frac{R^4}{4} = \frac{m R^2}{2}$$

1.5 Retour au calcul de A

$$A = \frac{m R^2}{4} + \rho \int_s z^2 dV$$

Donc

$$A = \frac{m R^2}{4} + \rho \pi R^2 \int_0^L z^2 dz = m \left(\frac{R^2}{4} + \frac{L^2}{12} \right)$$

1.6 Matrice d'inertie d'un Cylindre

$$I(O, S)_{\text{cylindre}} = \begin{pmatrix} m \left(\frac{R^2}{4} + \frac{L^2}{12} \right) & 0 & 0 \\ 0 & m \left(\frac{R^2}{4} + \frac{L^2}{12} \right) & 0 \\ 0 & 0 & m \frac{R^2}{2} \end{pmatrix}_{(O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})}$$

Pour la suite, je ne calculerai pas les inerties à la main car cela peut souvent devenir très compliqué. SolidWorks donne automatiquement la masse, le volume et les matrices de moment d'inertie d'une pièce. C'est ce que je vais utiliser pour comparer les volants.



Figure 4 - Intégralité des volants et de leurs caractéristiques - Dessiné sur SolidWorks

La figure ci-dessus montre les 28 volants que j'ai dessinés. En réalité, je peux comparer 48 volants en jouant sur les différents axes de rotation. Par exemple, la pièce T est en forme de cylindre (double assiette) sur l'axe de rotation verticale mais dessine une sphère sur ses deux axes plans.

Premièrement, les résultats corroborent bien avec la formule précédente. Plus la matière est éloignée de l'axe de rotation, plus l'inertie est grande. Par exemple, les pièces I et J ont une faible

inertie sur leur axe longitudinale (66 et 64 g.mm²) et une inertie multipliée par 4 et 11 sur les 2 autres axes (267 et 805 g.mm²). La contraposé est aussi observé car la pièce L qui ressemble à la pièce H, mais est plus concentré en son centre, a une inertie 2x plus faible.

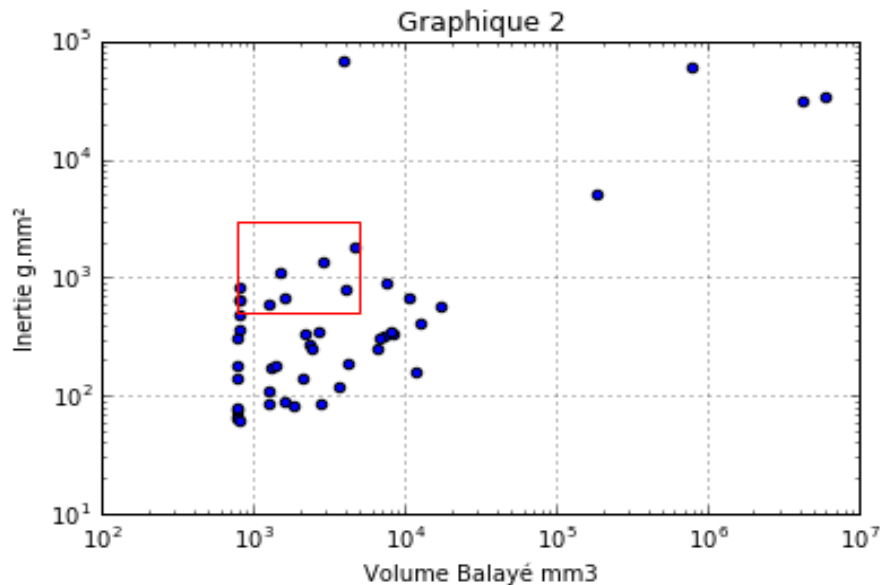


Figure 5 - Répartition des 48 volants en fonction du rapport Inertie/Volume balayé en rotation.

La figure au-dessus présente la répartition des 48 volants selon leur inertie et leur volume balayé. Je sélectionne arbitrairement une zone avec la plus grande inertie mais le plus faible volume balayé. (Entre 770-5000mm³ et 170-7000g.mm²). Dans cette zone se trouve 18 volants : { B ; E ; I_x ; J_x ; N ; Q ; O ; H ; L ; P ; T ; S ; V ; W ; X ; Z ; A2 : B2} (_x désigne une rotation sur un axe non longitudinale).

Parmi les volants dans la zone sélectionné, la majorité sont des pièces de révolutions avec un grand rayon (type cylindre). On y trouve aussi des pièces de non révolution comme les "croix" N/Q et O. Cependant ces pièces ont une grande inertie car je leur ai donné une faible épaisseur. La matière est donc très étendue du centre de rotation. Lorsque je conçois un volant cylindre dans les mêmes dimensions que la croix (c'est-à-dire aux dimensions de son volume balayé), j'obtiens une inertie bien plus grande. C'est tout à fait normal car on obtient la même pièce mais en comblant les vides. Cela lui donne plus d'inertie et plus de résistance.

De plus, des volants comme S, V et W ne sont pas réalisable car il faut les rattacher à un arbre de rotation et ils finiront donc par ressembler à E, X ou Z.

Discussion :

Ce sont des résultats assez logiques auquel on pouvait s'attendre sans faire tout cela. En termes de volume balayé, c'est incontestablement les pièces de révolution qui ont le meilleur rapport car tous les espaces "vides" qu'il y aurait sur une pièce de même volume balayé (comme une poutre formant un cylindre en rotation) sont remplis de matière, ce qui augmente l'inertie. En effet, si le volume est différent du volume balayé, c'est qu'il y a des endroits sans matière. Or ici, matière = masse = inertie = énergie. De plus, je pense qu'un cylindre est bien plus résistant en rotation par rapport à son centre qu'une poutre ou "croix". Cela serait intéressant de le vérifier/mesurer dans la seconde partie.

Il aurait peut-être été plus intéressant de ne supposer et étudier que des volant de révolution limités dans un certain espace clos et de sélectionner les meilleurs selon leur résistance à la rotation. Ensuite aurait été intéressant de calculer le meilleur volume cylindrique (jouer sur le paramètre hauteur et rayon) de "l'espace clos" pour définir le meilleur rapport entre masse du volant et vitesse maximale.

II/ Mécanique et Contraintes d'un volant d'inertie :

Un volant en rotation à haute vitesse subit de très grosses contraintes. Il emmagasine beaucoup d'énergie, relâché sur une très courte durée en cas de rupture ce qui peut provoquer de très gros dégâts. En effet il y a déjà eu des accidents répertoriés. Dans les années 50 en Suisse, un véhicule de transport en commun appelé Gyrobus qui intégrait un volant rotatif de 1,6 mètres de diamètre pesant une tonne et demie et tournant à 3 000 tours/minute. Cela suffisait à alimenter le moteur électrique entre deux stations, distantes au maximum de 5 à 6 kilomètres. A chaque station, des connecteurs étaient branchés au réseau pour redonner de la vitesse au volant en vue du trajet suivant. Accessoirement, l'énergie du freinage était aussi injectée dans le volant. Le gros avantage du Gyrobus par rapport à un tramway ou un trolleybus est qu'aucune alimentation électrique n'était requise en dehors des stations, d'où de substantielles économies en dépenses d'infrastructure (rail d'alimentation électrique, caténaires...). Cependant le projet possède aussi des désavantages comme les virages à cause de l'effet gyroscopique ou les accidents. Un accident très grave ayant découpé le bus aurait mis fin au projet gyrobus.

Le Gyrobus (1950)



(Photo : DR)

Développé par la société suisse Oerlikon dans les années 1950, le Gyrobus fonctionne grâce à un moteur électrique alimenté par la force d'inertie d'un énorme volant en acier de 1 500 kg. Une fois le volant lancé, cette énergie cinétique est convertie en énergie électrique et le volant est remis en rotation à chaque arrêt, avec une autonomie de 6 km environ. Avantage : il ne nécessite aucune ligne électrique et ne pollue pas.

Il est cependant vite abandonné, car un volant d'une tonne lancé à 1 300 tours/minute présente un certain danger. Les volants d'inertie servent encore aujourd'hui pour stocker l'électricité, par exemple celle produite par les éoliennes.

