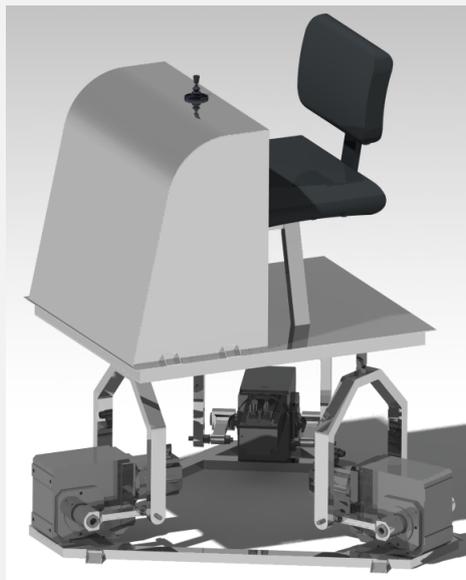


École Polytechnique de l'université de Tours

Spécialité : DMS
7 Avenue Marcel DASSAULT
37200 TOURS FRANCE
+33 247 361 301
www.polytech@univ-tours.fr

Rapport de projet de fin d'études 2018

Étude d'un simulateur de vol



Etudiants : Romain Ferru & Romain Chabot
Promo : 2018

Tuteur académique : M. Guéhaël Le Quilliec

22 février 2018

Remerciements

Nous aimerions tout d'abord remercier notre tuteur pédagogique, M. Guénaël Le Quilliec, pour son soutien au cours de ce projet ainsi que les directives qu'il nous a fournies.

Nous souhaiterions remercier M. Olivier Joubert pour l'aide qu'il nous a apportée lors de l'étude des plans d'expériences.

Nous remercions également M. Florent Chalon pour l'assistance fournie sur Abaqus et M. Arnaud Duchosal pour nous avoir guidé sur le choix de la cinématique.

Et finalement, Marine pour la relecture de ce rapport.

Table des matières

Remerciements	1
Introduction	3
1 Étude préliminaire	4
1.1 Rédaction du cahier des charges	4
1.2 Étude des technologies existantes	5
1.2.1 Le simulateur à vérin	5
1.2.2 Le simulateur à arceaux	6
1.2.3 Le simulateur à 3 moteurs	6
2 Conception du simulateur	7
2.1 Étude cinématique	7
2.2 Plan d'expérience	8
2.2.1 Détermination de l' <i>Angle</i> ₉₀	9
2.2.2 Détermination de l' <i>Angle</i> _{max}	11
2.2.3 Conclusion du plan d'expérience	12
2.3 Dimensionnement des moteurs	14
2.3.1 Présentation du problème	14
2.3.2 Plaque horizontale	15
2.3.3 Plaque inclinée	15
2.4 Choix des éléments chez les fournisseurs	17
3 Conception assistée par ordinateur et dimensionnement	18
3.1 Réalisation du simulateur de vol via Catia	18
3.2 Dimensionnement des éléments normalisés	19
3.2.1 Dimensionnement : goujon	19
3.2.2 Dimensionnement : clavettes	20
3.2.3 Dimensionnement : goupilles	20
3.2.4 Dimensionnement : paliers lisses	21
3.3 Dimensionnement : Joint de cardan	22
Conclusion	23
Annexes	24
Coussinets	24
Pièces sous Catia	24
Listes des figures	27
Listes des tableaux	27

Introduction

Notre projet de fin d'étude consistait à concevoir un simulateur de vol ; la conception d'un simulateur de vol répond à une demande du corps enseignant visant à proposer une spécialité aéronautique dans l'école.

Dans ce but, l'école aimerait se doter d'un simulateur de vol. Il permettrait de promouvoir les compétences mécaniques, électriques et automatiques enseignées à l'école lors des salons ou des journées portes ouvertes. C'est pour répondre à ce besoin qu'un PFE a été créé avec pour objectif la réalisation d'un simulateur de vol qui utiliserait une énergie électrique. Le choix de cette énergie est dans un souci d'adaptabilité à tous types d'environnement (possibilité de faire fonctionner le simulateur dès lors que l'on a un accès électrique). De plus, dans un souci de mobilité, le simulateur aura pour contrainte un encombrement minimum ce qui permettra un déplacement aisé du simulateur pour répondre aux besoins explicités ci-dessus.

Sur ce PFE, nous nous sommes concentrés sur la partie conception mécanique de la structure en laissant la partie asservissement à d'autres étudiants dans le cadre d'une éventuelle suite. La partie conception mécanique de la structure sous-entend : le choix d'une cinématique, la conception des différentes pièces utilisées pour obtenir cette cinématique, le dimensionnement de celles-ci dans un contexte particulier (sécurité accrue liée à la gestion d'être humain sur notre machine) ainsi que le choix des solutions techniques.

Dans ce rapport, nous allons vous présenter la démarche suivie ainsi que les étapes qui nous ont permis d'aboutir à notre produit final.

1 Étude préliminaire

Dans le cadre de notre projet, il était important pour nous dans un premier temps de nous renseigner sur les souhaits de l'école Polytech Tours vis à vis du simulateur de vol puis, dans un second temps, d'étudier les technologies existantes.

1.1 Rédaction du cahier des charges

C'est, dans l'objectif de nous soumettre aux contraintes de l'école ainsi que de cadrer le projet, que nous avons commencé par la rédaction d'un cahier des charges (Ce rapport n'étant pas fait pour mettre un cahier des charges entier, nous allons seulement parler des éléments clés).

Après une étude des attentes, les éléments importants de notre simulateur sont les suivants :

- Doit utiliser l'énergie électrique
- Doit être transportable
- La simulation sera réalisée avec un casque de réalité virtuelle
- Simulation d'un avion de ligne

Nous avons donc reformulé de manière simple le besoin avec un diagramme bête à corne :

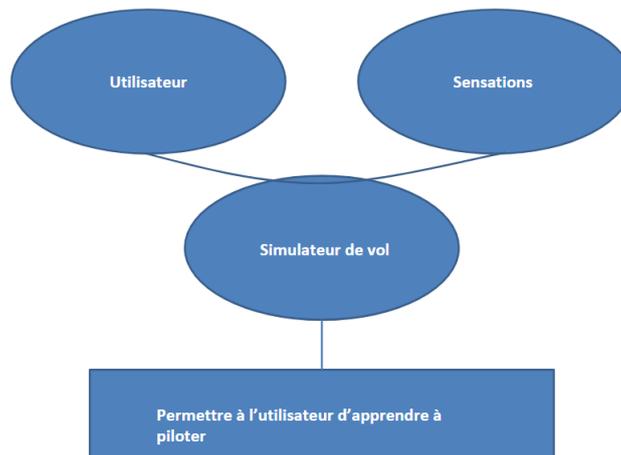


FIGURE 1 – Bête à cornes

Et de manière plus détaillée avec un diagramme pieuvre :

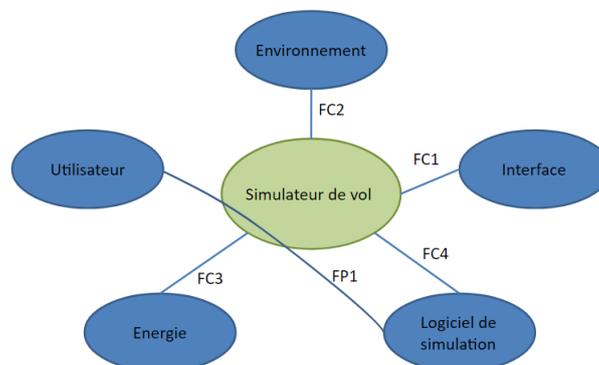


FIGURE 2 – Diagramme pieuvre

- FP1 : Permettre à l'utilisateur d'apprendre à piloter
- FC1 : Reproduire l'environnement visuel
- FC2 : Doit pouvoir s'adapter à son environnement
- FC3 : Utiliser de l'énergie électrique
- FC4 : Etre compatible avec les logiciels de simulations disponibles

Le simulateur doit être capable de supporter non seulement la charge de ses propres éléments, mais également la charge d'un homme. Après une étude des différents éléments présents sur notre simulateur (Chaise/Support/bras) ainsi que le poids d'un homme, nous arrivons à la somme de 160kg à soulever.

