

Conception, réalisation et étalonnage d'une cellule d'efforts 6 axes à bas coût

Culture Sciences de l'Ingénieur

Yan BARABINOT - François LOUF

Édité le 29/08/2022

école normale supérieure paris-saclay

Cette ressource est une co- publication avec La Revue 3EI (numéro 109 de juillet 2022). Yan Barabinot est étudiant en 4^{ème} année de l'ENS Paris-Saclay et François Louf est enseignant chercheur à l'ENS Paris-Saclay, au Département d'Enseignement et de Recherche de Génie Mécanique dont il est directeur.

Les capteurs d'efforts mono-axes sont présents dans de nombreuses applications industrielles ou à vocation pédagogique. Leur coût est désormais très abordable. Cependant, lorsque l'on souhaite obtenir une mesure de chargements complexes (3 axes, ou 6 axes), les produits se font plus rares et sont souvent très onéreux.

L'objectif de cette ressource est de présenter la conception, la réalisation et un exemple d'utilisation d'une cellule 6 axes à faible coût utilisable par exemple dans le cadre de projets pédagogiques. Le travail présenté vise à concevoir et réaliser des cellules 6 axes dont le coût ne dépasse pas 150 euros et pouvant être utilisées en enseignement, par exemple, dans le cadre de projets.

1 – Introduction

Dans le domaine industriel, les capteurs d'efforts mono-axe sont couramment utilisés pour mesurer les actions mécaniques transmises entre deux solides selon une seule direction. Il en existe de plusieurs types, mesurant une résultante ou un couple, qui dépendent notamment du niveau de charge à supporter et de la précision de mesure souhaitée. Par exemple, le capteur de pesée à jauges de déformations est fréquemment implanté dans les systèmes mécaniques pour mesurer des efforts uni-axiaux de traction ou compression. Son faible coût, sa taille variable et sa robustesse de mesures en font un capteur de choix pour les systèmes industriels et didactiques.

Dans un mécanisme, pour mesurer un effort exercé par une pièce S_1 sur une autre S_2 , l'idée est de créer une liaison glissière entre les deux solides puis d'insérer un capteur d'effort mono-axe en parallèle afin de bloquer le degré de liberté correspondant. Ce principe peut être illustré à l'aide du schéma proposé en Figure 1.

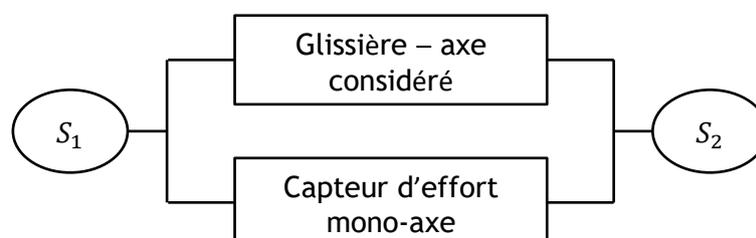


Figure 1 - Association de base d'un capteur d'effort mono-axe

Ce schéma peut être adapté dans le cas où l'on veut mesurer un moment exercé par une pièce S_1 sur une autre S_2 comme indiqué en Figure 2. Cette représentation va nous aider à définir le concept de capteur multi-axes.

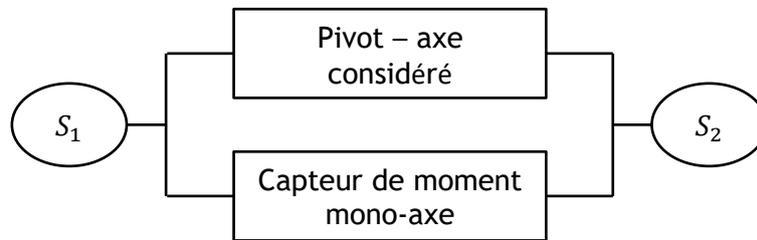


Figure 2 - Association de base d'un capteur de moment mono-axe

Pour concevoir des capteurs multi-axes, l'idée la plus simple est de réaliser une association en série des blocs élémentaires présentés en Figure 1 et Figure 2. À titre d'exemple, le concept d'un capteur tri-axe mesurant les efforts dans trois directions, peut être représenté par le schéma de principe en Figure 3.

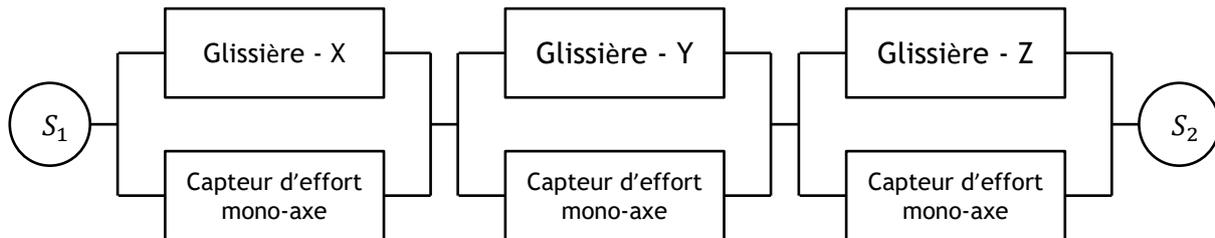


Figure 3 - Exemple d'association en série pour un capteur d'efforts tri-axes

Il est facile de se représenter l'idée d'un capteur avec une association en série en faisant un parallèle avec la robotique. Un bras de robot est souvent une association en série de liaisons élémentaires motorisées de type pivot et glissière. Un capteur avec une structure en série suit le même principe. Là où les liaisons sont motorisées pour un robot en série, elles sont bloquées par le capteur mono-axe correspondant au degré de liberté considéré dans un capteur multi-axes.

Lorsque les chargements se complexifient - au-delà de trois composantes à caractériser - ou que les actions mécaniques à mesurer sont méconnues, des capteurs d'efforts six axes sont requis. Ils permettent de caractériser complètement les composantes d'un torseur d'actions mécaniques s'exerçant sur le corps d'épreuve à savoir trois couples et trois résultantes selon trois directions de l'espace. Il existe plusieurs tailles et géométries différentes suivant le type d'application, le coût étant évidemment fonction de ces paramètres.

Pour ce type de capteur, il est facile de se représenter une structure en série comportant trois liaisons glissières et trois liaisons pivots. De plus, comme expliqué ci-avant, cette solution donne directement accès à chaque quantité d'intérêt dans la mesure où les capteurs mono-axes de la chaîne en série sont indépendants les uns des autres, les directions des efforts/moments mesurés étant orthogonales entre elles. Cette solution, bien que simple à concevoir, possède néanmoins quelques inconvénients. Tout d'abord, il faut pouvoir assurer une certaine rigidité au montage, ce qui contraint la conception des liaisons élémentaires. Ensuite, comme les liaisons sont en série, les erreurs de mesures causées par les jeux et les frottements s'ajoutent au fur et à mesure que l'on remonte la chaîne. Enfin, dans certains systèmes, il faut pouvoir minimiser l'encombrement spatial, ce qui n'est pas chose aisée avec une association en série.

Une autre solution consiste alors à imaginer des structures de capteur avec des liaisons disposées en parallèle plutôt qu'en série. De nombreux capteurs trois axes et six axes utilisent ce principe. Par exemple, pour mesurer trois résultantes selon les trois axes de l'espace entre deux solides, il est possible d'utiliser une structure Delta. En reprenant notre formalisme, le principe du capteur peut être explicité sur la Figure 4.