Les contraintes énoncées à la sous-section A du paragraphe 2.2, doivent être respectées afin que le matériau utilisé n'atteigne pas sa limite de rupture et que le système ne se désintègre. Le respect de ces contraintes n'est qu'une des étapes de sécurisation du volant. D'autres perturbations externes sévères telles que des tremblements de terre de forte magnitude peuvent emmener le volant à entrer en résonance et à se désintégrer. Il est alors très important pour la sécurité des personnes, et ensuite celle des autres équipements autour du volant, de construire une enceinte de sécurité autour du système de stockage. Cette enceinte devra être capable d'absorber l'énergie cinétique emmagasinée dans le volant pendant sa rotation. Un volant d'inertie cylindrique dont l'énergie cinétique emmagasinée est de 4,8 kWh représente l'équivalent d'un camion de 20 tonnes roulant à une vitesse de 150 km/h. La Figure 2.9 illustre les dégâts d'un SSEVI après un défaut.



Figure 6 - Utilisation et accident de système utilisant des volants d'inertie

Il est donc important de savoir et comprendre quelles sont les phénomènes de contraintes que subit le volant car les accidents peuvent coûter cher. On pourra ensuite essayer de déterminer le volant le plus résistant et les matériaux les plus adaptés.

Nous verrons dans un premier temps les effets d'un déséquilibre du volant puis nous aborderons rapidement l'effet de la gravité sur le volant et enfin nous verrons les contraintes dues à la rotation du volant.

(Dés)Equilibre et vibrations

Lorsque que centre de gravité n'est pas sur l'axe de rotation, les forces centrifuges s'exerçant sur le volant et donc l'arbre ne s'équilibre plus, il en sort une résultante qui provoque la vibration comme l'illustre bien la figure ci-dessous.

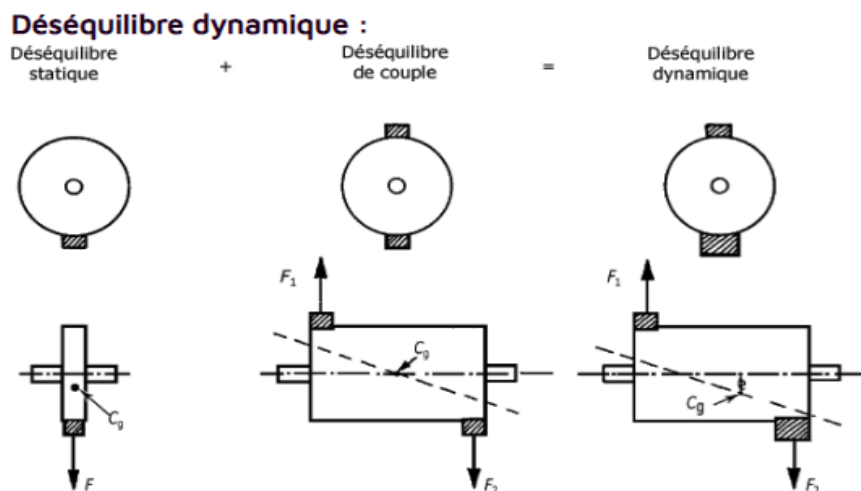


Figure 7 - Illustration présentant la décomposition d'un équilibrage dynamique

Effectuons une simulation de RdM pour observer l'impact d'un déséquilibre à haute vitesse.

La simulation se fait avec le module SolidWorks Simulations. Je crée 2 cylindres de 60mm de diamètre, 20mm d'épaisseur et un alésage de guidage de 4mm sur l'axe longitudinale. Ces cylindres sont en acier non allié C10 et tournent à une vitesse de 1000rad/s autour d'une liaison pivot parfaite. Je rajoute intentionnellement un petit bout de matière en périphérie d'un des 2 cylindres (jouant le rôle de balourd) afin de créer un déséquilibre. C'est un cube de 11,22mm³ pour un cylindre de volume 56297mm³.

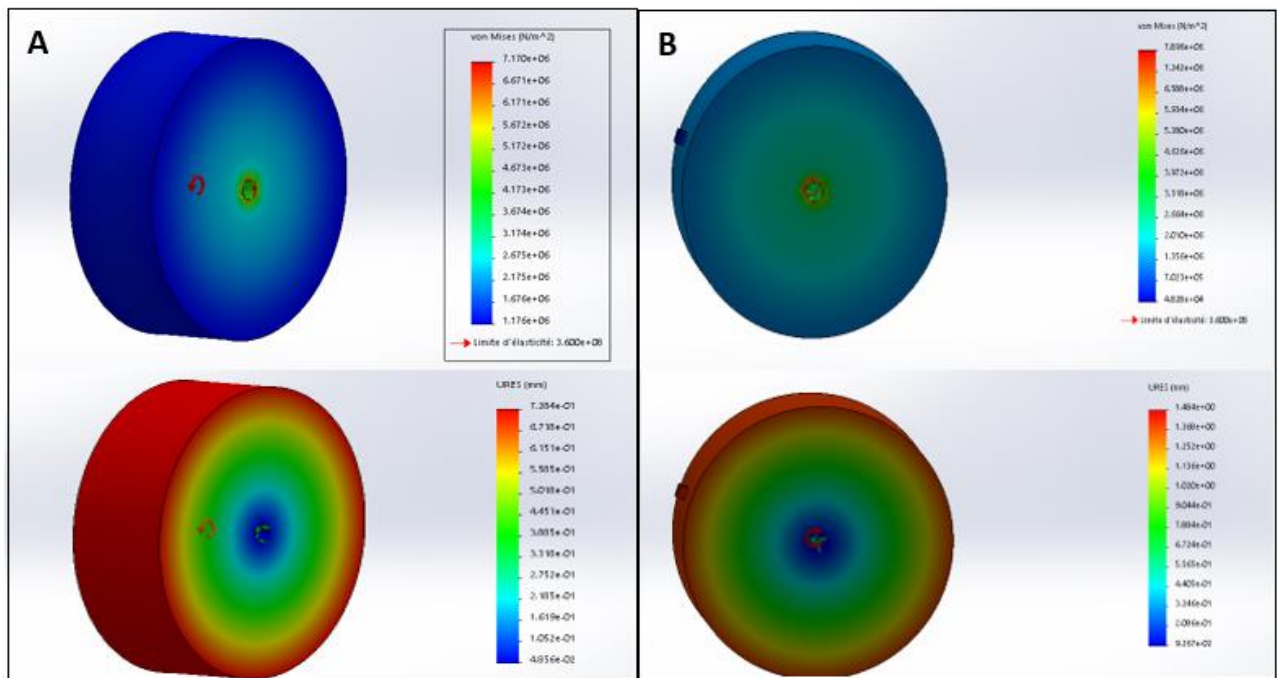


Figure 8 - Comparaison des contraintes et déplacements entre un volant équilibré (A) et un déséquilibré (B)

On obtient, pour le volant déséquilibré, une différence de contrainte maximal de 10,1% au niveau de la liaison pivot et une différence de déplacements de 104% alors que le balourd ne représente pas plus de 0,02% de la masse total du volant. Je refais la simulation à 15 000 rad/s et j'obtiens les mêmes résultats. Cela illustre bien l'importance d'un volant parfaitement équilibré, surtout à de forte fréquence de rotation. Or un volant ne peut jamais être à 100% équilibré, c'est en parti ce qui plafonne sa vitesse maximale de rotation.

Je répète ensuite les simulations de sorte à obtenir un graphique montrant l'évolution de la différence des contraintes entre le volant équilibré et le déséquilibré. Je fais de même avec les déplacements.