De plus, notre simulateur s'adaptera au d'un avion de ligne. Après plusieurs recherches, nous avons trouvé que l'angle de roulis doit être supérieur à 15° . L'angle de tangage sera pris équivalent (Notre simulateur ne pourra simuler de chute libre/crash). L'angle de lacet étant très faible sur un avion de ligne, nous ne le prenons pas en compte.

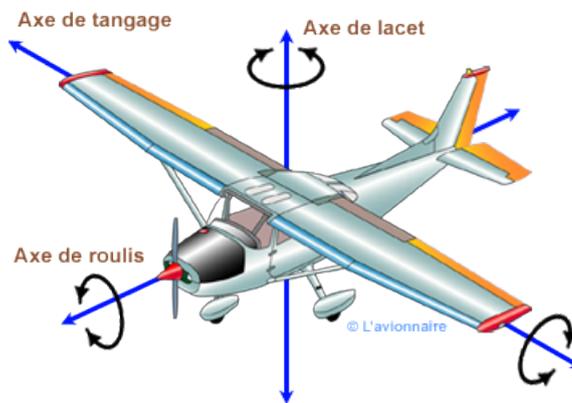


FIGURE 3 – Angles utiles sur un avion

1.2 Étude des technologies existantes

Une fois les contraintes du projet définies, nous avons étudié les technologies déjà existantes afin de réaliser des choix quant à la conception.

1.2.1 Le simulateur à vérin

Le simulateur le plus classique est le simulateur utilisant des vérins.

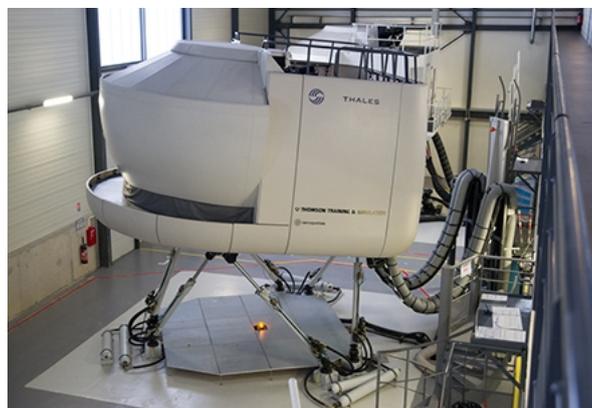


FIGURE 4 – Simulateur à vérin

Celui ci présente de nombreux avantages puisqu'un vérin est très simple à commander, et les trajectoires obtenues sont simples à prédire lors de l'asservissement. Toutefois, il utilise une énergie

pneumatique, alors que nous devons utiliser une énergie électrique afin que le simulateur puisse s'adapter aux salons auxquels il sera transporté.

1.2.2 Le simulateur à arceaux

C'est un simulateur peu commun. Le cockpit est relié par une pivot d'axe \vec{x} à un premier cadre qui est lui même relié à un autre cadre par une pivot d'axe \vec{y} . Ainsi, les deux rotations sont permises.



FIGURE 5 – Simulateur à arceaux

Toutefois, nous avons écarté le principe car l'ensemble du simulateur prenait trop de place vu que les arceaux viennent encore élargir l'emplacement réservé au pilote.

1.2.3 Le simulateur à 3 moteurs

Ce simulateur est celui dont nous avons choisi de reprendre le principe. Il utilise l'énergie électrique pour alimenter les 3 moteurs et l'ensemble de la partie motrice se trouve sous le châssis. On a ainsi un gain de place.



FIGURE 6 – Plateforme mobile

Comme vous pouvez le voir sur la figure précédente, cette plateforme est orientée par 3 moteurs placés en triangle. De plus, elle réalise des mouvements verticaux qui peuvent être intéressants pour simuler le décollage ou l'atterrissage.

Le lien permettant d'accéder à la plateforme est mis en référence page [26](#).

2 Conception du simulateur

2.1 Étude cinématique

Afin de commencer la conception, il est important de réaliser une étude cinématique et surtout un schéma cinématique. Puisque notre simulateur est un projet en 3D, nous avons utilisé le logiciel "OpenMeca" qui est un open source et très rapide d'utilisation. Ils nous a permis de simuler plusieurs schémas que nous avons en tête.

Nous avons donc réalisé ce schéma cinématique :

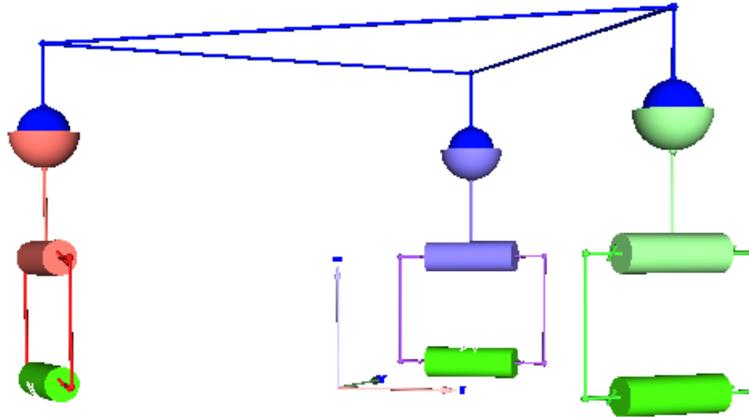


FIGURE 7 – Schéma cinématique

Comme nous pouvons le voir, notre système est composé de 8 sous-ensembles :

- Ensemble 1 : Moteurs/Batî (Vert pomme)
- Ensembles 2-4 : Vilebrequins (Rouge/Violet/Vert)
- Ensembles 5-7 : Bielles (Rose/violet pâle/Vert pâle)
- Ensemble 8 : Plateforme

Les liaisons entre l'ensemble 1 et les ensembles 2-4 sont réalisées par des pivots commandés en position (moteurs). Les liaisons entre les ensembles 2-4 et 5-7 sont réalisées par des pivots. Les liaisons entre les ensembles 5-7 et l'ensemble 8 sont réalisées par trois liaisons rotules.

Une fois la cinématique réalisée, nous avons calculé le degré hyperstatique de notre système.

$$h = N_s - (6 * (p - 1) - m)$$

avec :

- N_s : Nombre d'inconnues de liaison
- p : Nombre de sous-ensembles
- m : Mobilités du mécanisme.

Ce système à 8 sous-ensembles donc $p=8$. Il y a trois mouvements utiles¹. Il suffit de connaître la position du moteur pour avoir la position du vilebrequin. On a donc $m=3$.

De plus, le nombre d'inconnues de liaison pour une pivot est de 5, et de 3 pour une rotule. On obtient donc $N_s = 6 * 5 + 3 * 3 = 39$.

Finalement :

$$h = 39 - (6 * (8 - 1) - 3) = 0$$

Le problème est bien **isostatique**.

1. ce sont les mouvements possibles du mécanisme vis-à-vis de l'extérieur ; c'est le nombre de paramètres de position (coordonnées et angles de rotation) qu'il faut connaître pour définir la position des pièces d'entrée et de sortie du mécanisme

2.2 Plan d'expérience

Afin de réaliser la conception de notre système, il faut dimensionner en longueur les éléments. Ainsi, nous avons choisi de réaliser une maquette 3D sur Catia reprenant notre schéma cinématique. En paramétrant les longueurs, qui sont susceptibles de varier, nous sommes capables de mesurer l'angle de sortie.