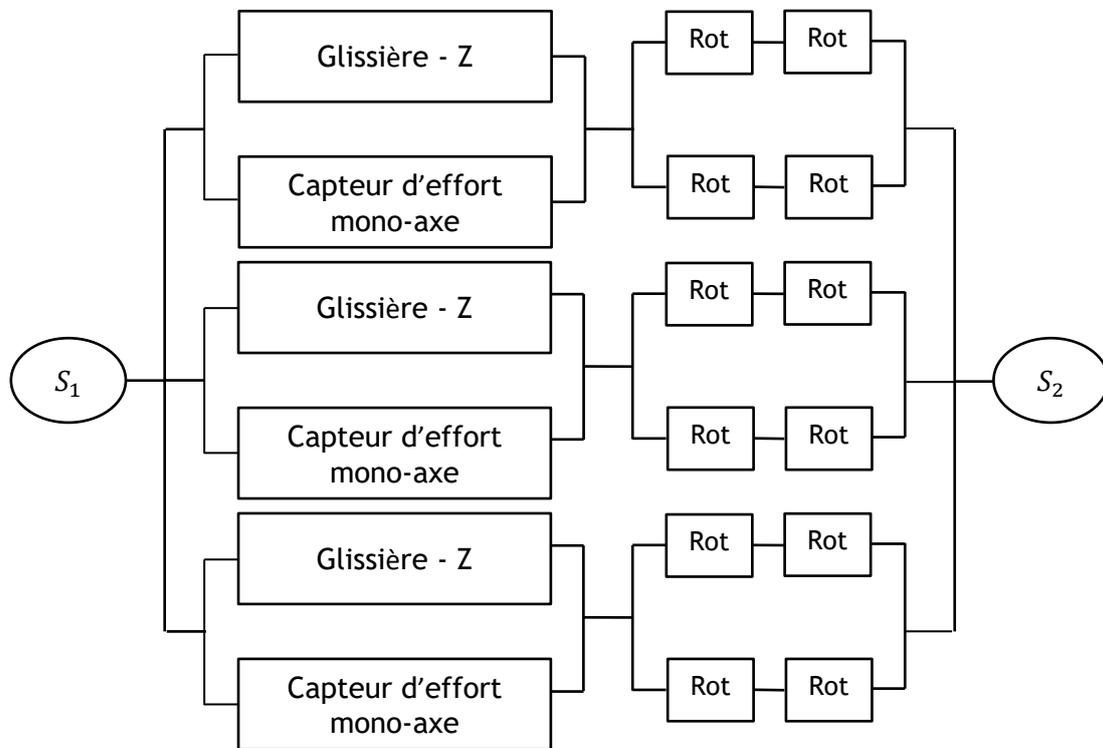


Figure 4 - Exemple d'association de capteurs en parallèle pour réaliser un capteur d'efforts tri-axes basé sur une architecture de type « Delta » ; le terme « Rot » désigne une liaison rotule ; chaque binôme de rotule en série permet de réaliser une bielle, chaque binôme de bielle en parallèle permet de réaliser un parallélogramme déformable

Dans cette configuration, les degrés de liberté ne sont plus indépendants *ie* un chargement exercé par S_1 sur S_2 sera mesuré par l'ensemble des capteurs mono-axes et la valeur de la mesure sera une combinaison linéaire des valeurs retournées par chacun des capteurs mono-axes. L'association en parallèle a l'avantage de posséder une meilleure rigidité par rapport à une association en série. L'encombrement spatial est également moindre mais l'étalonnage plus difficile car les degrés de libertés sont liés.

Suite à ce développement, il est légitime de préciser un point sur la fabrication de ces liaisons élémentaires au sein d'un capteur. Il est impossible d'utiliser des guidages mécaniques standards dans ce type de capteur car cela engendrerait beaucoup de jeux et de frottements qui nuirait à la qualité des mesures. Ainsi, quelle que soit la solution retenue - association en série ou association en parallèle - les constructeurs utilisent généralement des liaisons souples.

Dans l'industrie, le coût des capteurs d'efforts 6 axes varie selon les dimensions, les capacités de charge, et la précision de mesure notamment, et peut atteindre rapidement plusieurs milliers d'euros. Dans le cadre d'applications pédagogique, on peut avoir besoin de cellules de ce type, mais on peut également accepter une précision moindre que dans le cas d'applications industrielles. Le travail présenté dans cet article vise donc à concevoir et réaliser des cellules 6 axes dont le coût ne dépasse pas 150 euros et pouvant être utilisées en enseignement, par exemple, dans le cadre de projets.

Cette ressource présentera donc les différentes étapes de conception et de fabrication de deux cellules 6 axes exploitant la même structure d'hexapode mais présentant des géométries, des choix de conception, et des performances en termes de niveau de chargement différentes.

- Le modèle A (voir Figure 5) a un encombrement de $150\text{mm} \times 170\text{mm} \times 80\text{mm}$ et peut supporter une charge verticale de 70 N environ ;

- Le modèle B (voir Figure 6) a un encombrement de $240\text{mm} \times 280\text{mm} \times 185\text{mm}$ et peut supporter une charge verticale de 260N environ.

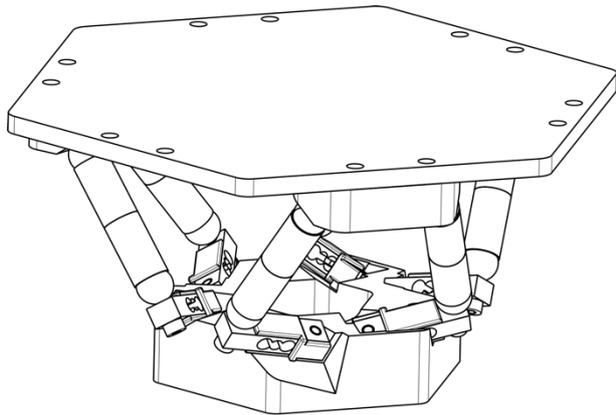


Figure 5 - Vue 3D du modèle A développé

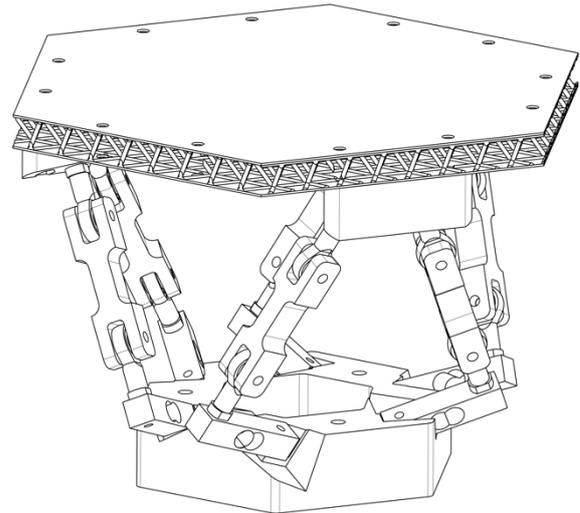


Figure 6 - Vue 3D du modèle B développé

Après avoir présenté le concept et proposé un modèle de comportement, la conception et la réalisation de deux cellules 6 axes à faible coût sont présentées. L'instrumentation et la récupération des données mesurées au moyen d'une carte Arduino sont également détaillées. Enfin, une application à la mesure des actions mécaniques transmissibles par un drone est présentée.

2 – Conception

2.1 - Architecture retenue : hexapode

La géométrie retenue pour les deux capteurs d'efforts six axes à concevoir est celle d'un hexapode. Il s'agit d'une structure parallèle dans laquelle les actions mécaniques imposées au plateau de charge sont transmises à l'embase fixe par l'intermédiaire de 6 bielles bi-rotulées comme montré sur la Figure 7. Chaque bielle est donc sollicitée uniquement en traction-compression et cette sollicitation peut être mesurée par un capteur mono-axe si l'axe de mesure de ce capteur est placé dans l'axe de la bielle.

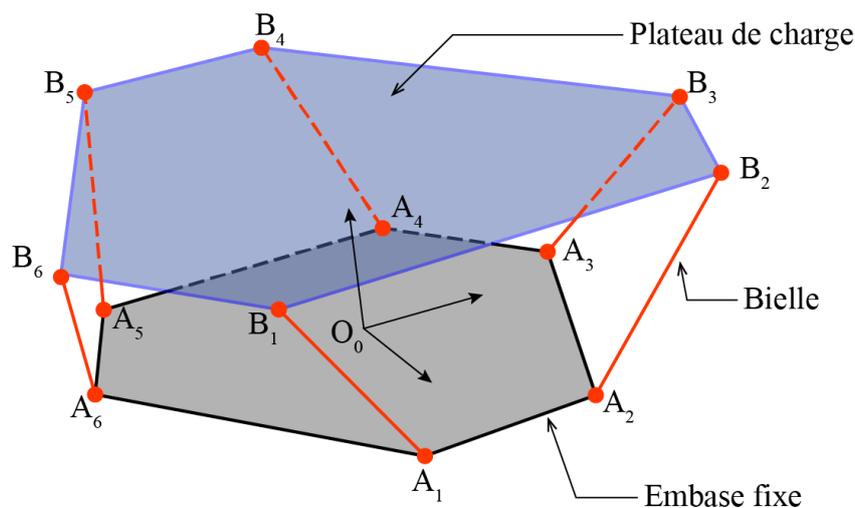


Figure 7 - Modèle filaire représentant l'architecture des cellules 6 axes à concevoir

On rappelle ici que la mesure d'un effort via un capteur mono-axe ne donne pas accès directement à l'une des 6 actions mécaniques appliquées sur le plateau. Il sera nécessaire d'avoir les données des 6 capteurs pour reconstruire la sollicitation imposée au plateau de charge.