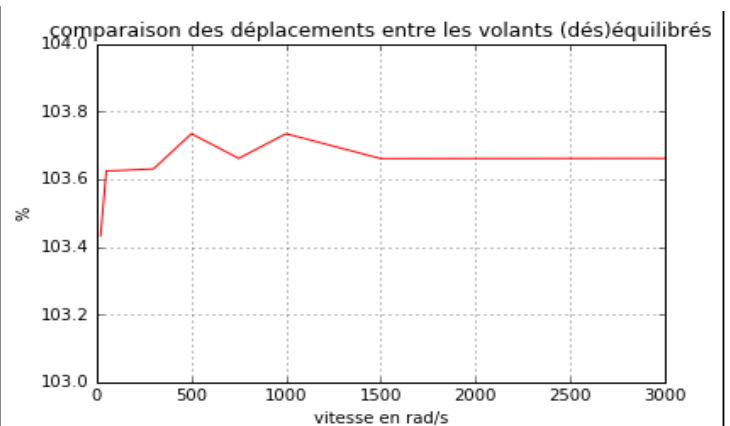
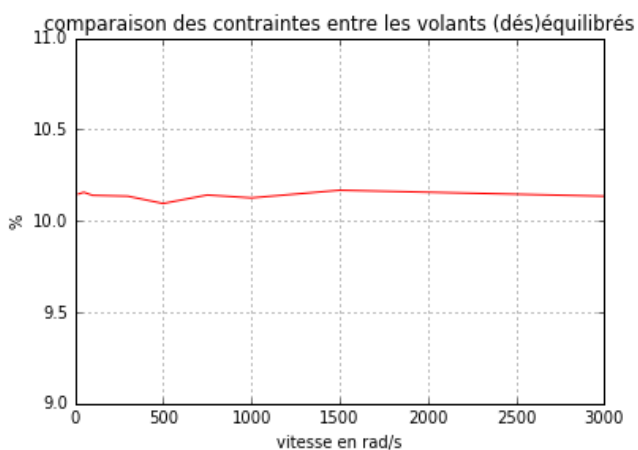


Figure 9 - Graphique présentant l'évolution des contraintes de déséquilibre dans un volant en fonction de la vitesse de rotation

Les résultats sont très étonnants car cela ne semble pas varier selon la vitesse. Or un déséquilibre massique dans le volant a pour conséquence que la force centrifuge s'exerçant sur le volant n'est plus symétriquement réparti et donc ne s'annule plus. Mais la force centrifuge dépend du rayon et de la vitesse au carré. Les graphiques devraient donc présenter des courbes croissantes et quadratiques ($F = m \cdot R \cdot \omega^2$).

L'équilibrage est le procédé par lequel on tente d'améliorer la répartition de la masse d'un rotor de façon que le rotor tourne dans ses paliers sans créer de forces centrifuges non compensées. L'équilibrage des rotors contribue à prolonger la vie utile des équipements. Il peut être réalisé sur une machine à équilibrer (fixe) ou encore à l'aide d'un analyseur de vibrations (portatif). Les vibrations produites par un rotor déséquilibré créent une surcharge sur les paliers et sur la structure de la machine en général. L'équilibrage du rotor s'avère nécessaire pour éviter une ou plusieurs des situations suivantes :

- une diminution de la vie utile de la machine, de la durée de vie des roulements et de l'intégrité de la structure ;
- un accroissement de la fréquence des entretiens requis par la machine ;
- une production de moins bonne qualité par les équipements tels que les machines-outils et les rectifieuses, les machines à papier, les laminoirs, etc. ;
- une détérioration de la qualité de vie au travail en ce qui a trait au bruit, à la sécurité et au confort (vibrations transmises au corps par le plancher par exemple).

L'équilibrage ne doit surtout pas se limiter aux seules machines dont la condition de déséquilibre est telle qu'il y a imminence de bris. En effet, le tableau de la figure suivante révèle combien le déséquilibre, même faible, peut être un facteur déterminant dans la réduction de la durée de vie des roulements.

Dispositif d'équilibrage statique fait maison :

Un cylindre imprimé à l'imprimante 3D n'est assurément pas parfaitement équilibré alors que le moteur tourne à très grande vitesse ce qui peut donc créer des vibrations et donc perturber les mesures. Pour diminuer ce problème, j'utilise une balance magnétique afin de rééquilibrer statiquement le cylindre. Je me suis inspiré du système que j'avais conçu pour le PPE afin d'équilibrer les hélices de drones et donc améliorer leur rendement.



Figure 10 - Balance magnétique d'équilibre statique

Le système est une balance magnétique. Celle-ci est composée d'une tige (aiguillée d'un côté et plate de l'autre) en quasi lévitation grâce à 2 aimants à ses extrémités éloignés d'une distance très légèrement supérieure à la longueur de la tige. Ce système permet de créer une liaison simple quasi ponctuelle entre le bâti et la tige mais qui se comporte comme une liaison pivot. Cela permet de réduire considérablement les frottements et donc de repérer des variations de masse minimales sur un objet rattaché à la tige. En revanche, cela ne permet de faire qu'un équilibrage statique. L'équilibrage se fait en rajoutant des petits bouts de scotch.

Ce système me servira pour les prochaines expériences afin d'équilibrer les volants en plastique.

Les effets de la gravité

Considérons le volant comme un cylindre relié à un arbre de rotation. Ici le problème que l'on cherche à résoudre est de savoir s'il est mieux pour l'arbre de sortir d'être à la verticale ou à l'horizontale. A priori, l'on peut s'attendre à ce que la position verticale soit plus adaptée car la gravité n'entrera pas dans la rotation et l'arbre subira une compression/traction plutôt qu'une flexion.

Vérifions cela à l'aide d'une étude de RdM sur SolidWorks.

Je modélise un volant cylindrique encastré à un arbre de rotation. Cet arbre est guidé par une double liaison pivot parfaite à ses extrémités. J'effectue deux simulations avec les mêmes conditions (vitesse 50rad/s, acier C10 / même maillage) seul l'orientation de la gravité diffère (supposé à 9.81m/s²).

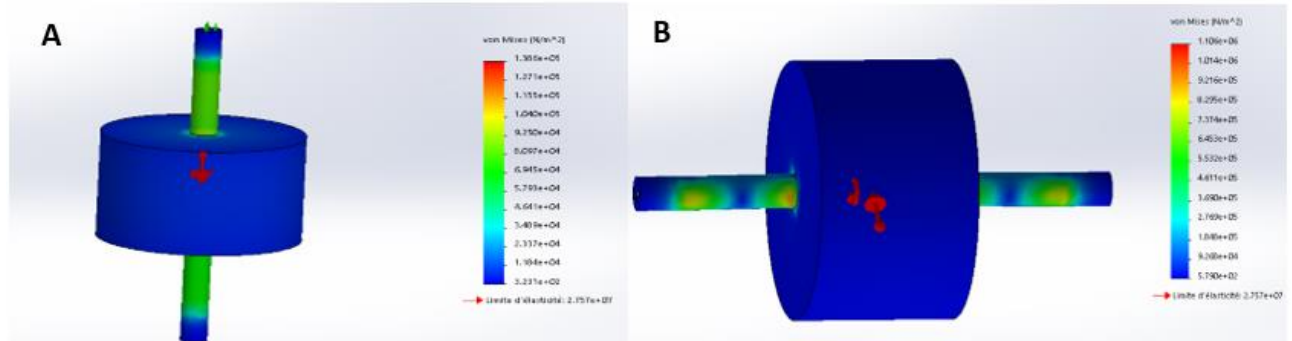


Figure 11 - Contraintes mécaniques imposées à l'arbre par la gravité

On obtient un facteur 10 entre les contraintes à la position horizontale et verticale. En effet cela est logique car l'arbre subit une flexion avec un effort important en son milieu contre une compression. De plus, pour la position verticale, les paliers de guidage ne subiront que peu de contraintes et ils pourront alors mieux assurer leur fonction s'ils sont couplés à un palier plat en bout d'arbre pour contrer la gravité. Ainsi, les paliers magnétiques réduisant tout frottement seront plus adaptés.

Les contraintes exercées sur le volant :

A de grande vitesse de rotation, l'on ne peut plus considérer le volant comme un solide indéformable et dire que les forces centrifuges de part et d'autre du volant s'équilibrent. Le volant subit donc des efforts de tractions, l'étirant vers l'extérieur. Le facteur important est donc la limite élastique R_e d'un matériau.