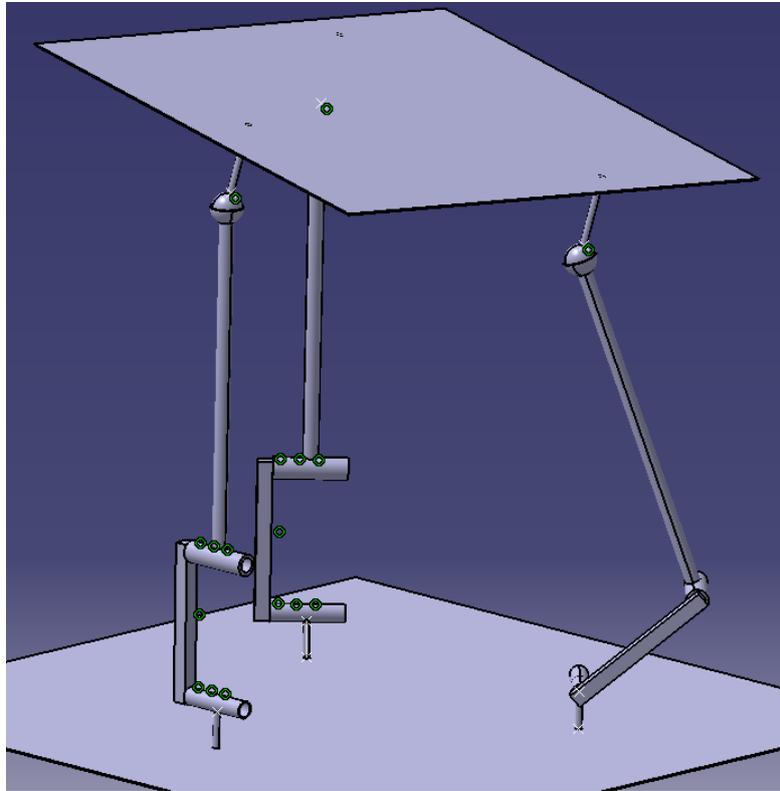


FIGURE 8 – Maquette cinématique

Ainsi, nous avons voulu réaliser un plan d'expérience en utilisant la maquette, figure 8. Ce plan avait pour objectif d'obtenir les équations liant les angles de sorties aux différentes dimensions de notre système dans le but d'optimiser celles-ci. Nous avons choisi de mesurer deux angles de sortie. Un angle que nous appelons $Angle_{90}$ qui correspond à l'angle de la plaque par rapport à l'horizontale lorsque le vilebrequin est parallèle au sol, et un second angle que nous appelons $Angle_{max}$ qui correspond à l'angle maximum de la plaque avec l'horizontale que nous pouvons obtenir selon la géométrie du système en ne faisant varier qu'un moteur (Le moteur n'est pas toujours dans la même position).

Nous avons trois paramètres qui varient :

- Bielle X1 : Longueur de la bielle (400mm à 600mm)
- Vilebrequin X2 : Longueur du vilebrequin (100mm à 300mm)
- Coté X3 : Distance entre les moteurs (400mm à 1000mm)

Nous avons réalisé un plan d'expérience :

N° Éssai	X1	X2	X3	X12	X13	X23	X123	Angle ₉₀	Angle _{max}
1	400	100	400	40000	160000	40000	16000000	18.156	36.6
2	600	100	400	60000	240000	40000	24000000	17.735	36.097
3	400	300	400	120000	160000	120000	48000000	64.408	72.295
4	600	300	400	180000	240000	120000	72000000	63.298	71.787
5	400	100	1000	40000	400000	100000	40000000	7.301	13.38
6	600	100	1000	60000	600000	100000	60000000	7.091	13.382
7	400	300	1000	120000	400000	300000	120000000	24.603	44.505
8	600	300	1000	180000	600000	300000	180000000	23.32	50.554

TABLE 1 – Plan d’expérience

Pour la suite de l’analyse, nous avons utilisé le logiciel ”Minitab” (Licence gratuite d’un mois).

2.2.1 Détermination de l’Angle₉₀

À l’aide du logiciel, nous avons déterminé nos paramètres influents.

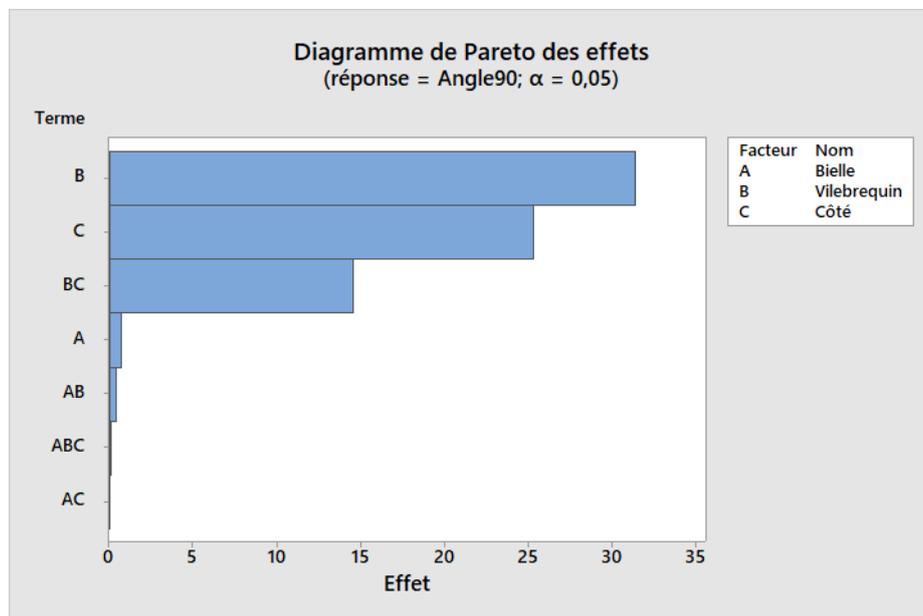


FIGURE 9 – Paramètres non-influents/influents

Nous avons déterminé les paramètres influents et nous remarquons que la longueur de la bielle (X1) n’est pas influente.

Notre objectif étant d’avoir l’équation que relie l’angle de sortie à 90° aux paramètres d’entrée, nous avons refait une étude avec seulement les paramètres influents.

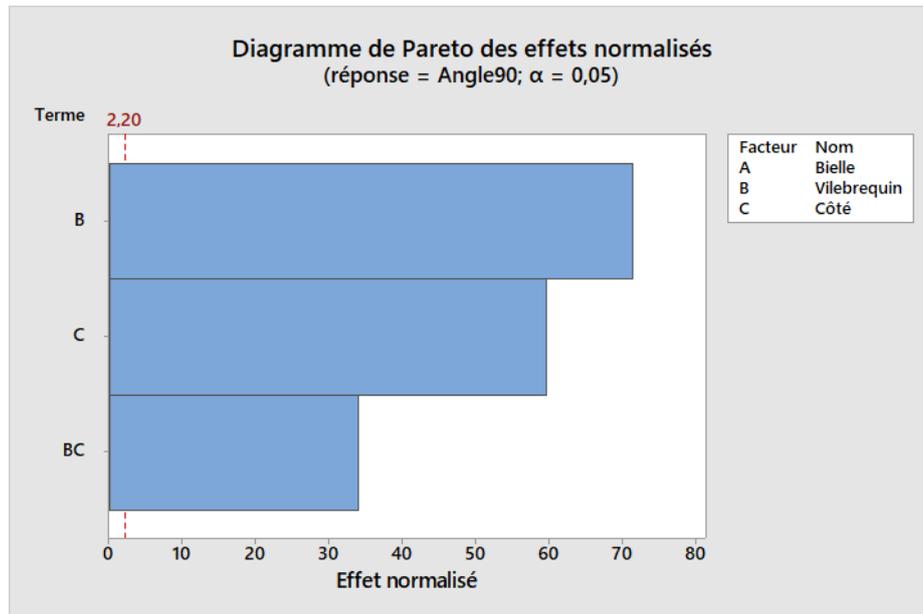


FIGURE 10 – Paramètres influents

L'équation est la suivante :

$$Angle_{90} = -7.00 + 0.32930 * X2 + 0.00601 * X3 - 0.000247 * X23$$

2.2.2 Détermination de l'Angle_{max}

À l'aide du logiciel, nous avons déterminé nos paramètres influents.

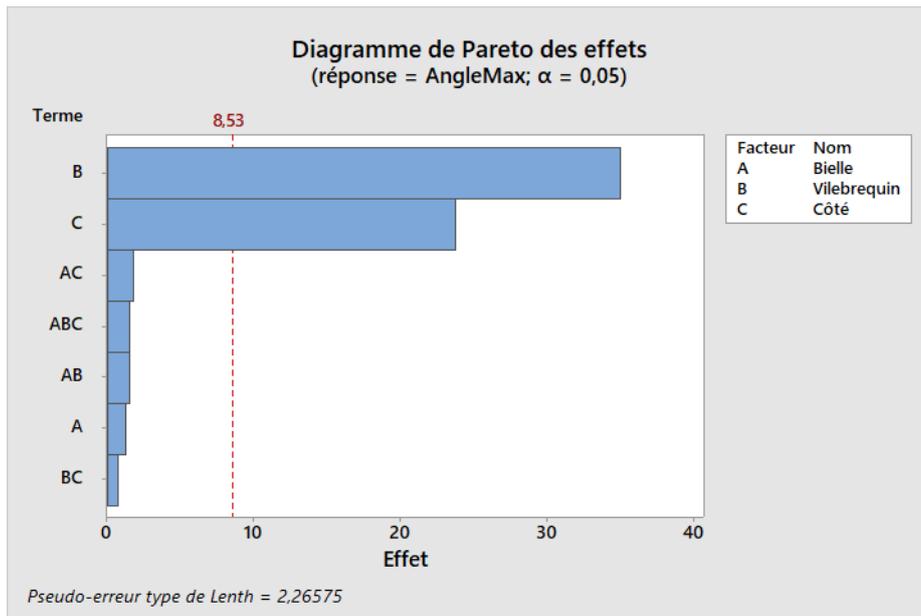


FIGURE 11 – Paramètres non-influents/influents

Nous avons déterminé les paramètres influents et nous remarquons que la longueur de la bielle (X1) n'est pas influente.