2.2 - Dimensionnement de la cellule 6 axes

Le modèle filaire présenté en Figure 7 permet de réaliser un prédimensionnement de la cellule. Pour cela, les dimensions des pièces sont paramétrées de sorte à pouvoir concevoir des cellules de taille et de capacité de charge adaptées à l'usage.

On note A_i pour $i \in \{1..6\}$ les centres des rotules sur l'embase fixe. On note B_i pour $i \in \{1..6\}$ les centres des rotules sur le plateau de chargement. On introduit le centre O_f du cercle sur lequel sont placées les centres des rotules sur l'embase fixe. On introduit le centre O_m du cercle sur lequel sont placées les centres des rotules sur le plateau de chargement. Le paramétrage retenu est alors le suivant :

- Rayon du cercle de centre O_f d'implantation des rotules sur l'embase : r_f ;
- Rayon du cercle de centre O_m d'implantation des rotules sur le plateau de charge : r_m ;
- Angle $\alpha = \frac{1}{2} (\overrightarrow{O_f A_i}, \overrightarrow{O_f A_{i+1}})$;
- Angle $\beta = \frac{1}{2} (\overrightarrow{O_m B_i}, \overrightarrow{O_m B_{i+1}})$;
- Distance h entre les deux plans contenant les points A_i et B_i .

La longueur des bielles permettant d'avoir une hauteur h entre les deux plateaux peut être trouvée en écrivant une des 6 fermetures géométriques :

$$\overrightarrow{O_f A_i} + \overrightarrow{A_i B_i} + \overrightarrow{B_i O_m} = h\vec{z}$$

En isolant dans un membre de l'équation le terme $\overrightarrow{A_i B_i} = L\vec{n}_i$ où \vec{n}_i est la normale unitaire orientant la bielle numéro i dans l'espace, et en prenant la norme on trouve L :

$$L = \sqrt{h^2 + r_f^2 + r_m^2 - 2r_f r_m \sin(\frac{\pi}{6} + \alpha + \beta)}$$

Au passage, on peut exprimer la normale unitaire de chaque bielle à partir de la relation vectorielle précédente puisque :

$$\overrightarrow{A_i B_i} = L\vec{n}_i$$

$$\vec{n}_i = \frac{1}{L} (h\vec{z} - \overrightarrow{B_i O_m} - \overrightarrow{O_f A_i})$$

Une fois que les principales caractéristiques géométriques sont connues, il est important de relier le chargement imposé au plateau de charge aux efforts de traction-compression dans les bielles et perçus par les capteurs qui seront placés en bout.

Pour cela, il suffit d'écrire l'équilibre statique du plateau de charge. Il est soumis à une résultante \vec{R} et à un moment \vec{M} en O_m :

$$\vec{R} = R_x \vec{x} + R_y \vec{y} + R_z \vec{z}$$

$$\vec{M} = M_x \vec{x} + M_y \vec{y} + M_z \vec{z}$$

Ainsi qu'aux efforts de chacune des 6 bielles :

$$\vec{F}_i = F_i \vec{n}_i \text{ pour } i \in \{1..6\}$$

Le principe fondamental de la statique donne alors 2 équations vectorielles, ou 6 équations scalaires après projection dans la base $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$:

$$\vec{R} + \sum_{i=1}^6 F_i \vec{n}_i = \vec{0}$$

$$\vec{M} + \sum_{i=1}^6 \overrightarrow{O_m B_i} \wedge F_i \vec{n}_i = \vec{0}$$

Ainsi, si l'on connaît le chargement appliqué (\vec{R}, \vec{M}) , il faut résoudre un système linéaire pour obtenir les efforts F_i dans les bielles. Il est de la forme :

$$[A]\{F\} = \{Q\}$$

Avec :

$$\{Q\}^T = [R_x \ R_y \ R_z \ M_x \ M_y \ M_z]$$

$$A_{11}L = A_{12}L = r_m \sin\left(\frac{\pi}{6} + \beta\right) - r_f \cos \alpha$$

$$A_{13}L = A_{16}L = r_m \sin\left(\frac{\pi}{6} - \beta\right) + r_f \sin\left(\frac{\pi}{6} - \alpha\right)$$

$$A_{14}L = A_{15}L = -r_m \cos \beta + r_f \sin\left(\frac{\pi}{6} + \alpha\right)$$

$$A_{21}L = -A_{22}L = -r_m \cos\left(\frac{\pi}{6} + \beta\right) + r_f \sin \alpha$$

$$A_{23}L = -A_{26}L = r_m \cos\left(\frac{\pi}{6} - \beta\right) - r_f \sin\left(\frac{\pi}{6} - \alpha\right)$$

$$A_{24}L = -A_{25}L = -r_m \sin \beta + r_f \cos\left(\frac{\pi}{6} + \alpha\right)$$

$$A_{31}L = A_{32}L = A_{33}L = A_{34}L = A_{35}L = A_{36}L = h$$

$$A_{41}L = -A_{42}L = -h r_m \cos\left(\frac{\pi}{6} + \beta\right)$$

$$A_{43}L = -A_{46}L = h r_m \cos\left(\frac{\pi}{6} - \beta\right)$$

$$A_{44}L = -A_{45}L = h r_m \sin \beta$$

$$A_{51}L = A_{52}L = -h r_m \sin\left(\frac{\pi}{6} + \beta\right)$$

$$A_{53}L = A_{56}L = -h r_m \sin\left(\frac{\pi}{6} - \beta\right)$$

$$A_{54}L = A_{55}L = h r_m \cos \beta$$

$$A_{61}L = -A_{62}L = A_{63}L = -A_{64}L = A_{65}L = -A_{66}L = -r_f r_m \cos\left(\frac{\pi}{6} + \alpha + \beta\right)$$

En résolvant le système linéaire, on peut montrer que :

- Un chargement tel que $(\vec{R}, \vec{M}) = (R_z \vec{z}, \vec{0})$ conduit à 6 efforts identiques :

$$F_1 = F_2 = F_3 = F_4 = F_5 = F_6 = \frac{1}{6} \frac{L}{h} R_z$$

- Un chargement tel que $(\vec{R}, \vec{M}) = (\vec{0}, M_z \vec{z})$ conduit à des efforts identiques en norme mais alternés en signe qui ne seront pas explicités ici, les relations étant assez complexes.

Ces relations mises en place permettent de vérifier que le chargement devant être imposé au plateau de charge est compatible avec la charge maximale supportée par les capteurs placés en bout de bielle. Il suffit de se donner le chargement, de résoudre le système linéaire pour une géométrie donnée et de vérifier que :

$$-F_{max} \leq F_i \leq F_{max} \text{ pour } i \in \{1..6\}$$

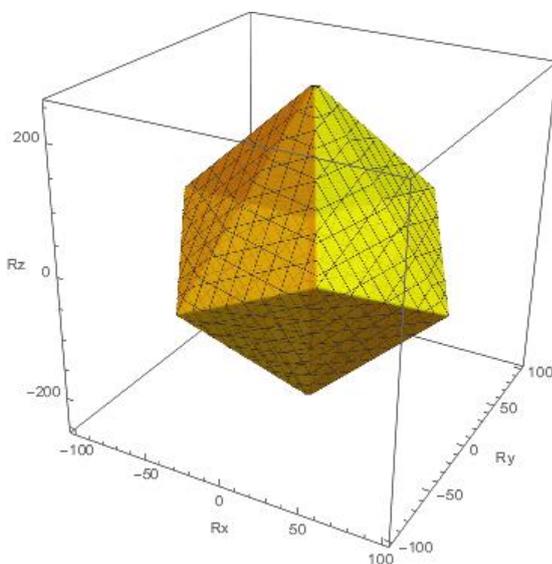
De façon plus systématique, le système étant linéaire, chaque effort F_i est égal à une combinaison linéaire des 6 paramètres de chargement $R_x, R_y, R_z, M_x, M_y, M_z$. Le chargement limite conduisant à un des F_i valant un effort limite F_0 est donc un hyperplan en dimension 6 :