La contrainte maximale dans le volant se trouve en périphérie de celui-ci et s'exprime de la façon suivante :

$$\sigma_v = \frac{3+\nu}{8} \rho_v \cdot \Omega_v^2 \cdot R_v^2 = K_f \cdot \rho_v \cdot \Omega_v^2 \cdot R_v^2$$

Avec K_f le facteur de forme (K_m dans la figure ci-dessous).



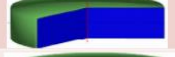
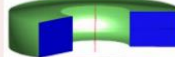
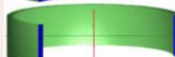
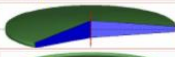
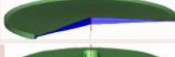


Type Volant	Forme du volant et de sa Section	K_m	K_B	K_V
Barre section carrée de côté le dixième de la demi-longueur		0,88	0,02	1,4
Barre exponentielle section carrée sur l'axe		0,49	0,010	2,0
Cylindre plein		0,61	0,61	1,00
Cylindre creux rayon intérieur / rayon extérieur : 0,4 ou 0,02 (utilisé comme référence pour les matériaux composites)		0,84	0,28	1,1
		0,47	0,07	1
Cône tronqué		0,8	0,86	2
Exponentielle modifiée		0,9	0,88	2,8
Tri-hyperbole creuse		0,65	0,1	2
Roue à rayon		0,85	0,2	1

Figure 12 - Différents facteurs de forme intervenant dans la contrainte maximale admissible

Pour cette partie, j'aimerais comparer les résultats d'une simulation de RdM d'un volant en rotation avec les résultats d'une expérience comportant les mêmes conditions. Ensuite, je ferai des simulations RdM pour chacun des volants sélectionnés dans la partie précédente. J'ai donc dessiné puis imprimé plusieurs volants en PLA. Je dispose d'un autre moteur Brushless pouvant théoriquement monter jusqu'à 17000 tr/min à vide. Je l'équipe du volant d'inertie puis je commence à le faire tourner à puissance minimum. Je mesure la vitesse de rotation et en parallèle je monte tout doucement la puissance (afin de ne pas donner trop d'accélération aux volants). L'expérience consiste à monter en vitesse jusqu'à la rupture du volant. Alors je pourrais comparer les volants casser avec les simulations SolidWorks pour voir s'il y a corrélation.

Cependant, pour les simulations, je dois sélectionner PLA mais ce matériau n'est pas dans les bases de données. Je crée donc un matériau venant calquer les caractéristiques du PLA trouvé sur Internet. Ensuite, comme pour les simulations précédentes, je suppose une liaison pivot parfaite, puis une rotation à 1000 rad/s et une accélération de 0.1rpm².



Figure 13 - Corrélation entre une partie simulation CAO et expérimentation pour la RdM d'un volant

L'on peut rapidement constater que les volants cassent presque toujours aux mêmes endroits. Endroits les plus sollicités d'après la simulation SolidWorks. Les ruptures se font en moyenne à 5000tr/min. Ce qui correspond assez bien avec la simulation également. En effet, la simulation présente une contrainte bien supérieure à la contrainte limite pour 1000rad/s soit environ 9500 rpm.

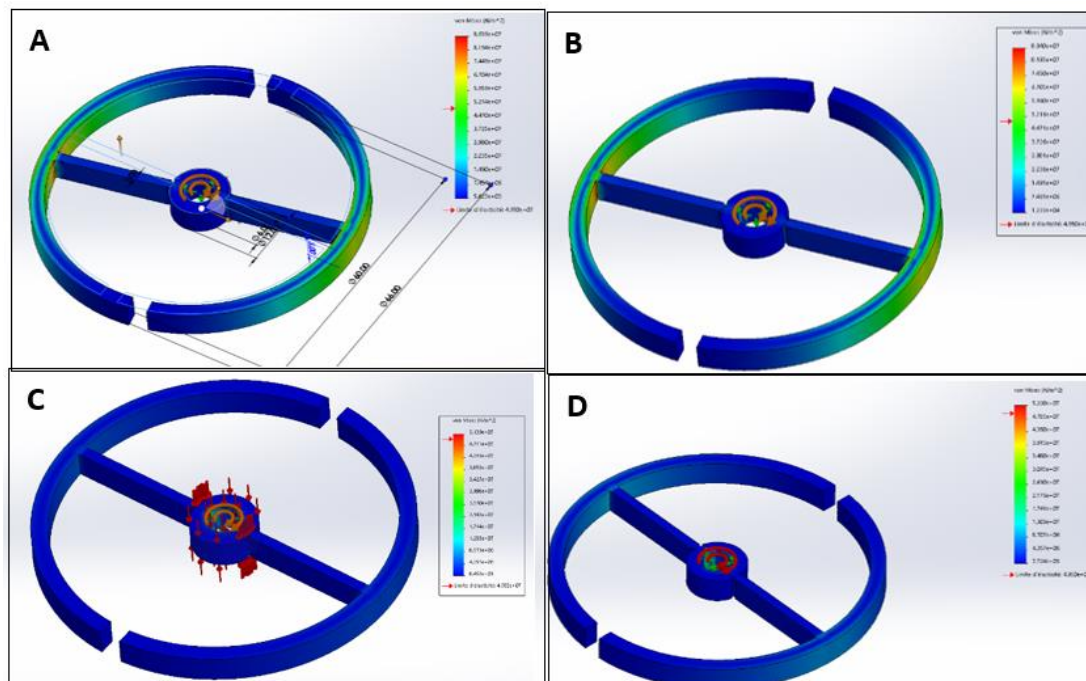


Figure 14 - Mise en évidence d'une défaillance dans ma simulation CAO RdM

En revanche, l'on obtient encore des résultats étranges lorsque l'on répète les simulations en changeant les paramètres. Pour le même volant, même matériau et même maillage, même vitesse à une accélération de 0.01 rpm^2 (B), soit 10x plus petite, on obtient exactement les mêmes résultats en terme de contraintes subites. A une vitesse de rotation de 1500 rad/s et une accélération de 65 rpm^2 (C), l'on obtient une contrainte maximale 2x inférieure à la simulation précédente. Cela est improbable car les conditions sont plus extrêmes donc les contraintes devraient être plus importantes. Même résultat pour une simulation à 2500 rad/s et 80 rpm^2 (D).

Discussion :

Suite aux 2 résultats incohérents trouvés par analyses RdM, il en devient nécessaire d'approfondir quel en est la cause. En effet, il en devient compliqué de baser une sélection de volant sur des simulation RdM si les résultats donnés sont incohérents.

Il serait très intéressant d'étudier la différence entre cylindre plein et creux en RdM. Le cylindre n'a pas de matière au centre donc cela est avantageux car plus léger mais forte inertie, cependant le raccord d'un cylindre creux à un arbre peut apporter des fragilité intéressante à optimiser.

Pour toutes les précédentes études, le volant est considéré comme homogène et uni matériaux. Il pourrait être très intéressant d'effectuer une étude sur des matériaux composites comme du béton armée mais cela constitue en TIPE voire plus. En effet, des récentes découvertes prônent l'intérêt du kevlar ou du volant cylindrique en béton armée (résistant à la traction, lourd, pas cher).

III/ Fluide :

Théorie

Le vide semble être systématiquement fait dans la cage à volant. Cependant, aucune justification n'est jamais donnée. Cela n'est pas forcément évident car les frottements d'air qui créent des pertes énergétiques sont généralement dus à l'opposition du mouvement d'un objet dans un fluide (ou inversement). Or le volant est une pièce de révolution qui tourne sur son axe, il ne déplace donc a priori pas d'air (en supposant une rugosité nulle).

Vérifions cela avec une simulation en dynamique des fluides sur FlowSimulation de SolidWorks 2018. Pour cela, je crée une pièce présentant différentes formes sur un arbre de rotation (comme une hélice, un rectangle, un double rectangle (pièces de non révolution) et des cylindres, sphères (pièces de révolution)). Pour la simulation, je fais tourner dans une enceinte fermée rempli d'air une pièce sur son axe longitudinal à une vitesse de 5000rad/s, température de 290K, pression de 1bar et une rugosité par défaut (50µm).