Notre objectif étant d'avoir l'équation que relie l'angle de sortie maximum aux paramètres d'entrée, nous avons refait une étude avec seulement les paramètres influents.

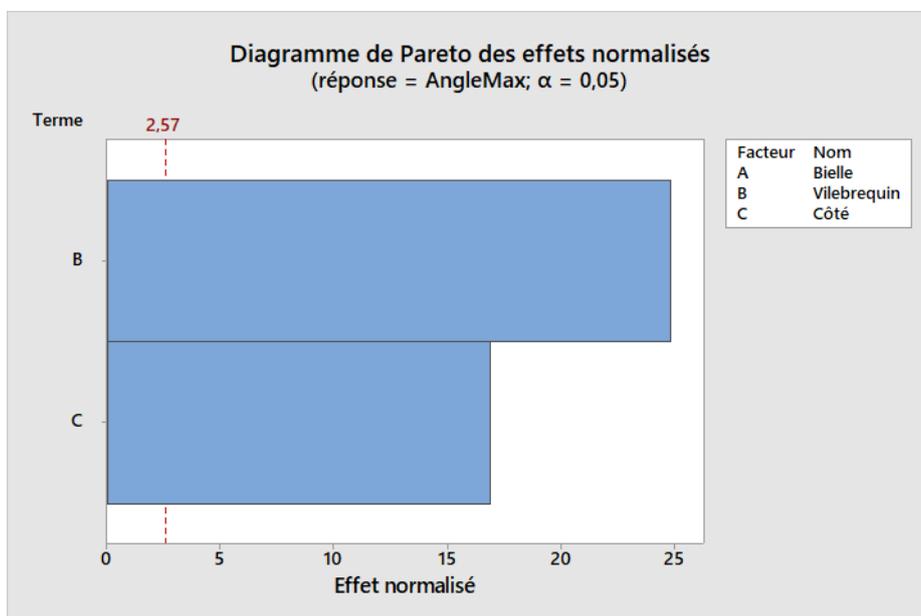


FIGURE 12 – Paramètres influents

L'équation est la suivante :

$$Angle_{max} = 35.1 + 0.17460 * X2 - 0.03957 * X3$$

2.2.3 Conclusion du plan d'expérience

Les équations sont les suivantes :

— $Angle_{90} = -7.00 + 0.32930 * X2 + 0.00601 * X3 - 0.000247 * X2^2$

— $Angle_{max} = 35.1 + 0.17460 * X2 - 0.03957 * X3$

Nous avons également vérifié si les équations étaient fidèles au modèle :

N° Essai	Vilebrequin	Cote	$Angle_{90}$	$Angle_{90}$ (Minitab)	$Angle_{max}$	$Angle_{max}$ (Minitab)
1	100	400	18.156	18.454	36.6	36.732
2	300	400	64.408	64.554	72.295	72.652
3	100	1000	7.301	7.24	13.3	12.99
4	300	1000	24.603	23.	66.024	47.91
5	200	1000	15.424	15.47	29.15	30.45
6	1000	700	10.307	12.847	19.389	24.861
7	300	700	34.223	44.127	58.862	59.781
8	200	700	21.877	28.487	27.698	42.321
9	200	1000	15.424	15.47	29.15	30.45

TABLE 2 – Tableau de conclusion

Comme nous pouvons le voir dans le tableau 2, les résultats obtenus par minitab sont équivalents aux résultats obtenus sur la maquette. Les équations sont donc fidèles au modèle.

Nous avons utilisé les équations afin d'obtenir les entrées pour une sortie donnée. Nous savons que c'est une approximation, nous avons donc choisi une sortie $Angle_{90} = 25^\circ$ et $Angle_{90} = 30^\circ$. En prenant des valeurs supérieures à 20° , nous sommes sûrs de remplir le cahier des charges.

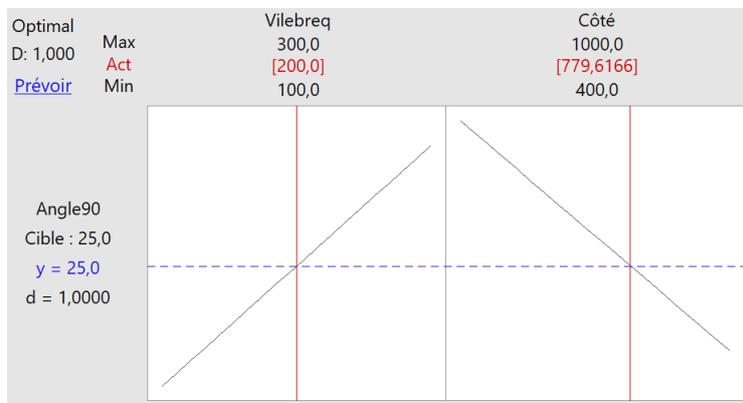


FIGURE 13 – $Angle_{90} = 25^\circ$



FIGURE 14 – $Angle_{90} = 30^\circ$

Comme nous pouvons le voir, le logiciel nous indique que pour un angle compris entre 25° et 30°, il nous faut un vilebrequin de 200mm et une longueur de côté comprise entre 664.5mm et 779.6mm.

Puisqu'il est préférable de travailler avec des valeurs entières, nous avons regardé l'angle de sortie pour un vilebrequin de 200mm et une longueur de côté de 700mm.

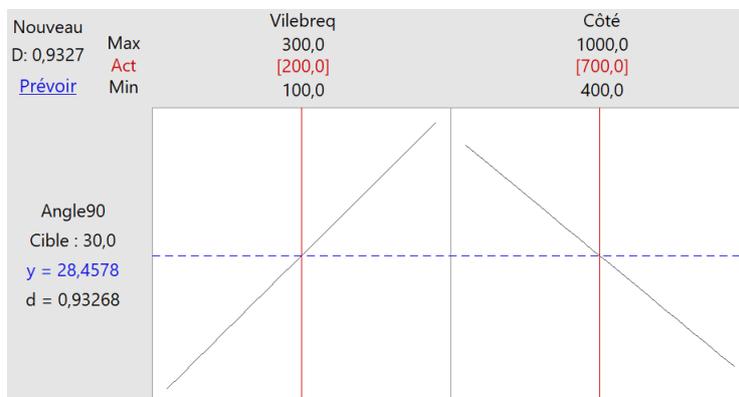


FIGURE 15 – Angle₉₀ pour des longueurs entières

Avec ces longueurs là, nous obtenons un angle de sortie de 28.4°. Ceci remplit les conditions du cahier des charges. Nous savons qu'il y a une marge d'erreur sur l'utilisation de ces équations, c'est pour cela que nous nous référons également aux mesures réalisées sur la maquette. Comme nous pouvons le voir dans le tableau 2, nous avons déjà fait le test maquette en utilisant ces longueurs et nous obtenons également un angle supérieur à 20°.

2.3 Dimensionnement des moteurs

2.3.1 Présentation du problème

D'après notre choix de système, nous devons choisir 3 moteurs pour pouvoir effectuer les déplacements souhaités.

Nous avons choisi de dimensionner les moteurs à leur couple maximum qui sera lorsque le vilebrequin est parallèle au sol comme on peut le voir sur la figure ci-dessous, 16.