$$F_i = a_i R_x + b_i R_y + c_i R_z + d_i M_x + e_i M_y + f_i M_z = F_0$$

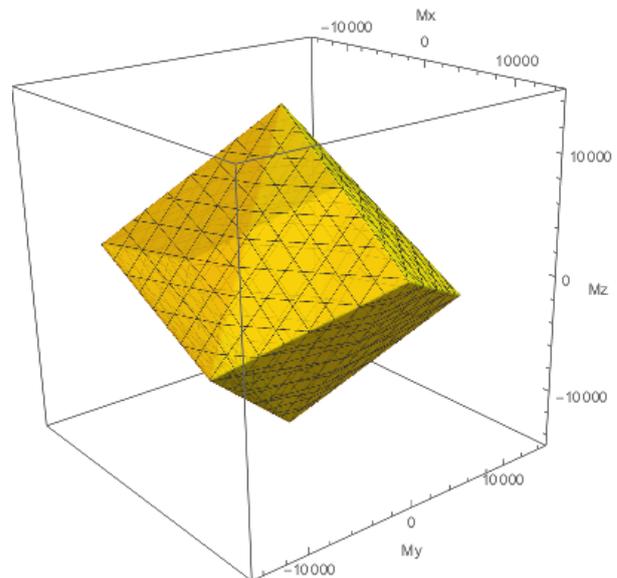
La combinaison des 2 valeurs limites (+ ou - F_{max}) pour les 6 capteurs permet donc de délimiter un espace de chargement possible à partir de 12 hyperplans. La représentation graphique n'étant pas possible en dimension 6, on illustre sur la Figure 8 les espaces de chargements possibles dans deux cas particuliers :

- $\vec{M} = \vec{0}$ et \vec{R} quelconque ;
- $\vec{R} = \vec{0}$ et \vec{M} quelconque.

Les tracés sont réalisés pour les caractéristiques du modèle A : $r_f = 46 \text{ mm}$, $r_m = 60 \text{ mm}$, $\alpha = 21^\circ$, et $\beta = 19^\circ$.



a) Surface lieu des chargements (R_x, R_y, R_z) en N conduisant à une surcharge au niveau d'un capteur pour $(M_x = 0, M_y = 0, M_z = 0)$



b) Surface lieu des chargements (M_x, M_y, M_z) en N.mm conduisant à une surcharge au niveau d'un capteur pour $(R_x = 0, R_y = 0, R_z = 0)$

Figure 8 : Représentation des surfaces de chargement limites dans deux cas particuliers

À l'inverse, si on mesure les efforts F_i , le calcul du chargement (\vec{R}, \vec{M}) est explicite :

$$\vec{R} = - \sum_{i=1}^6 F_i \vec{n}_i$$

$$\vec{M} = - \sum_{i=1}^6 \overrightarrow{O_m B_i} \wedge F_i \vec{n}_i$$

Ces relations permettent d'estimer le chargement appliqué connaissant les efforts supportés par chaque capteur.

Les lois relations analytiques calculées précédemment peuvent également être obtenues numériquement, par exemple avec un modèle éléments finis de la structure : l'embase et le plateau peuvent être modélisés comme des solides rigides reliés par 6 bielles représentées par des éléments de type barre. En imposant un chargement élémentaire sur le plateau, on peut alors obtenir les 6 efforts transitant dans les bielles. En répétant cette opération pour les 6 chargements élémentaires, et puisque le système a un comportement supposé linéaire, on obtient par superposition les relations donnant les 6 efforts en fonction d'un chargement quelconque (\vec{R}, \vec{M}) .

Néanmoins, il faut garder en tête que toutes ces relations, analytiques ou numériques, sont obtenues sous deux hypothèses principales qui peuvent être discutées :

- Géométrie maîtrisée : la géométrie fabriquée n'est pas exempte de défauts, et si la structure se déforme, la géométrie sous charge s'écarte légèrement de la configuration nominale ;
- Bielles sollicitées en traction-compression pure : ce point est discutable en présence de frottement dans les liaisons rotules par exemple.

Ainsi, un étalonnage est souvent nécessaire pour obtenir les lois entrée-sortie des cellules de charge 6 axes. Ce point fera l'objet du paragraphe 3.

2.3 - Conception et réalisation

Les choix à réaliser portent sur :

- Les liaisons rotules permettant de transmettre les efforts dans l'axe de charge des capteurs d'effort ;
- Les bielles ;
- Les capteurs d'effort eux-mêmes ;
- Le plateau de charge sur lequel seront fixées 6 rotules
- L'embase fixe sur laquelle seront fixées les 6 capteurs équipés eux même d'une rotule.

Deux types de liaison rotule ont été utilisés :

- Modèle A : des rotules magnétiques dont l'avantage principal est l'absence de jeu de fonctionnement, mais dont le principal inconvénient est la présence d'un frottement sec important dans la liaison ;
- Modèle B : des rotules mécaniques standard dont l'avantage principal est le faible frottement, mais qui peuvent présenter un léger jeu de fonctionnement.

Les bielles réalisées sont adaptées aux rotules retenues. Dans le modèle A, les bielles sont directement constituées des deux parties femelles des rotules assemblées par une vis sans tête (

9). Dans le modèle B, des bielles ont été imprimées en 3D, en ABS (Figure10).

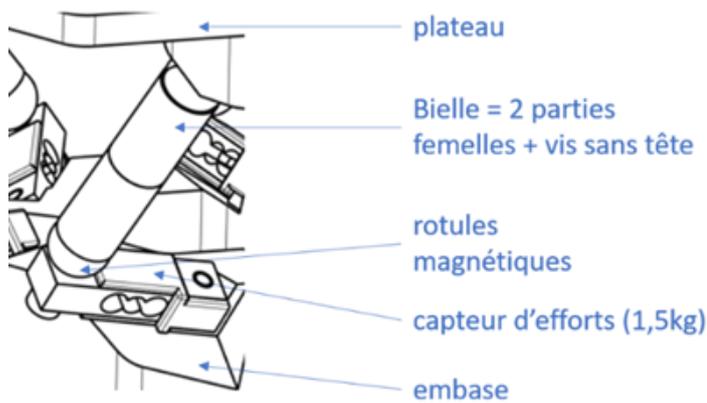


Figure 9 - Réalisation modèle A

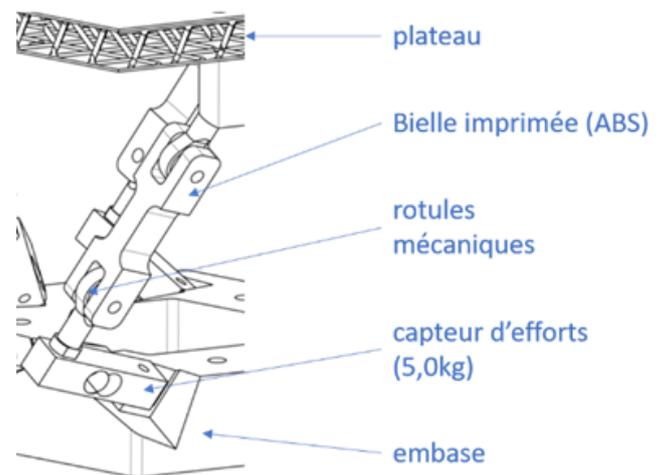


Figure 10 - Réalisation modèle B

Les capteurs mono-axe retenus sont des capteurs à jauges de déformation souvent utilisées pour réaliser des systèmes de pesée. Le principe réside en un corps d'épreuve muni de 4 jauges de déformations montées dans un pont de Wheatstone. Sous charge, les résistances des jauges varient, et le déséquilibre du pont est proportionnellement lié à la charge appliquée. La géométrie du capteur, la présence de 6 jauges et leur positionnement permettent de ne mesurer que la composante souhaitée du chargement. Les capteurs retenus sont de deux géométries :

- Modèle A : capteur de capacité 1.5kg, de dimension 6mm x 8mm x 30mm
- Modèle B : capteur de capacité 5.0kg, de dimension 12.7mm x 12.7mm x 55mm

Pour les deux modèles, l'embase fixe a été conçue à l'aide d'un modeler volumique et en exploitant le modèle filaire paramétré comme squelette. Ainsi il est possible d'orienter correctement les plans d'appui des 6 capteurs d'effort et de définir une géométrie 3D de l'embase adaptée. Celle-ci étant de forme complexe, elle est naturellement réalisée en impression 3D ABS.