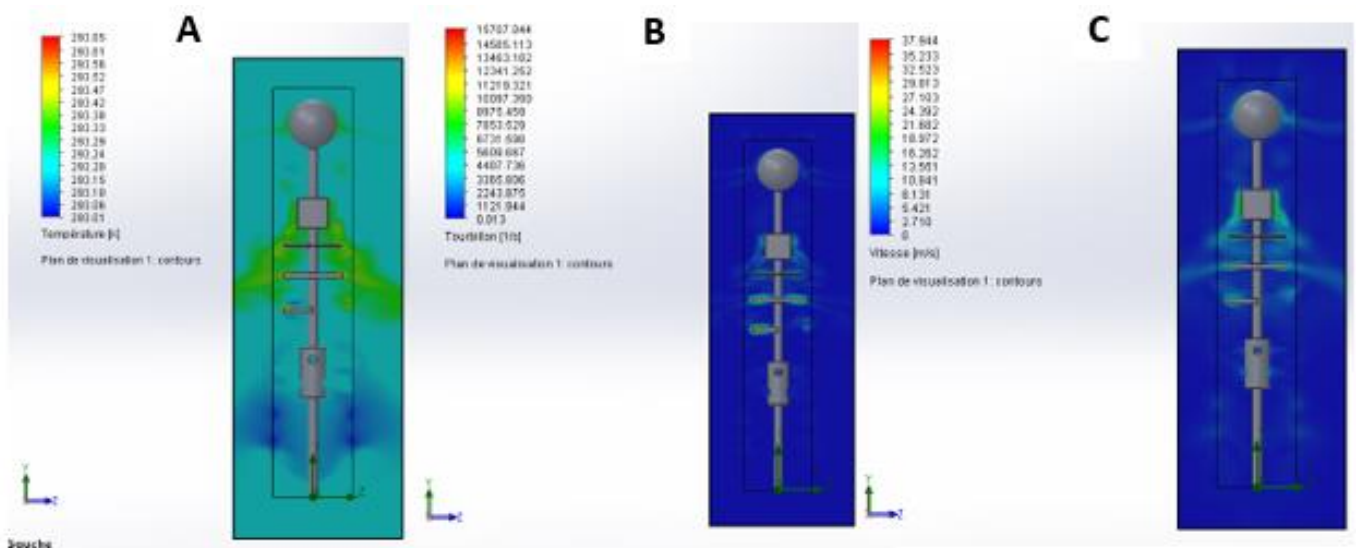


Figure 15 - Simulation avec FlowSimulation de la température/des tourbillons/de la vitesse fluide du fluide autour d'un volant en rotation

On remarque immédiatement sur la figure ci-dessus que les formes créant le plus de tourbillons et pertes énergétiques sont celles de types parallélépipèdes. Cependant, les pièces de révolution comme la sphère crée des tourbillons non négligeables ainsi qu'un échauffement local de la température. Comment expliquer cela ? C'est peut-être dû à la rugosité.

Je re-effectue donc une simulation avec cette fois-ci un simple cylindre en rotation, dans les mêmes conditions mais avec une rugosité de 0µm et de 300µm (respectivement A et B sur la figure ci-

dessous). La pièce rugueuse crée 5x plus de tourbillons ainsi qu'un échauffement 39% plus important que la non rugueuse. Seulement le fluide étudié avec la pièce non rugueuse présente un échauffement allant jusqu'à 3K ainsi que des déplacements à des vitesses importantes en périphérie de l'arbre.

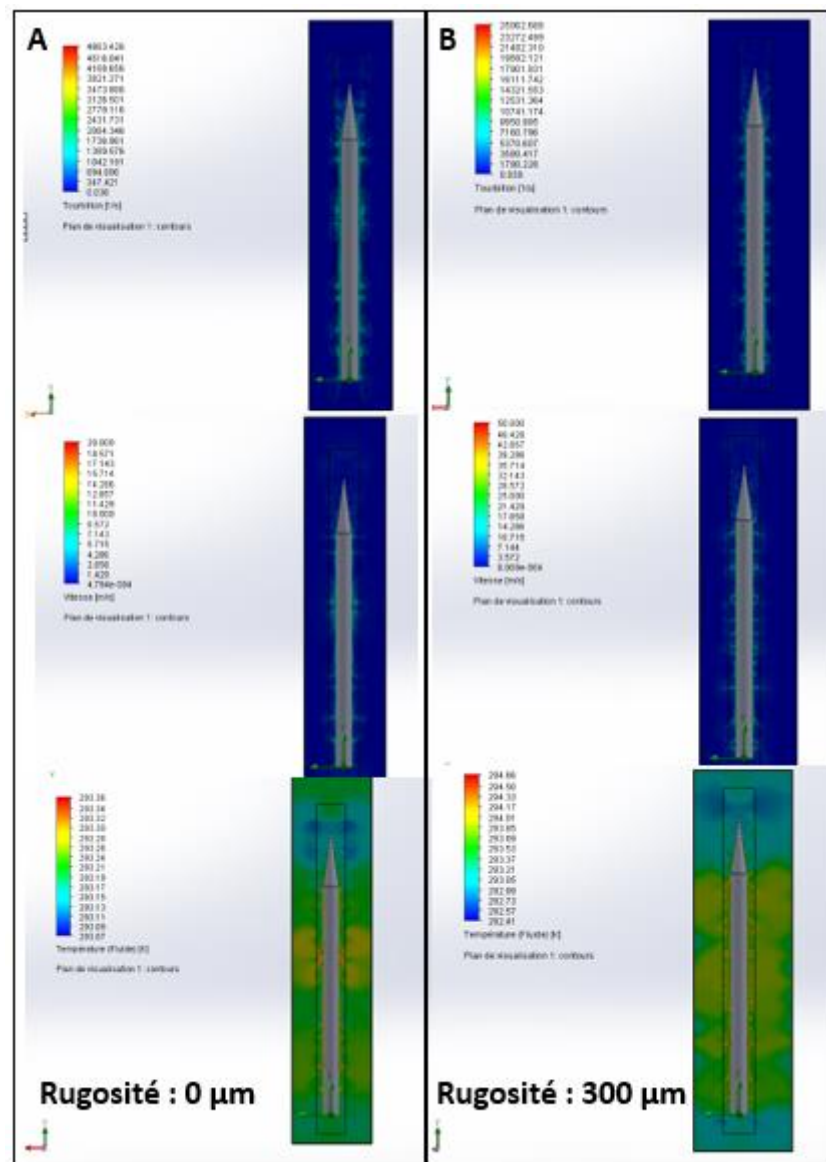


Figure 16 - Comparaison d'une simulation mécanique de fluide pour un volant lisse et un volant rugueux

Il semble donc que le déplacement de l'air par obstacle joue un rôle majeur dans les pertes par frottements, et cela même à petite échelle avec la rugosité. Cependant, la dernière simulation semble montrer qu'il y a d'autres phénomènes en jeu. Comment savoir lesquels ?

J'ai posé la question sur le forum de physique Futura et j'ai obtenu réponse. [7]

Il se trouve que même si une pièce de révolution est parfaitement lisse, lors du choc des molécules du gaz sur le solide, il peut y avoir attraction entre les deux ce qui impliquera une vitesse

moyenne des molécules dans le sens de la rotation du cylindre. Cela est dû à la réflexion diffuse de Maxwell. Cette vitesse se propagera ensuite par viscosité et on aura bien des pertes par frottement. La rugosité jouerait surtout un rôle dans la turbulence. Les logiciels de CAO comme FlowSimulation utilisent la condition usuelle de non glissement aux parois, ce qui implique que l'air est mis en mouvement. Plus précisément, la réflexion diffuse de Maxwell suppose que la molécule de gaz s'adsorbe transitoirement au solide (liaison faible type Van der Waals) puis est réémise par agitation thermique de manière isotrope par rapport au solide et donc avec une vitesse moyenne tangentielle égale à celle du solide.

Il devient donc effectivement nécessaire de faire le vide dans l'enceinte du volant, même si celui-ci est une pièce de révolution autour de l'axe de rotation. Seulement, j'aimerais pouvoir observer et justifier cela expérimentalement à une échelle plus humaine.