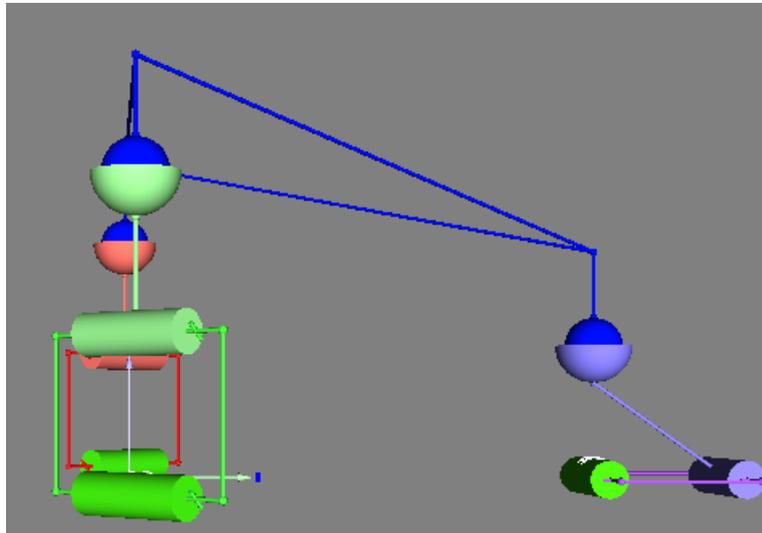


FIGURE 16 – Moteur à 90°

Comme convenu dans le cahier des charges, notre simulateur de vol doit être capable de soulever une masse de 160kg. Pour ne plus se compliquer les calculs par la suite, nous choisissons d'appliquer le coefficient de sécurité maintenant, et donc de soulever une charge totale de 480kg.

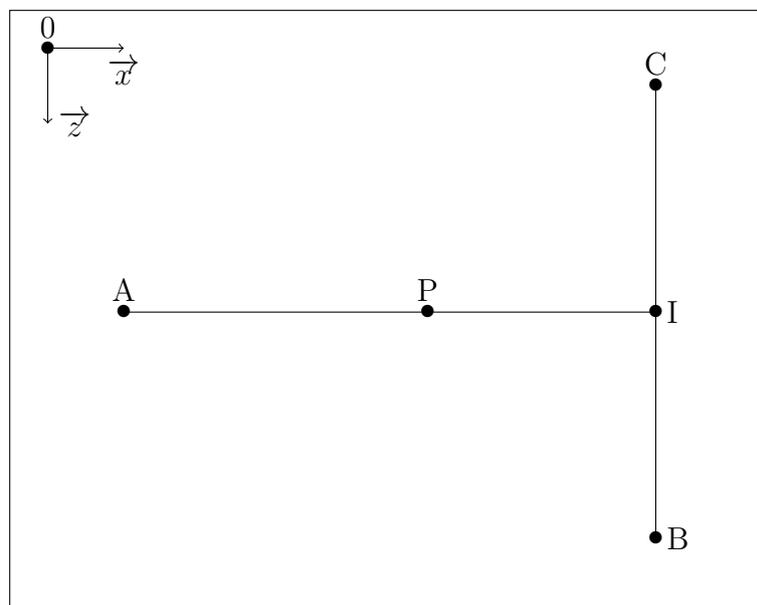


FIGURE 17 – Plaque - Vue de dessus

Le poids \vec{P} est appliqué au barycentre P du triangle équilatéral ABC.

2.3.2 Plaque horizontale

Lorsque la plaque est parallèle, le poids est réparti équitablement sur chacun des points A, B et C (Donc un tiers du poids total sur chaque moteur). Le couple maximum pour une plaque en position horizontale avec les moteurs à 90° est donc la longueur du vilebrequin multipliée par la force exercée par le poids.

On obtient donc :

$$Couple_{max} = Longueur_{vilebrequin} * Poids$$

AN :

$$C_{max} = 0.2 * 1600 = 320Nm$$

2.3.3 Plaque inclinée

Comme nous l'avons dit précédemment, le couple maximum est exercé lorsque le moteur est à 90° . Le problème est que lorsque la plaque est inclinée, le point d'application du poids n'est plus au barycentre du triangle (ex : Si la plaque est inclinée en avant, il y aura plus de poids à l'avant de la plaque qu'à l'arrière).

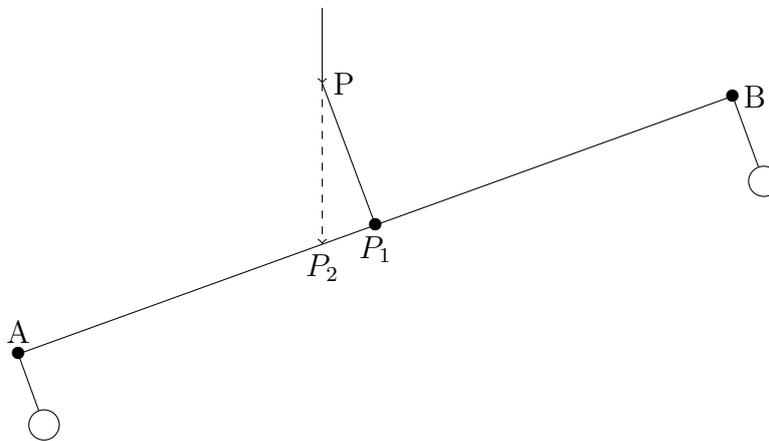


FIGURE 18 – Plaque - Vue de côté/Inclinée

Comme on peut le voir sur cette figure, le poids \vec{p} n'est plus appliqué au barycentre P_1 mais en P_2 .

Paramètres :

- $x_1 = AP_2$
- $x_2 = P_2P_1$
- $L_{Bary} = AP_1$
- $\alpha = \widehat{P_1PP_2}$
- $L_{siege} = P_1P$
- côté = AB = AC = BC
- Les longueurs IB, IC sont accessible depuis la figure 17

$$x_2 = \tan\alpha * L_{siege}$$

$$x_1 = L_{Bary} - x_2$$

$$L_{Bary} = \frac{\sqrt{3}}{3} * cote$$

Principe fondamental de la statique :

$$\text{Somme des forces : } \Sigma \vec{F}_{ext} = \vec{0} \Leftrightarrow \vec{Y}_a + \vec{Y}_b + \vec{Y}_c + \vec{P} = \vec{0} \Leftrightarrow Y_a + Y_b + Y_c - P = 0$$

Au vu de la symétrie, on remarque que $Y_b = Y_c$ donc :

$$Y_a + 2Y_b - P = 0 \Rightarrow Y_a = P - 2Y_b$$

$$\text{Somme des moments : } \Sigma \vec{M}_a(\vec{F}_{ext}) = \vec{0}$$

$$\begin{aligned} \vec{M}_a(\vec{p}) + \vec{M}_a(\vec{Y}_b) + \vec{M}_a(\vec{Y}_c) &= \vec{0} \\ \Rightarrow \vec{AP}_2 \wedge \vec{P}_2 + \vec{AB} \wedge \vec{Y}_b + \vec{AC} \wedge \vec{Y}_c &= \vec{0} \\ \Rightarrow \vec{AP}_2 \wedge \vec{P}_2 + (\vec{AI} + \vec{IB}) \wedge \vec{Y}_b + (\vec{AI} + \vec{IC}) \wedge \vec{Y}_c &= \vec{0} \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} AP_2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} 0 \\ -P \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} AI \\ 0 \\ IB \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} 0 \\ Y_b \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} AI \\ 0 \\ IB \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} 0 \\ Y_c \\ 0 \end{pmatrix} = \vec{0}$$

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -P * AP_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} IB * Y_b \\ 0 \\ AI * Y_b \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -IB * Y_c \\ 0 \\ AI * Y_c \end{pmatrix} = \vec{0}$$

$$\begin{cases} IB * Y_b - IB * Y_c &= 0 \\ 0 &= 0 \\ -P_2 * AP_2 + AI * Y_b + AI * Y_c &= 0 \end{cases}$$

On obtient donc les résultats suivant :

$$\begin{aligned} Y_b &= Y_c \\ -P * AP_2 + 2AI * Y_b &= 0 \end{aligned}$$

avec $AP_2 = L_{bary}$ et $AI = \frac{\sqrt{3}}{2} * cote$.

$$\begin{aligned} Y_b &= \frac{P * AP_2}{2 * AI} \\ Y_b &= \frac{P * x_1}{\frac{2 * \sqrt{3}}{2} * cote} \\ Y_b &= \frac{P * x_1}{\sqrt{3} * c} \end{aligned}$$

$$Y_a = P - Y_b$$

Finalement :

$$Y_a = P - 2 * \frac{P * (\frac{\sqrt{3}}{3} * cote - \tan(\alpha) * L_{siege})}{\sqrt{3} * cote}$$

Si l'on reprend les données qui nous intéressent, c'est à dire :

- $\alpha = 22^\circ$
- $P = 4800N$
- $cote = 700mm = 0.7m$
- $L_{siege} = 45mm = 0.045m$

$$Y_a = 4800 - 2 * \frac{4800 * (\frac{\sqrt{3}}{3} * 0.7 - \tan(22) * 0.045)}{\sqrt{3} * 0.7} \simeq 1744N$$

On constate une augmentation de la force de poids exercée sur le moteur de 9%. Si l'on reprend le couple maximum subit par le moteur, nous obtenons :

$$couple_{max} = 1744 * 0.2 = 348.8Nm \simeq 350Nm$$

Nous choisissons donc de dimensionner nos moteurs pour 350Nm.