Pour le modèle A, le plateau supérieur est découpé au jet d'eau dans une plaque de plexiglas tandis que, pour le modèle B, un plateau en composite sandwich a été fabriqué. Les peaux sont des stratifiés carbone-epoxy et l'âme a été réalisée à partir de l'impression 3D d'un treillis à maille tétraédrique. Dans les deux cas, le plateau est suffisamment rigide pour pouvoir transmettre les efforts et assez peu coûteux si l'on dispose des moyens de production associés. Des pièces d'adaptation permettant de fixer les rotules sur le plateau ont été imprimées en ABS pour les deux modèles.

Une fois les solutions techniques choisies, les pièces ont été imprimées 3D et assemblées avec des vis. La réalisation ne nécessite donc pas d'outils haut de gamme ce qui assure l'aspect « low cost ». Une vue 3D des deux modèles conçus et réalisés sont présentés sur les Figures 5 et **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

2.4 - Mesures des efforts sur chaque axe

Le système d'acquisition est identique pour les deux modèles de cellule et le schéma associé est présenté en Figure 11 : des jauges de déformations sont collées aux corps d'épreuve des capteurs de pesée uni-axiaux et délivrent, par l'intermédiaire de ponts de Wheatstone, des signaux analogiques images du chargement imposé sur le plateau supérieur. Ces signaux sont ensuite amplifiés par des amplificateurs de type HX711 puis traités par un boîtier Arduino relié à un ordinateur. Il y a donc au total, pour chaque cellule de charge, six chaînes d'acquisition identiques et indépendantes composées des sous-systèmes énumérés ci-avant.

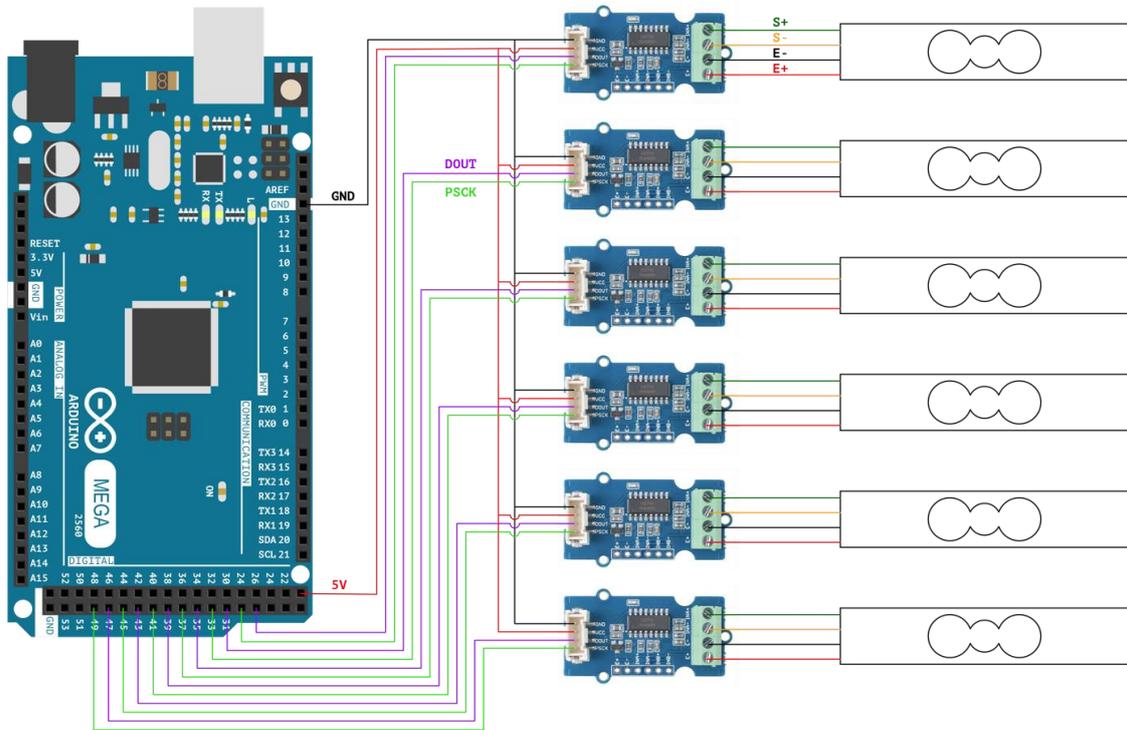


Figure 11 : Schéma de câblage permettant de récupérer les signaux des 6 capteurs d'efforts sur une carte Arduino Mega

Une autre solution pour acquérir les signaux de mesure consiste à utiliser un pont d'extensométrie standard à six voies. Les signaux de sorties sont souvent de meilleure qualité mais il est plus difficile de traiter les données car cela peut nécessiter un relevé manuel ou des amplificateurs interfacés par un logiciel. Ces ponts d'extensométrie sont donc souvent très coûteux ce qui explique le choix de la première solution.

3 – Étalonnage

Le modèle analytique développé au paragraphe 0 repose sur différentes hypothèses. Il est très utile pour dimensionner les composants, mais peut s'avérer trop imprécis lors de l'usage de la cellule de charge du fait, par exemple, des défauts de fabrication. Aussi, il est impératif de déterminer expérimentalement le modèle de comportement de chaque cellule 6 axes. Comme pour le modèle analytique, on suppose que le comportement est linéaire et on cherche à identifier expérimentalement la matrice $[\tilde{A}]$ liant les efforts mesurés au chargement appliqué :

$$\{\tilde{F}\} = [\tilde{A}]\{\tilde{Q}\}$$

où $\{\tilde{F}\}$ représente les efforts mesurés par les 6 capteurs, $\{\tilde{Q}\}$ désigne les chargements appliqués au plateau de charge, et $[\tilde{A}]$ est la matrice d'étalonnage à identifier. Si le modèle analytique est parfaitement cohérent avec les mesures, alors on doit avoir :

$$[A]^{-1} = [\tilde{A}]$$

Une fois cette matrice $[\tilde{A}]$ connue via la procédure d'étalonnage, son inverse donnera accès au chargement appliqué connaissant les 6 efforts mesurés.

Le principe de la procédure d'étalonnage consiste à appliquer N chargements connus et à mesurer les $6N$ efforts correspondants. On obtient alors N vecteurs d'efforts $\{\tilde{F}\}_p$ associés à N vecteurs de

chargements $\{\tilde{Q}\}_p$. Pour identifier les 36 termes de $[\tilde{\mathcal{A}}]$, on cherche à minimiser la fonctionnelle J en prenant comme point de départ $[\tilde{\mathcal{A}}] = [A]^{-1}$:

$$J = \sum_{p=1}^N (\{\tilde{F}\}_p - [\tilde{\mathcal{A}}]\{\tilde{Q}\}_p)^2$$

D'un point de vue pratique, la première étape a été de définir un repère sur le plateau supérieur de chacun des modèles dont l'origine est le centre du plateau (voir Figure 12). Ce repère permet d'exprimer les actions mécaniques exercées sur le plateau.

La seconde étape consiste à appliquer des chargements statiques, d'amplitude et direction connues, sur le plateau supérieur des cellules en des points particuliers. Pour maîtriser pleinement ce chargement, on utilise une masselotte de masse connue, suspendues au bout d'un câble accroché en un point particulier du plateau (voir **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). En utilisant des poulies, on peut modifier l'orientation de l'effort appliqué. En faisant varier point d'application, masse, et position des poulies, on obtient toute une famille de chargements différents.