Expérimentations

1^{ère} expérience :

Rotation d'un cylindre dans une enceinte rempli de fumé afin d'observer de quelle forme sont les tourbillons créés par le cylindre.

Pour réaliser cela, j'ai placé un moteur de modélisme, récupéré sur mon drone de TPE, dans une boîte que j'ai rempli de fumé. Via un contrôleur, je venais piloter le moteur en vitesse. J'ai dessiné et imprimé un cylindre en PLA de diamètre 5cm que j'ai fixé sur l'arbre du moteur à l'aide d'une attache hélice classique. Comme on peut le voir sur l'image ci-dessous. J'ai également conçu un support moteur afin de pouvoir facilement le fixer dans la boîte.

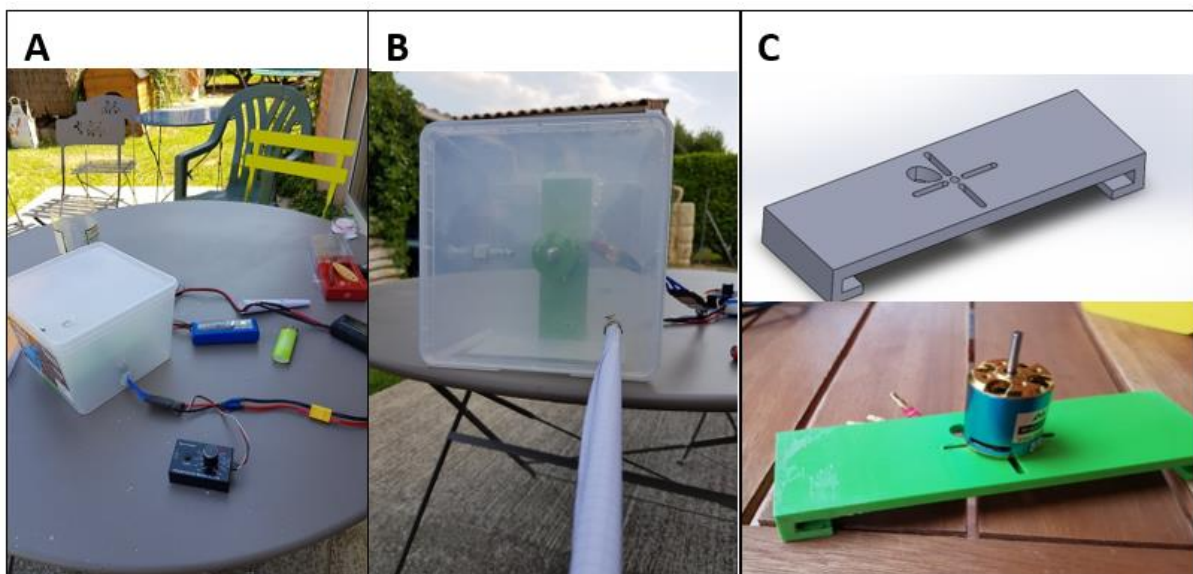


Figure 17 - Photos de l'expérience écoulement du fluide autour d'un volant cylindrique

Pour limiter les perturbations dû aux vibrations, j'ai réutilisé ma balance magnétique fait maison permettant d'équilibrer des hélices (image ci-dessous). Celle-ci est composée d'une tige (aiguillée d'un côté et plate de l'autre) en quasi lévitation grâce à 2 aimants à ses extrémités éloignés d'une distance très légèrement supérieure à la longueur de la tige. Ce système permet de créer une liaison simple quasi ponctuelle entre le bâti et la tige mais qui se comporte comme une liaison pivot. Cela permet de réduire considérablement les frottements et donc de repérer des variations de masse minimales sur un objet rattaché à la tige. En revanche, cela ne permet de faire qu'un équilibrage statique. L'équilibrage se fait en rajoutant des petits bouts de scotch.



Figure 18 - Balance magnétique d'équilibrage statique

Malheureusement, le système ne permet pas de bien visualiser les mouvements de fumée. La boîte est très trouble et le moteur crée pas mal de tourbillons (les cendres au fond de la boîte tournent légèrement en cercle et je doute que cela soit dû au volant).

Cependant le moteur crée ses propres tourbillons et il en devient donc difficile de percevoir qui crée quoi. D'autant plus que l'on ne voit déjà pas grand-chose.

2^{ème} expérience :

Celle-ci a pour but de corriger les défauts de l'expérience précédente. La fumée n'est, avec le matériel dont je dispose, pas un fluide adapté à la visualisation des tourbillons. L'air est un fluide peu visqueux. De plus, le moteur est baigné dans la même enceinte et donc vient perturber le tout. Je choisis donc de changer le fluide pour de l'eau. Cela est tout à fait possible car le moteur utilisé est un moteur de type "brushless" qui fonctionne par variation de champs magnétiques. Seul les câbles d'alimentation craignent. Je remplis donc une enceinte d'eau et j'y plonge le volant cylindrique.



Figure 19 - Expérience de rotation d'en un fluide visqueux (Eau)


L'on remarque sur la photo ci-dessus, comme l'on pouvait s'y attendre, qu'un courant d'eau se forme autour du volant, dans le sens de celui-ci. De plus, la consommation du moteur a augmenté de 57% lorsque le cylindre à l'extrémité de son arbre a été plongé dans l'eau (passant de 0.44A à 0.69A).

L'effet avec l'air doit donc être similaire (bien moins important bien sûr). Mais cet effet s'explique en parti par la forte rugosité des pièces plastique imprimé. En effet, les pièces impressions 3D étant souvent très rugueuse, il semble logique que le fluide va s'y "accrocher" et suivre son mouvement. Cependant il est compliqué de poncer une pièce en PLA rempli à 20% et je n'ai pas de cylindre usiné à rugosité très faible sous la main.

3^{ème} expérience :

Dans cette expérience, je souhaite pouvoir observer la différence en terme de frottement entre un volant de révolution sur son axe de rotation et un volant de non révolution. Il est cependant difficile d'observer et quantifier directement les frottements. Mais il est facile d'observer le signal de sortie (vitesse de rotation) et celui d'entrée (consommation électrique et consigne moteur en ms (les moteurs brushless sont commandés en fréquence)). Je réalise donc une expérience où je compare les différents signaux entre eux avec un volant type cylindrique et un volant type poutre. Pour que la corrélation des signaux puisse refléter les pertes frottements, je dois égaliser en masse et en inertie par rapport à l'axe de rotation les 2 volants. Encore une fois ici, la conception sur SolidWorks de pièces puis leur impression en 3D PLA sera d'une grande aide. Cependant le compteur tour que je possède pour mesurer la vitesse de rotation est optique, il fonctionne par obstacle. Il n'est donc pas possible de mesurer la vitesse du cylindre plein (il existe des solutions comme mettre des bouts de scotch noirs afin que le capteur photodiode détecte une variation de d'intensité de lumière, cependant le mien n'est pas assez précis pour cela). Je décide donc de réimprimer un cylindre avec 2 petites fentes à l'intérieur pour permettre à la lumière de passer. De plus, cela facilite l'équilibrage entre les 2 volants.

Je peux donc désormais placer le capteur sur la configuration « 2 pâles » et obtenir la vitesse de rotation des volants.