2.4 Choix des éléments chez les fournisseurs

Afin d'aider à la poursuite et à la conception de ce projet, nous avons réalisé un tableau où nous avons trouvé différents fournisseurs pour les éléments dont nous pourrions avoir besoin.

Éléments	Prix	Dimensions	Fournisseurs
Plaque Aluminium	61,98 euros TTC	800*1000x1.5	http://tole.lametallerie.net
Tube Aluminium	13,00 euros HT /m	50x30x2	www.commentfer.fr
Rotules	25.05 euros/u	-	www.norelem.fr
Moteurs	-	-	www.stoeber.de
Tube plein acier	7euros HT /m	-	www.commentfer.fr

TABLE 3 – Tableau des fournisseurs

Le reste des éléments n'étant que de la quincaillerie, les élèves le trouveront facilement dans les ateliers de l'école.

3 Conception assistée par ordinateur et dimensionnement

3.1 Réalisation du simulateur de vol via Catia

Nous avons réalisé le simulateur de vol sous CATIA V5. Afin d'éviter une perte de temps, seul le simulateur complet est mis sur ce rapport. Les éléments ainsi que les sous-ensembles cinématiques sont disponibles en annexes, page 24.

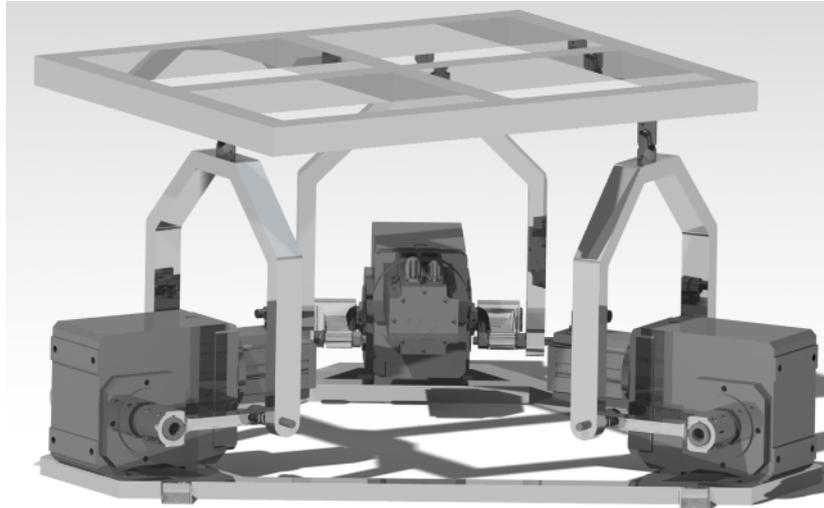


FIGURE 19 – Simulateur sans cockpit

La figure 19 montre la mécanique de notre simulateur qui est composé de 3 moteurs donc de 3 bras. Chaque bras a une mobilité indépendante des autres, et permet une inclinaison de la plateforme comme on le souhaite. De plus, l'utilisation de moteur brushless permet une mise en position réactive et précise.

Pour une meilleure visualisation de l'ensemble, nous avons ajouté un cockpit sur la plateforme. Celui-ci reste très basique, il nécessitera une étude supplémentaire.

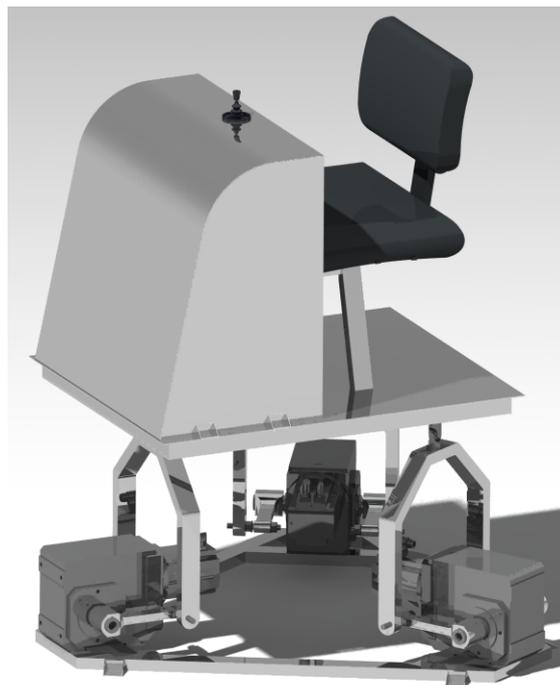


FIGURE 20 – Simulateur avec cockpit

3.2 Dimensionnement des éléments normalisés

Dans la conception de notre système, plusieurs éléments normalisés sont soumis à des efforts (tranchants/normaux) et des moments (fléchissants/torsions). Des études de dimensionnement ont été réalisées sur ces éléments.

3.2.1 Dimensionnement : goujon

Le goujon est l'élément qui réalise la liaison entre le vilebrequin et la bielle.

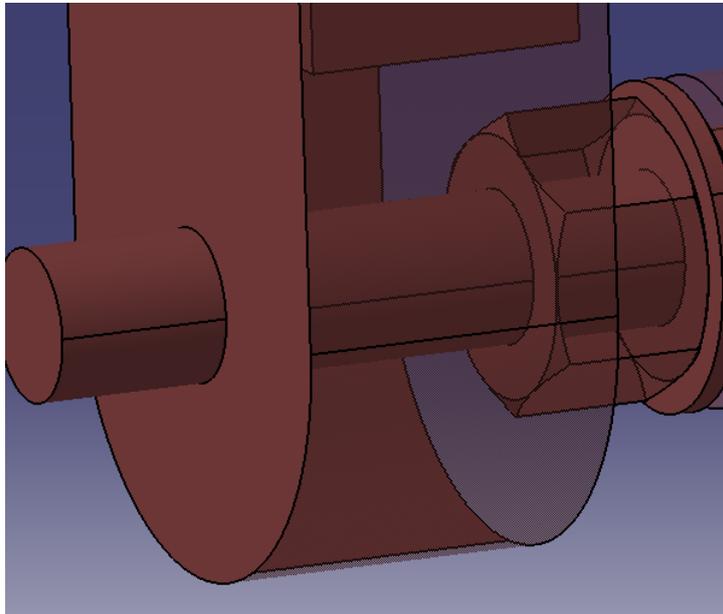


FIGURE 21 – Assemblage : Bielle/Vilebrequin via un goujon

Comme on peut le voir sur la figure ci-dessus, il n'y a pas de moment fléchissant, du moins il est négligeable, vu que l'ensemble des éléments se repose sur un autre. Et il n'y a pas d'effort normal.

Il existe toutefois un effort tranchant :

Le diamètre de notre goujon est de $D=14\text{mm}$. Et la force exercée de la bielle sur le goujon est de $F=1744\text{N}$ (Cf 2.3.1, page 14). Pour la suite de l'étude, nous prendrons $F=1800\text{N}$.

L'effort tranchant est de

$$\tau = \frac{F}{S} \text{ avec } S = \pi * r^2$$

AN :

$$\tau = \frac{1800}{\pi * 0.007^2} = 11693016.23\text{Pa} = 11.7\text{MPa}$$

Module de cisaillement :

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} = \frac{210 * 10^6}{2(1.3)} = 80\text{MPa}$$

$$Re_{acier_{cisaillement}} = 125\text{MPa}$$

$$\text{car } Re_{acier_{compression}} = 250\text{MPa}$$

$$\text{et } 0.5 * Re_{acier_{compression}} = Re_{acier_{cisaillement}}$$

On obtient donc $\tau_{goujon} < Re_{acier}$ car Re_{acier} en cisaillement. Le goujon est donc validé.