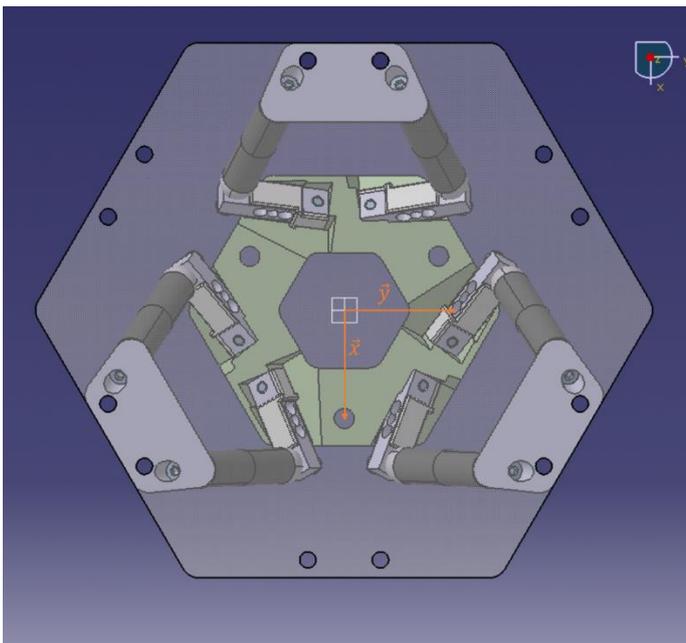


Figure 12 - Repère du modèle A

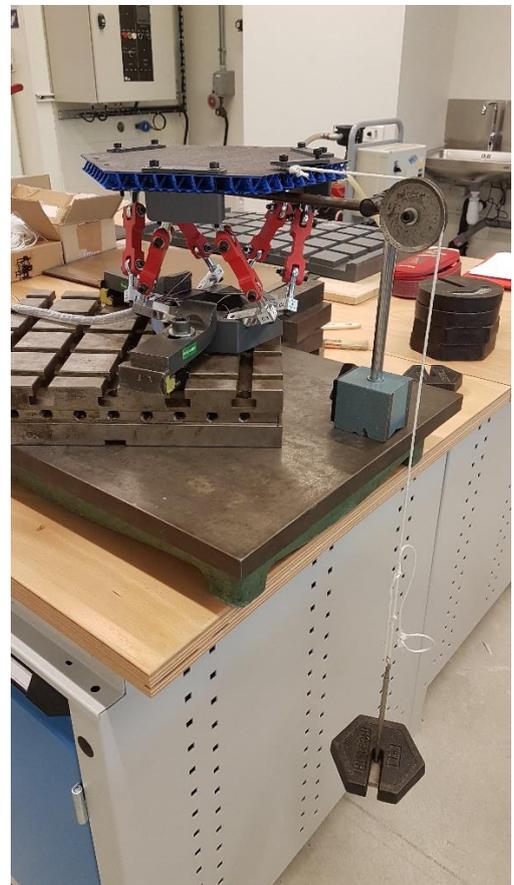


Figure 13 - Exemple d'application d'un glisseur sur le plateau du modèle B à l'aide d'une poulie et d'une corde rigide

4 – Un exemple d'utilisation : mesure des actions mécaniques maximales transmissibles par le drone Snaptain A15

Après avoir étalonné la cellule, nous présentons ici un exemple d'application sur un drone de la marque Snaptain.

Dans l'industrie, les drones sont de plus en plus utilisés, non plus seulement pour effectuer des prises de vues aériennes mais aussi pour interagir avec leur environnement. À titre d'exemple, la société israélienne Tevex a conçu des drones capables de repérer et de cueillir les pommes les plus mûres dans un verger au moyen d'algorithmes d'intelligence artificielle et d'un bras robotisé encastré sur le corps du drone. La géométrie de ces drones a été repensée pour compenser les actions mécaniques que produit le transport d'une pomme par voie aérienne et ainsi maintenir la stabilité du drone. Les projets de ce type nécessitent de connaître les actions mécaniques transmissibles par un drone en plein vol. Ceci est alors possible en utilisant une cellule d'efforts 6 axes telle que celle présentée précédemment.

Le protocole consiste à encastrer un drone sur le plateau supérieur (voir Figure 15) de la cellule d'effort et de le piloter grâce à une télécommande de contrôle. Pour cette opération, nous avons utilisé la modèle A. Le but est d'abord d'imposer au drone une consigne de décollage puis des consignes de translation (horizontale ou verticale) ou de rotation (roulis, tangage ou lacet). Lorsque l'utilisateur envoie ces consignes de déplacement au drone encastré sur le plateau supérieur, celui-ci reçoit l'ordre de translater ou pivoter mais ses mouvements sont bloqués par l'encastrement. Le drone transmet alors au plateau supérieur les couples et les glisseurs qu'il est capable de produire selon ses axes de roulis, tangage ou lacet. D'un point de vue mathématique, cela revient à appliquer un torseur d'action mécanique au centre du plateau supérieur, ce qu'est capable de mesurer la cellule. Un schéma du montage est proposé en Figure 14.

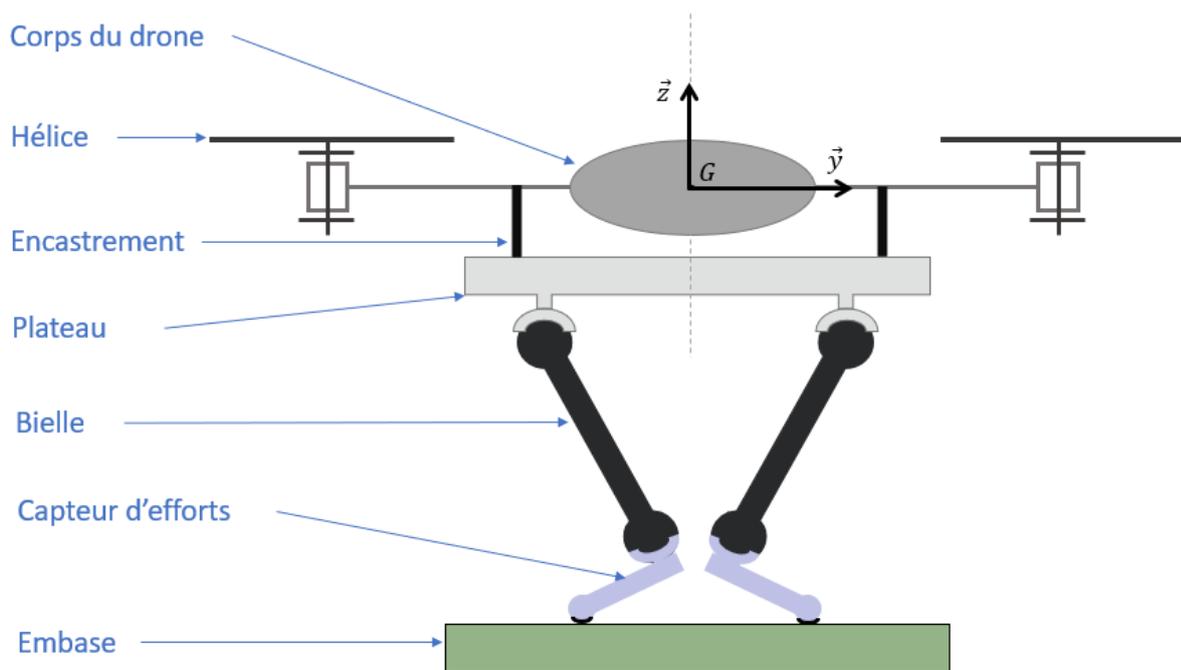


Figure 14 - Schéma du drone encastré sur le plateau supérieur de la cellule A

Le drone $\{D\}$ est soumis aux actions aérodynamiques des rotors (moteurs + hélices), à son poids et à l'encastrement du plateau :

$$\{\tau_{A \rightarrow D}\} = \begin{Bmatrix} -R_x & -M_x \\ -R_y & -M_y \\ -R_z & -M_z \end{Bmatrix}_G \quad \{\tau_{pes \rightarrow D}\} = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -Mg & 0 \end{Bmatrix}_G, \quad \{\tau_{rot \rightarrow D}\} = \begin{Bmatrix} F_x & N_x \\ F_y & N_y \\ F_z & N_z \end{Bmatrix}_G$$

On suppose que ces torseurs s'appliquent au centre de gravité du drone. Cette hypothèse n'est pas tout à fait vraie étant donné que $\{\tau_{A \rightarrow D}\}$ s'applique au centre du plateau. Néanmoins, comme le drone est centré sur le plateau, on considère que le torseur s'applique au centre de gravité du drone. $R_i, i \in \{x, y, z\}$ et $M_i, i \in \{x, y, z\}$ sont les actions mécaniques que mesurent la cellule A.

Le Principe Fondamental de la Statique au point G donne donc :

$$R_x = F_x, \quad R_y = F_y, \quad R_z = F_z - Mg, \quad M_x = N_x, \quad M_y = N_y, \quad M_z = N_z$$

Le plateau permet donc bien de mesurer les actions mécaniques que peut produire le drone lorsque celui-ci est en vol. Il est cependant nécessaire de faire le zéro des capteurs une fois l'encastrement du drone effectué pour s'affranchir du poids.