Propriétés de masse de barre Configuration: Défaut Système de coordonnées: -- par défaut -- Densité = 0.00 grammes par millimètre cube Masse = 12.72 grammes Volume = 12724.35 millimètres cubes Superficie = 4181.23 millimètres carrés Centre de gravité: (millimètres) X = 0.00 Y = 0.00 Z = 0.00 Principaux axes et moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés) Pris au centre de gravité. Ix = (0.00, 0.00, 1.00) Px = 502.24 Iy = (1.00, 0.00, 0.00) Py = 4040.32 Iz = (0.00, 1.00, 0.00) Pz = 4237.18 Moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés) Pris au centre de gravité et aligné avec le système de coordonnées de sortie. Lxx = 4040.32 Lyy = 0.00 Lzz = 0.00 Lxy = 0.00 Lxz = 0.00 Lyz = 0.00 Lxx = 0.00 Lyy = 4237.18 Lzz = 502.24 Moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés) Pris au système de coordonnées de sortie. Ixx = 4040.32 Iyy = 0.00 Izz = 0.00 Ixy = 0.00 Iyz = 4237.18 Ixz = 0.00 Ixx = 0.00 Iyy = 4237.18 Izz = 502.24	Propriétés de masse de cylindre_hélice Configuration: Défaut Système de coordonnées: -- par défaut -- Densité = 0.00 grammes par millimètre cube Masse = 12.88 grammes Volume = 12876.84 millimètres cubes Superficie = 5324.44 millimètres carrés Centre de gravité: (millimètres) X = 0.00 Y = 3.50 Z = 0.00 Principaux axes et moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés) Pris au centre de gravité. Ix = (1.00, 0.00, 0.00) Px = 2043.74 Iy = (0.00, 0.00, -1.00) Py = 2198.92 Iz = (0.00, 1.00, 0.00) Pz = 4137.48 Moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés) Pris au centre de gravité et aligné avec le système de coordonnées de sortie. Lxx = 2043.74 Lyy = 0.00 Lzz = 0.00 Lxy = 0.00 Lxz = 0.00 Lyz = 0.00 Lxx = 0.00 Lyy = 4137.48 Lzz = 2198.92 Moments d'inertie: (grammes * millimètres carrés) Pris au système de coordonnées de sortie. Ixx = 2201.50 Iyy = 0.00 Izz = 0.00 Ixy = 0.00 Iyz = 4137.48 Ixz = 0.00 Ixx = 0.00 Iyy = 4137.48 Izz = 2356.68	
---	---	--

Voici les résultats que j'obtiens :

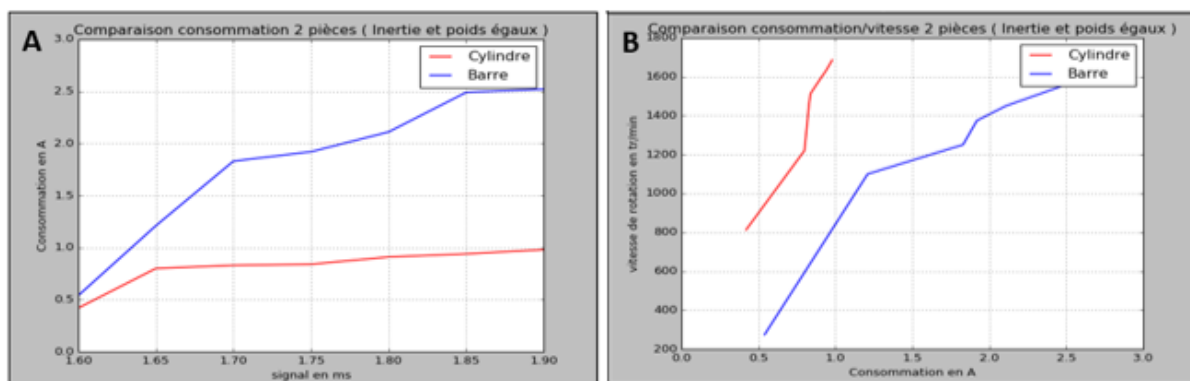


Figure 20 - Graphique montrant la différence de consommation des 2 volants pour un ensemble de consigne d'entrée [A] et Graphique montrant la différence de vitesses pour un ensemble de consommation [B] ("Barre" désigne le volant en poutre & Cylindre désigne le volant en forme de cylindre)

On remarque donc bien que pour un même signal de commande, la poutre consomme toujours plus que cylindre mais tourne moins vite. Cela alors qu'ils ont la même masse et la même inertie. Les vitesses restant faibles, les vibrations ne sont pas très importantes et peuvent être négligées. La différence de consommation s'explique donc probablement par la différence de pénétration dans l'air.

Même s'il est à priori maintenant certains qu'il faille faire le vide dans l'enceinte du volant, faisons une dernière expérience où l'on ferait le vide dans l'enceinte. Cela permettrait de vérifier qu'ici la différence de rendement est bien dû à la pénétration dans l'air et non pas à d'autre phénomène comme les vibrations ou d'autres qui m'échapperait.

4^{ème} expérience :

Je décide de réaliser une dernière expérience montrant directement l'intérêt de faire le vide dans l'enceinte et permettant d'approfondir les résultats de l'expérience précédente. Je choisis de réutiliser la boîte, de l'étanchéiser puis de la connecter à une pompe à vide provenant d'un vieux frigo. Idée qui a très vite changer car la boîte est en plastique et ne résiste absolument pas aux forces exercées par la différence de pression. Je bricole donc une entre enceinte en aluminium, qui cède aussi. Je décide donc de la renforcer avec des cales en plastiques comme sur l'image ci-dessous [B]. Celle-ci résiste mieux mais pas suffisamment, il y a des fuites à partir de 0.7-0.8bar ce qui empêche de faire des mesures correctes.

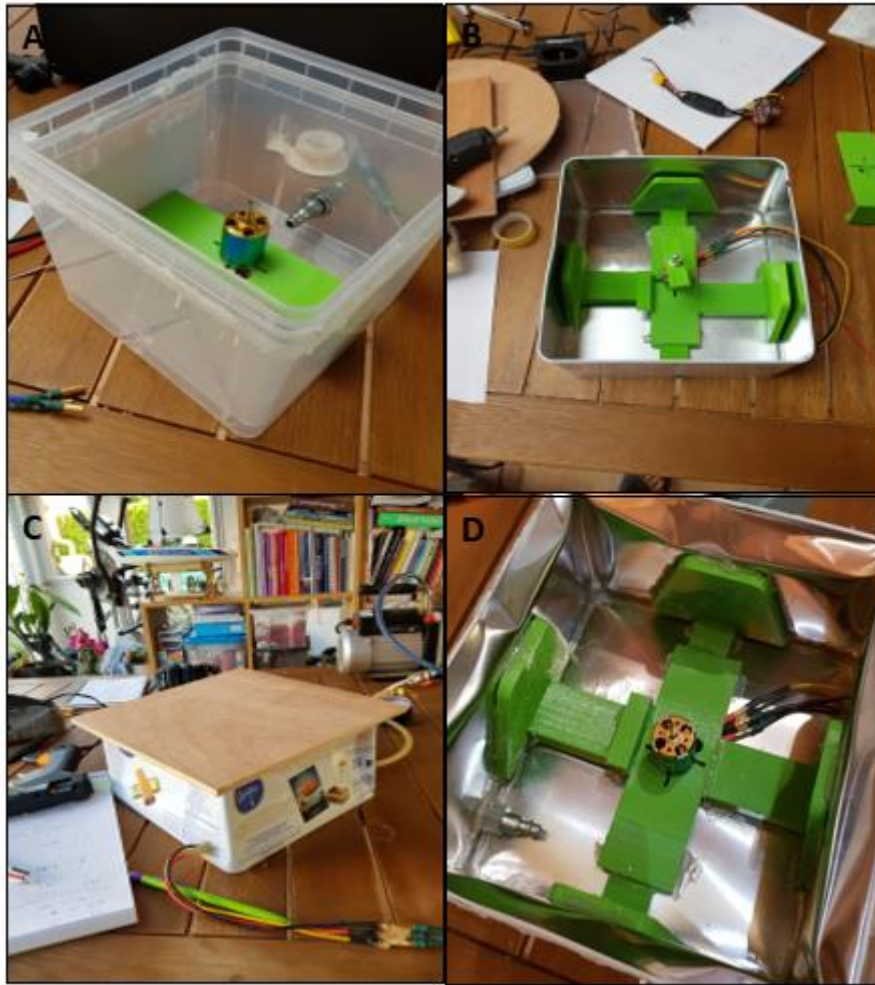


Figure 21 - Conception d'une boîte d'étanchéité pour l'expérience de rotation à vide

J'ai finalement réussi à me procurer une cloche à vide d'expérimentation dans mon lycée.

Protocole d'expérimentation :

- Mettre le dispositif (ensemble {moteur+ volant+ contrôleur+ commande fixe+ batterie+ wattmètre}) sous la cloche en verre lié à la pompe à vide.
- Placer le manomètre dans l'enceinte avoir de pouvoir observer l'évolution de la pression sous la cloche.