3.2.2 Dimensionnement : clavettes

Notre système comporte deux clavettes différentes :

La première qui est située sur l'arbre moteur n'a pas besoin d'être dimensionnée puisque le moteur donc l'arbre de sorti et la clavette ont été obtenus sur un site constructeur. Elle transmet le couple entre le moteur et le vilebrequin.

La deuxième clavette de notre système réalise la liaison entre la bielle et la rotule. Elle n'est ici que pour un maintien en position, et pour éviter la rotation de la rotule par rapport à la bielle suivant l'axe \vec{z} . Puisqu'elle n'est ici que pour un maintien en position, et qu'elle ne transmet pas de couple, le matage est nul. La dimension normalisée choisie est donc suffisante.

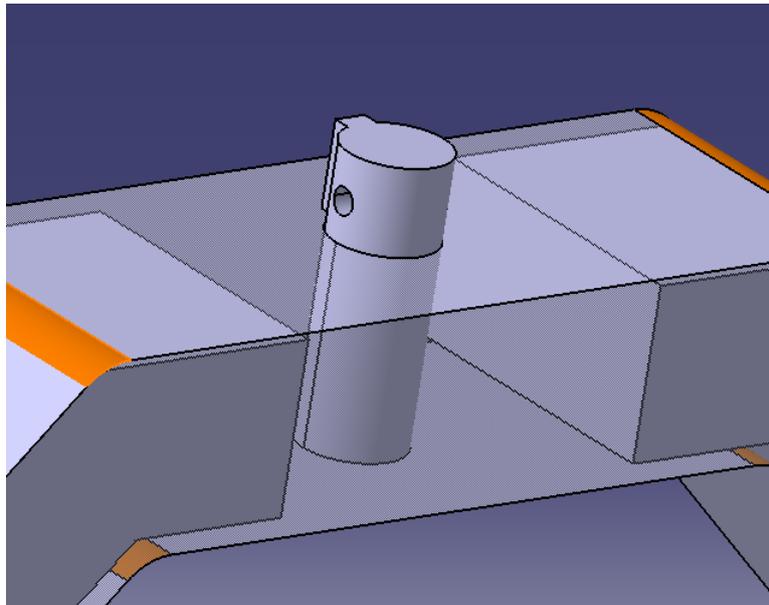


FIGURE 22 – Assemblage : Bielle/rotule via une clavette/goupille

3.2.3 Dimensionnement : goupilles

Notre système comporte une goupille qui maintient en position la rotule sur la bielle et empêche la translation suivant $+\vec{z}$. Cette translation est physiquement impossible dans une utilisation classique du simulateur. Nous avons donc pris cette sécurité afin d'éviter de retirer la plaque simplement en la soulevant.

3.2.4 Dimensionnement : paliers lisses

Les paliers lisses réalisent la rotation entre le vilebrequin et le goujon (qui est fixé sur la bielle).

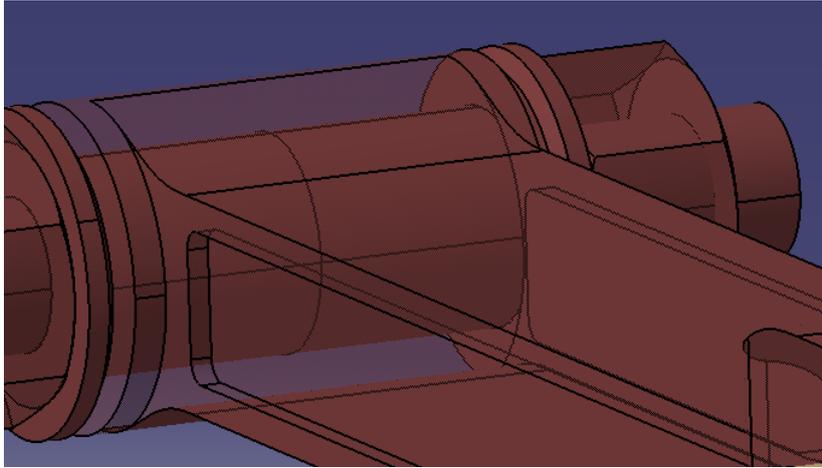


FIGURE 23 – Liaison : Goujon/Vilebrequin via coussinets

La pression exercée sur les coussinets dépend de la longueur de contact l , de la force exercée par l'extérieur sur le coussinet F et du diamètre intérieur d du coussinet. Les paramètres sont $l = 40mm$, $F = 1800N$ et $d = 14mm$.

Pression :

$$P = \frac{F}{d * l}$$

AN :

$$P = \frac{1800}{14 * 40} = 3.21N/mm^2$$

Calcul du produit P.V :

$$P * V = P * R * \frac{2 * \pi * N}{60} \text{ avec } N = 50\text{Tr}/\text{min.}$$

AN :

$$P * V = 3.21 * 0.007 * \frac{2 * \pi * 50}{60} = 0.11765\text{watt}/\text{mm}^2$$

Si l'on compare par rapport au tableau fourni en annexe page 24, on constate que des coussinets auto-lubrifiants en bronze sont suffisants pour notre projet.

3.3 Dimensionnement : Joint de cardan

La liaison rotule entre la bielle et la plaque est réalisée par un joint de cardan.

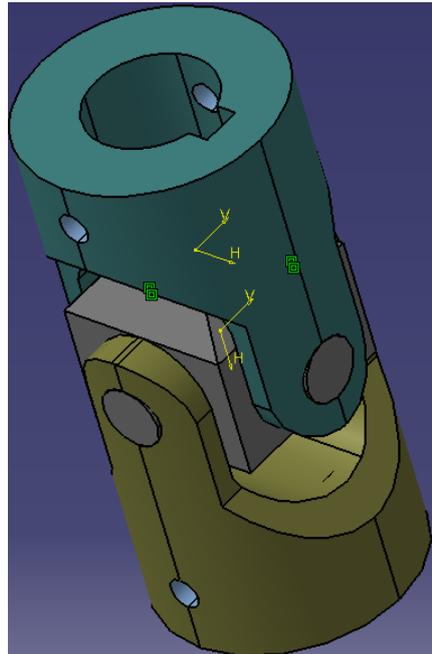


FIGURE 24 – Joint de cardan

Étude en compression :

La force sur chaque joint est de 1600N comme vu précédemment.

Pour l'étude en compression, nous étudierons les deux pièces en vert de la figure 24.

Pour chaque pièce, il y a deux zones en contact soit une force de 800N par zone, et la surface sur laquelle la pression s'exerce est de 32mm².

Avec : $P = \frac{F}{S}$ et nos données, on obtient :

$$P = \frac{800}{32} = 25MPa$$

La pièce étant en acier, la limite élastique est de 250MPa. On constate donc que le joint de cardan en compression ne se déformera pas plastiquement.

Étude en cisaillement :

Contrairement aux deux pièces vertes de la figure 24, la pièce centrale ne subit qu'un cisaillement.

Le rayon est de 4mm. Donc la surface qui subit le cisaillement est de $S = \pi * r^2 = \pi * 4^2 = 50mm^2$

La contrainte de cisaillement τ est égale à la force tangentielle, F, divisée par la surface de la section en cisaillement, A.

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{800}{50} = 16MPa$$

Module de cisaillement : La résistance élastique de l'acier en cisaillement est de 125MPa. (CF 3.2.1, 19)

La contrainte de cisaillement est inférieure au limite élastique. Ce joint de cardan est donc utilisable dans notre cas.

Conclusion

Pour conclure ce rapport ainsi que ce projet, nous aimerions dans un premier temps porter l'accent sur toutes les compétences que nous avons pu acquérir ou bien améliorer suite au travail fourni.

En effet, ce type de projet dispose d'une problématique large, à laquelle nous devons définir nous-mêmes les étapes ainsi que les objectifs. De plus, cette façon de travailler a beaucoup de similarités avec le mode de fonctionnement de l'entreprise, ce qui nous a permis de nous préparer pour notre futur emploi.