Pour réaliser un essai, nous allons utiliser un drone de la marque Snaptain et de type A15. Ce drone possède un faible coût et possède une masse faible de 167g, batterie incluse. Au vu de la masse de ce petit drone, l'encastrement a été réalisé avec du simple fil de fer de 1mm de diamètre. Cet encastrement rudimentaire a l'avantage d'être facilement reproductible, démontable, adaptable à d'autres drones de masse faible et possède un coût très faible. Le fil de fer est alors enroulé autour des bras du drone et introduit dans les trous présents sur le plateau supérieur pour relier le drone à ce dernier. Un socle imprimé 3D aurait pu également être conçu et fabriqué pour permettre un meilleur encastrement que celui assuré par le fil de fer. Cependant, il aurait fallu concevoir un socle adaptable à d'autres types de drone, ce qui n'est pas chose aisée.

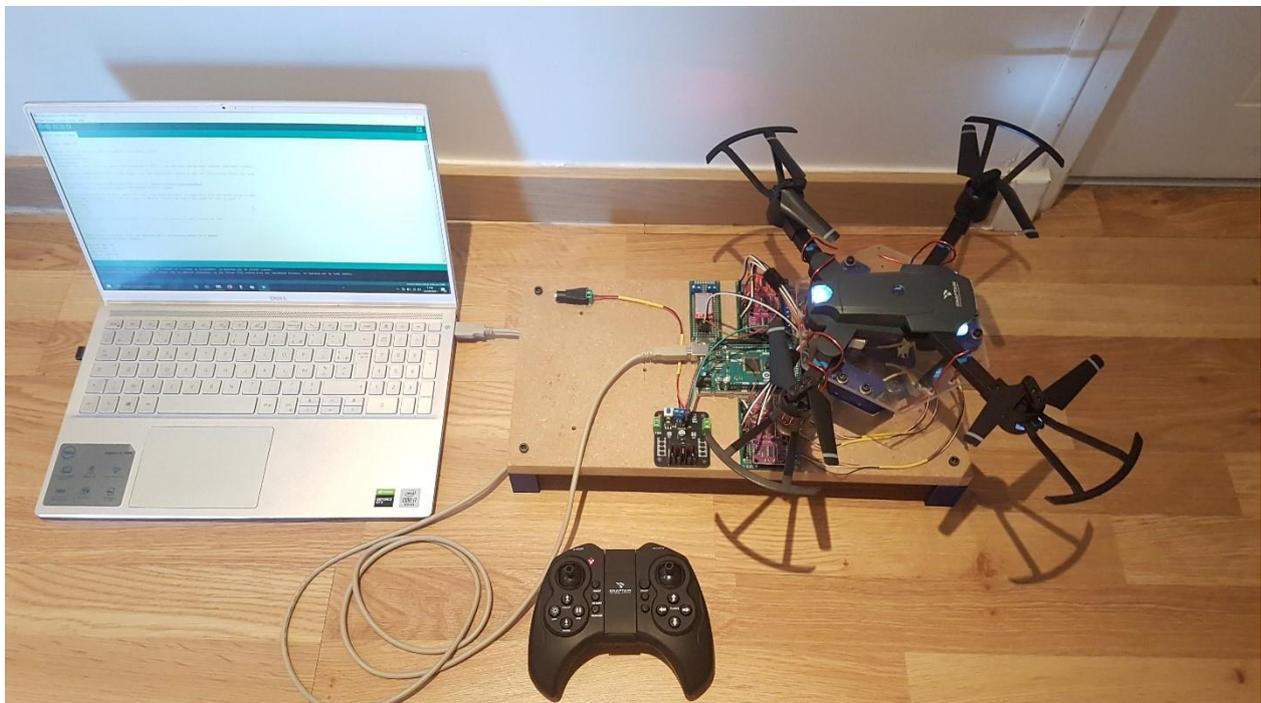


Figure 15 - Dispositif expérimental de mesure des performances d'un drone

Il est également important que le flux d'air généré par les hélices soit perturbé le moins possible par le plateau. Il faut donc choisir les dimensions du plateau de charge en fonction de l'envergure du drone à tester. L'étalonnage de la cellule d'effort a été réalisé en amont de l'essai. Le drone est piloté manuellement via sa télécommande au cours des différents essais réalisés.

Une fois que le drone a été installé sur le plateau, le protocole a été le suivant : relier la cellule d'effort à un ordinateur à l'aide du boîtier Arduino ; effectuer le zéro de la cellule d'efforts pour ne pas prendre en compte le poids du drone dans les mesures ; commander via la télécommande la mise en rotation des hélices du drone ; commander toujours avec la télécommande le décollage de ce dernier ; commander ensuite le déplacement du drone souhaité - translation à droite, à gauche, ascension verticale, etc. - ; relever et interpréter les mesures. À titre d'exemple, la poussée verticale maximale que peut produire le drone Snaptain A15 lors d'une consigne de type échelon est affichée en Figure 17. Les 3 essais ont été réalisés dans des conditions similaires : pièce avec de l'air au repos et batterie chargée au maximum.

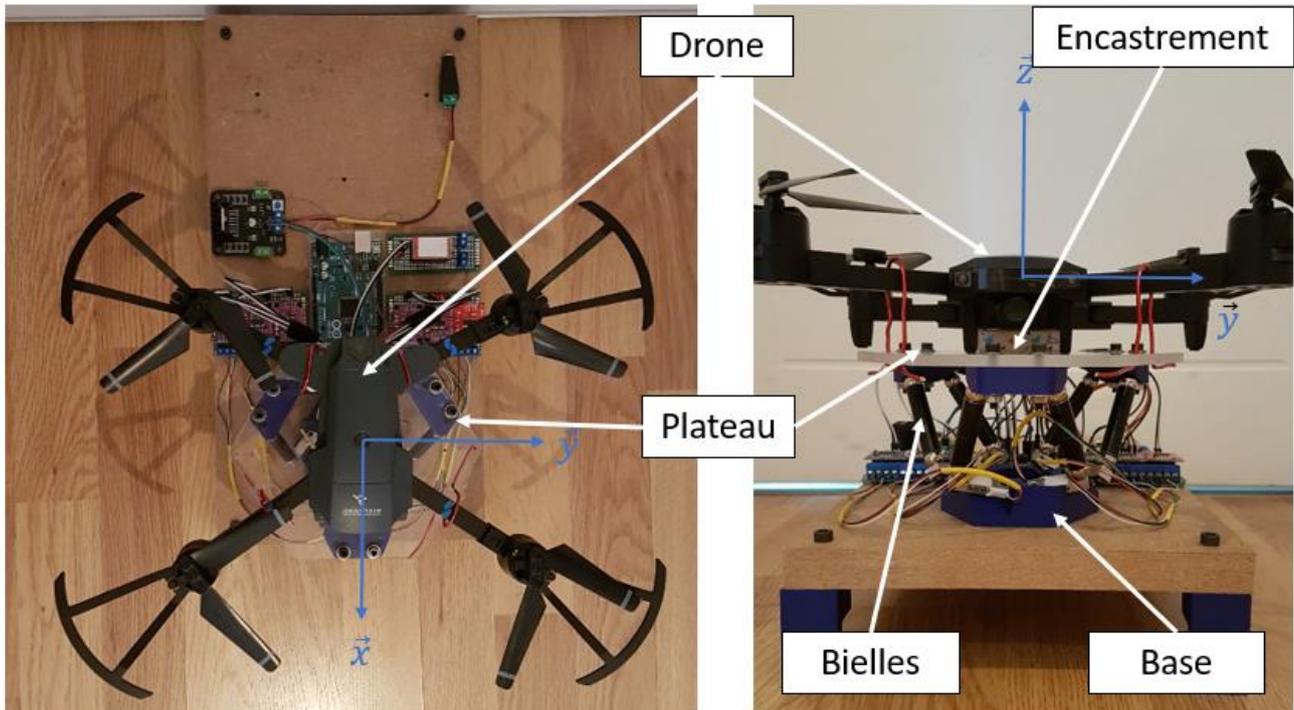


Figure 16 - Encastrement du drone Snaptain A15 sur le plateau supérieur du modèle A