- Mettre en rotation le moteur à une vitesse suffisamment importantes pour accentuer les effets de frottements.
- Fermer l'enceinte en laissant le moteur tourner à vitesse constante.
- Relever la consommation du moteur et la pression dans l'enceinte tous les 0.1Bar en moins. Cela jusqu'à 20hPa.
- Refaire les mêmes mesures dans le sens inverse (de 20hPa à pression atmosphérique).
- Effectuer cela 5fois afin de pouvoir faire une moyenne de consommation pour chaque 0.1bar sous la cloche. Laisser reposer quelques minutes le moteur entre chaque cycle car le moteur chauffe et donc consomme plus.
- Faire de même avec le moteur à vide (sans volant) afin d'avoir un témoin. Penser à placer le moteur au même niveau de consommation au départ.
- Re effectuer tout le protocole en changeant le volant (Attention : penser à recharger la batterie régulièrement pour qu'elle délivre toujours la même puissance au moteur).

Une vidéo de l'expérience et des résultats est disponible sur YouTube. [8]

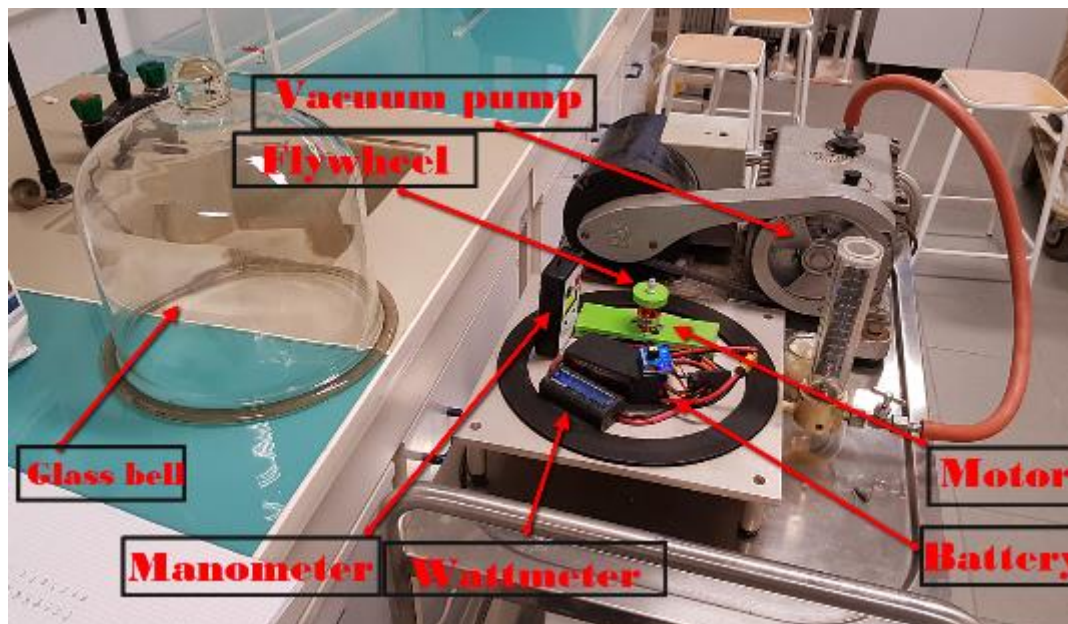


Figure 22 - Expérience de rotation dans une cloche en verre à vide

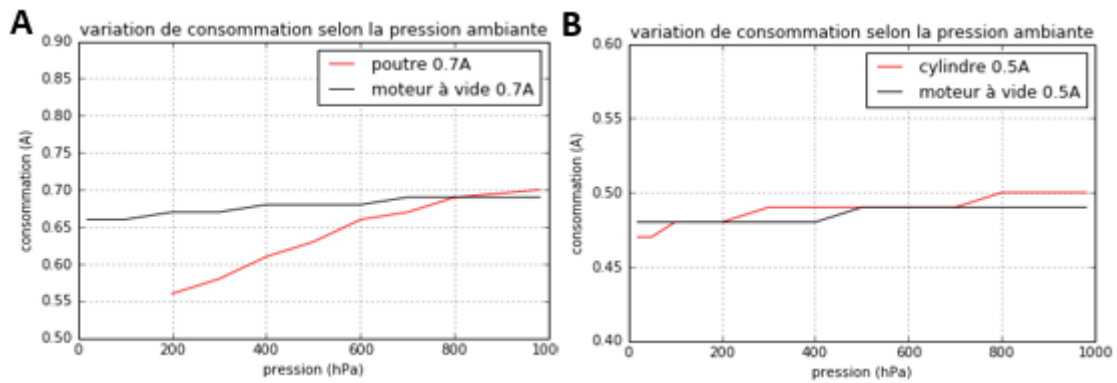


Figure 23 - Graphique de corrélation entre consommation moteur et pression ambiante

Les deux graphiques ci-dessus montre les résultats de l'expérience. L'on remarque très bien la différence de variation de consommation entre la poutre et le cylindre. Le cylindre n'ayant que très peu de pénétration/obstacle à l'air dû à sa révolution, la consommation moteur n'est que très peu impacté par la variation de pression comparé à la poutre qui est une pièce à fort obstacle dans l'air.

Cependant, la variation de consommation du cylindre est supérieure à la variation du moteur à vide, c'est donc que le cylindre n'a pas une révolution/rugosité parfaite ou cela

Conclusion :

Toute forme de révolution semble plus adaptée à un volant d'inertie mais il n'existe à priori pas une forme spécialement mieux que les autres. De plus, cela n'a pas forcément de sens de parler de forme plus performante car le volant peut et doit être adapté au cahier des charges. Celui-ci peut par exemple jouer le rôle d'un rotor directement au sein d'un moteur. Nous avons vu qu'il est plus avantageux que la normal de rotation soit colinéaire à la gravité. Il est bien sûr indispensable que le volant soit bien équilibré, autant pour les guidages par paliers que pour le volant lui-même. Enfin, le vide à l'intérieur de l'enceinte permet de diminuer les pertes énergétiques.

Discussion :

Il aurait peut-être été plus intéressant d'étudier moins de volants mais de fixer plus de contraintes pour pouvoir davantage pousser l'étude en comparant en terme de résistance des volants à forme plus ou moins cylindriques. A la suite des dernières simulations, il en devient indispensable de comprendre les résultats étranges trouvés en RdM de simulation car cela empêche toute étude poussée en RdM.

Références :

- [1] 'Islands & Isolated Grids | Beacon Power'. <https://beaconpower.com/islands-isolated-grids/> (accessed Feb. 14, 2022).
- [2] 'Les volants d'inertie du stockage des énergies renouvelables', *Révolution Énergétique*, May 22, 2018. <https://www.revolution-energetique.com/volants-inertie-stockage-energie-renouvelable/> (accessed Feb. 14, 2022).
- [3] 'Stockage d'électricité : un volant d'inertie enfin abordable', Jul. 2015, Accessed: Feb. 14, 2022. [Online]. Available: <https://www.lemoniteur.fr/article/stockage-d-electricite-un-volant-d-inertie-enfin-abordable.749604>
- [4] C. Abbezzot, 'Système inertiel de stockage d'énergie couplé au générateur photovoltaïque et piloté par un simulateur temps réel', p. 149.
- [5] L. Bakay, 'DIMENSIONNEMENT ET PERTES DANS UN CENTREUR MAGNÉTIQUE GUIDANT UN VOLANT D'INERTIE SOUMIS À UN BALOURD : Application au stockage d'énergie de longue durée', p. 276.
- [6] H. B. Ahmed, B. Multon, N. Bernard, and C. Kerzreho, 'Le stockage inertiel électromécanique', p. 13, 2007.
- [7] 'Frottements fluides (air)'. <https://forums.futura-sciences.com/physique/856510-frottements-fluides-air.html#post6405123> (accessed Feb. 15, 2022).
- [8] Yannaël Bossard, *Consumption of an engine dependind on the Pressure (vacuum pump)*, (Dec. 25, 2019). Accessed: Feb. 17, 2022. [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=2lQb02Z_9fc