Concernant le projet en lui-même, nous nous étions fixés différents objectifs possibles comprenant : le choix d'une cinématique, une réalisation CAO sous Catia, la réalisation d'une maquette prototype ou bien un asservissement de mouvements simples sur la maquette. Cependant, au vu de notre manque d'expérience dans la réalisation de projets, nous avons sous-estimé le temps devant être alloué à chaque objectif. Nous n'avons malheureusement pas eu le temps de réaliser une maquette ainsi que de réaliser son asservissement. Pour finir, l'étude mécanique que nous avons réalisé dans ce projet de simulateur est complète et peut servir de référence à d'autres étudiants lors d'un prochain PFE pour leur permettre de finir le travail que nous avons commencé.

Annexes

Coussinets

Comparaison des performances entre ces 3 familles de coussinets

	Coussinets autolubrifiants	Coussinets Type glacier	Coussinets polymères
Vitesse circonférentielle maximale (m/s)	13 m/s (carbone, graphite) 7 à 8 m/s	2 à 3 m/s	2 à 3 m/s
Températures limites de fonctionnement (°c)	jusqu'à 400°c (graphite) jusqu'à 250°c (bronze/Plomb)	-40°c à +110°c (acétal) -200°c à +280°c (PTFE)	-40°c à +100°c (acétal) -80°c à +120°c (Nylon)
Pression diamétrale admissible p (N/mm ²)	5 N/mm ² (graphite) 20 à 30 N/mm ² (bronze/plomb) 7 à 35 N/mm ² (bronze/étain)	70 N/mm ² (acétal) 50 N/mm ² (PTFE)	7 à 10 N/mm ²
Produit p.V (N/mm ²)×(m/s) ou watt/mm ²	0,5 (graphite) 1,8 à 2,8 (bronze/plomb) 1,7 (bronze/étain)	3 (acétal) 1,8 à 3,6 ^{brièvement} (PTFE)	0,1 (acétal) 0,1 à 0,42 (Nylon)

Catia

Moteur utilisé dans le simulateur :

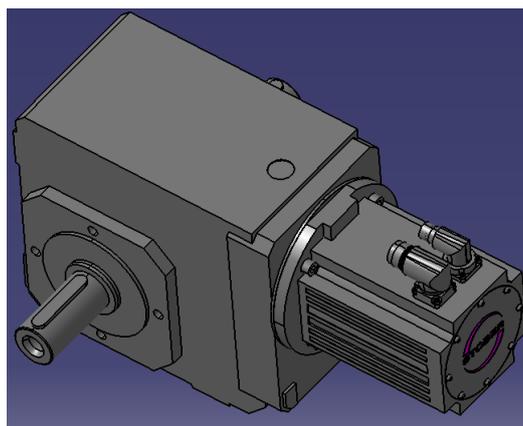


FIGURE 25 – Moteur Catia

Pièce reliée à l'arbre de sortie moteur :

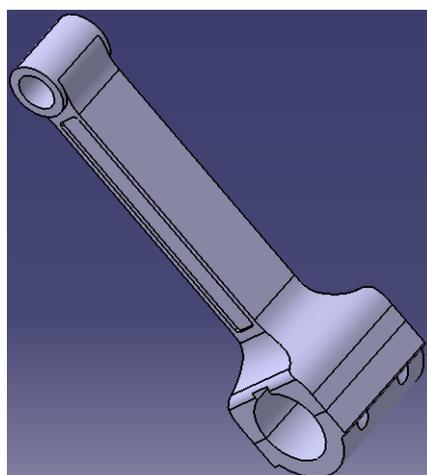


FIGURE 26 – Vilebrequin

Bielle reliant le support aux vilebrequins :

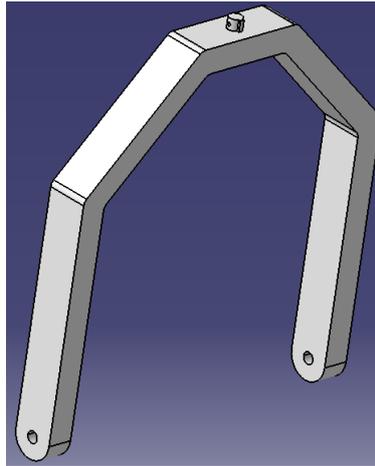


FIGURE 27 – Bielle

Support pour maintenir les moteurs en position :

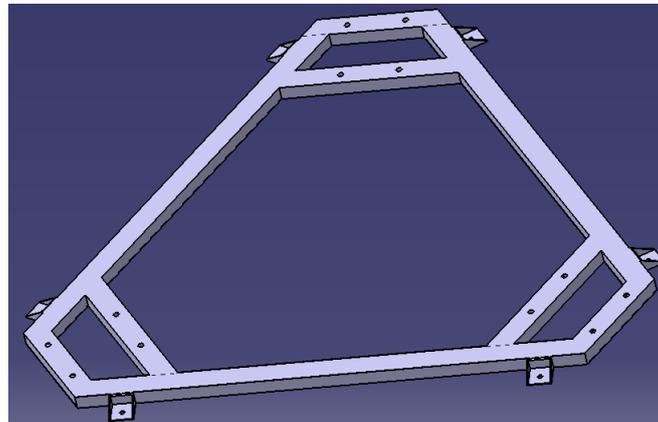


FIGURE 28 – Socle

Grille pour déposer et renforcer la plateforme :

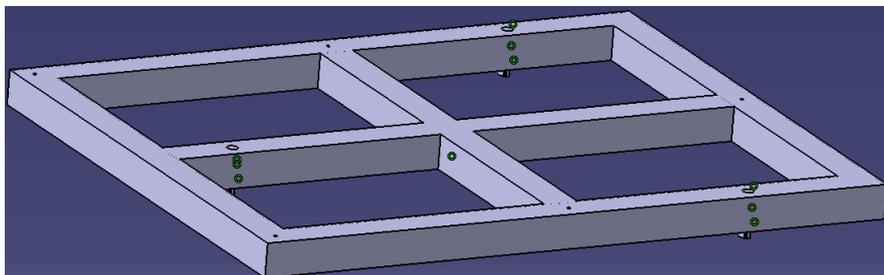


FIGURE 29 – Grille

Références

- Plateforme mobile : <http://www.motionsystems.eu/motion-platforms/3dof-motion-systems/ps-3tm-350/>
- Palier lisses : https://moodle.univ-tln.fr/pluginfile.php/50684/mod_resource/content/1/Les-Paliers-lisses-ou-Coussinets.pdf
- Cisaillement : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Cisaillement>
- Plan d'expérience : [http://www.minitab.com/fr-fr/Published-Articles/Enseigner-le-DOE-\\(plan-d-exp%C3%A9riences\)-%C3%A0-l-aide-d-h%C3%A9licopt%C3%A8res-en-papier-\et-de-Minitab/](http://www.minitab.com/fr-fr/Published-Articles/Enseigner-le-DOE-\(plan-d-exp%C3%A9riences)-%C3%A0-l-aide-d-h%C3%A9licopt%C3%A8res-en-papier-\et-de-Minitab/)
- Avion de ligne : https://fr.wikipedia.org/wiki/Avion_de_ligne
- Guide du dessinateur Industriel
- Pièces importées : tracepart.com

Table des figures

1	Bête à cornes	4
2	Diagramme pieuvre	4
3	Angles utiles sur un avion	5
4	Simulateur à vérin	5
5	Simulateur à arceaux	6
6	Plateforme mobile	6
7	Schéma cinématique	7
8	Maquette cinématique	8
9	Paramètres non-influents/influents	9
10	Paramètres influents	10
11	Paramètres non-influents/influents	11
12	Paramètres influents	11
13	$Angle_{90} = 25^\circ$	12
14	$Angle_{90} = 30^\circ$	12
15	$Angle_{90}$ pour des longueurs entières	13
16	Moteur à 90°	14
17	Plaque - Vue de dessus	14
18	Plaque - Vue de coté/Inclinée	15
19	Simulateur sans cockpit	18
20	Simulateur avec cockpit	18
21	Assemblage : Bielle/Vilebrequin via un goujon	19
22	Assemblage : Bielle/rotule via une clavette/goupille	20
23	Liaison : Goujon/Vilebrequin via coussinets	21
24	Joint de cardan	22
25	Moteur Catia	24
26	Vilebrequin	24
27	Bielle	25
28	Socle	25
29	Grille	25

Liste des tableaux

1	Plan d'expérience	9
2	Tableau de conclusion	12
3	Tableau des fournisseurs	17