Poussée pure verticale maximale

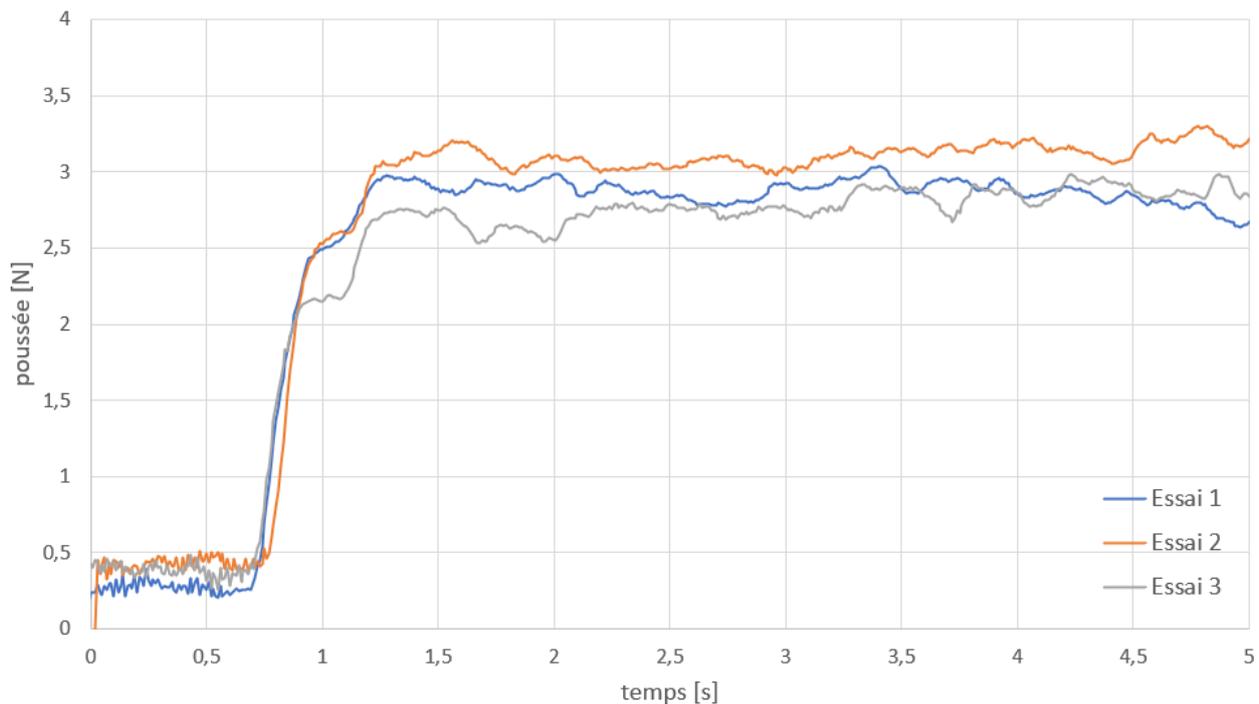


Figure 17 - Variation de la poussée pure verticale produite par le drone A15 lorsque l'utilisateur commande une ascension verticale au maximum des capacités du drone

Sur la figure 17, est représentée la poussée verticale produite par le drone lorsque l'utilisateur commande une ascension verticale au maximum des capacités du drone (joystick de la télécommande en butée). La courbe ainsi obtenue se décompose en deux phases : une première où la poussée mesurée est de 0.4N en moyenne, qui correspond à la mise en rotation des hélices du drone au ralenti ne permettant pas de le faire décoller ; une seconde où la poussée augmente suite à une consigne d'ascension verticale à 0.59s. La poussée se stabilise à 3 N en moyenne ce qui est cohérent par rapport à la masse du drone. On note également une bonne répétabilité des mesures.

Les écarts peuvent s'expliquer par plusieurs facteurs comme notamment la présence de frottements dans les liaisons entraînant une petite hystérésis. Des courbes similaires peuvent évidemment être obtenues pour des consignes en roulis, tangage et lacet. La Figure 16 montre un exemple de courbes pour une consigne en roulis au maximum des capacités du drone.

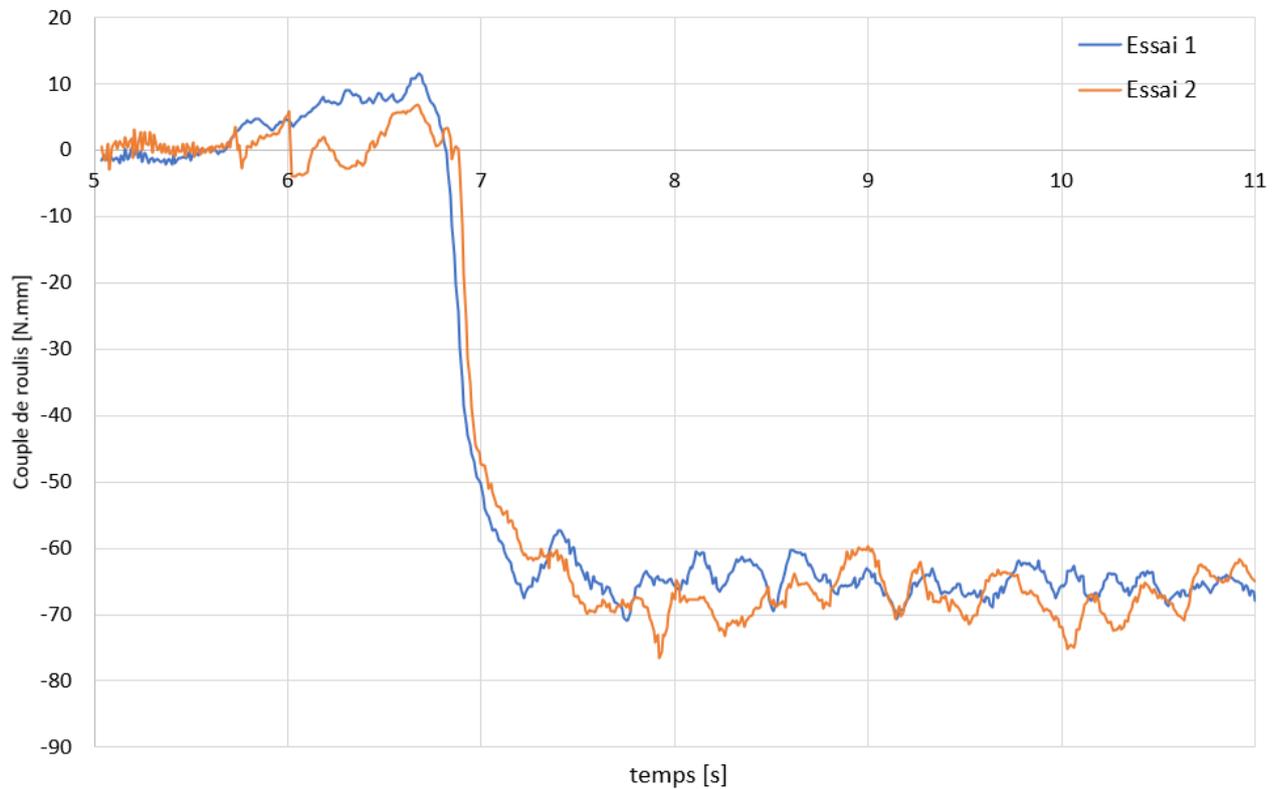


Figure 18 - Couple de roulis maximum que peut produire le drone suite à une consigne en échelon via la télécommande

5 – Conclusions et perspectives d'amélioration d'usage

Cette ressource a permis de développer la conception de deux cellules d'efforts 6 axes à moindre frais. Deux modèles avec des tailles et des solutions techniques différentes ont été proposés tout en maintenant un coût de fabrication inférieur à 150 euros. Dans chacun des cas, il a fallu trouver un compromis entre frottements et jeux des liaisons pour permettre des mesures correctes des efforts appliqués au plateau supérieur. Cette méthode de conception et de fabrication peut être adaptée en fonction du besoin en jouant sur la taille, la nature des liaisons mécaniques ou encore le système d'acquisition du système. Ce type de cellule 6 axes est également rapide à fabriquer (moins d'une semaine) et ne nécessite pas de moyens de production complexes. L'étalonnage est relativement simple et ne nécessite pas de manipulations complexes. À l'avenir, pour complètement valider cette conception, il faudra étudier la répétabilité des mesures ainsi qu'estimer la durée de vie des cellules ainsi construites. Une étude sur les performances dynamiques pourrait également être utile pour en connaître les limites.