

Conception et réalisation d'un dispositif d'échantillonnage d'air à l'aide d'un drone

Ing. A. VANDEKERKOVE
PIERRARD - Virton

Étant donné la place grandissante que prennent les drones dans la société actuelle, un projet européen visant à développer diverses applications avec des drones a été lancé dans la Grande Région. Cet article fait état de la conception et de réalisation d'un dispositif permettant d'effectuer des échantillons au-dessus du sol pour ensuite les analyser en laboratoire.

Mots-clefs : drone, échantillonnage, qualité de l'air

Due to growing space taken by drones in the current society, a European project which aim to develop various applications with drones has been launch by the Greater Region. This article demonstrates the design and implementation of an air-quality-monitoring prototype that can carry on missions above ground level.

Keywords : drone, sampling, air quality

1. Introduction

L'objectif principal du projet est de construire un prototype d'instrument de monitoring de la qualité de l'air effectuant des échantillonnages d'air au-dessus du sol. Ce prototype sera construit pour le compte de l'équipe Sensing of Atmospheres and Monitoring (SAM) de l'Université de Liège - Campus Arlon.

Il y a quelques contraintes de travail qui doivent être prises en compte :

- Le dispositif est destiné à être embarqué sur un drone, il ne doit donc pas être gourmand en puissance, ne pas dépasser trois kilogrammes et être pilotable à distance (déclencher et arrêter le sampling).
- Il doit être capable de réaliser des échantillons de cinq litres minimum à pression proche de la pression atmosphérique (quelques millibars).
- Le dispositif doit fournir à la fin un échantillon pouvant être directement utilisé dans un processus d'analyse chimique pour déterminer sa composition.
- Le dispositif ne doit pas contaminer l'échantillon.
- Le dispositif ne devra pas dépasser la somme de mille euros.

Le livrable est un prototype fonctionnel accompagné de sa documentation complète, ceci incluant :

- Manuel d'utilisation,
- Dessins techniques,
- Plans électriques.

L'objectif de SAM au terme de ce projet est d'effectuer des prestations de services pour des entreprises en combinant l'échantillonnage avec l'analyse en laboratoire pour finalement produire un rapport qui sera délivré au client.

2. Prototype d'échantillonnage

2.1. Contexte

Afin de mener à bien ce projet, l'équipe SAM a fait l'acquisition d'un drone DJI S1000 ayant une masse de 8,2 kg. Ceci inclut le drone, l'électronique embarquée, la batterie et les modifications déjà apportées.

Ce drone doit être équipé d'un dispositif d'échantillonnage qui permettra au drone d'être amené au lieu de prélèvement souhaité, de déclencher et arrêter le système à distance et ensuite de revenir au lieu de décollage.

Usuellement, les échantillonnages au sol se font à l'aide la méthode dite du poumon sous vide. Elle consiste à insérer un sac d'échantillonnage dans un conteneur étanche et de le relier vers le monde extérieur à l'aide d'un tuyau équipé d'une vanne. On effectue ensuite le vide d'air dans le conteneur et on ouvre la vanne reliant le sac vers le monde extérieur. Le sac se gonfle afin de compenser le vide d'air du conteneur. [1]

Cependant cette méthode est peu pratique pour être installée sur un drone. Il existe une autre méthode consistant à remplir directement des sacs en faisant passer l'air par un compresseur. Celle-ci ne requérant donc pas de conteneur, elle est plus adaptée à l'usage avec un drone. C'est celle-ci qui est étudiée.

Concernant le risque de contamination de l'échantillon stipulé dans le cahier des charges, il faut savoir que des matériaux comme le téflon (PTFE) ou l'acier inoxydable ne modifient pas la composition chimique de l'air en contact avec eux. Cependant, lors de plusieurs utilisations du même réseau, des particules peuvent s'attacher lors d'un échantillonnage et se détacher lors d'un autre. Ce phénomène amène donc à une contamination de l'échantillon. Il peut tout de fois être limité en nettoyant le système à l'air propre entre les utilisations.

2.2. Solution étudiée

La solution étudiée pour ce projet consiste en un système d'aspiration directe comme décrit précédemment avec une sortie vers deux sacs d'échantillonnage afin de faciliter l'implémentation sur le drone. Étant donné le remous d'air généré par le drone, il est important d'effectuer l'échantillonnage en dehors de la zone d'influence de celui-ci. Pour ce faire, une tige d'échantillonnage est ajoutée au drone afin de prélever l'air à une distance suffisante du drone.

2.3. Autonomie

L'autonomie d'un drone est un élément critique. Afin de dimensionner au mieux le prototype, il convient de modéliser l'autonomie de manière expérimentale ou à l'aide d'un logiciel afin d'évaluer l'influence de sa propre masse sur le drone.

Faute de pouvoir effectuer des tests d'autonomie, le logiciel E-Calc a été utilisé afin de modéliser l'autonomie du drone. Celui-ci permet, en intégrant les différentes caractéristiques du drone telles que sa masse, sa taille, le type de batterie, le type de moteurs ou le type d'hélice, de simuler l'autonomie du drone.

Le constructeur annonce une autonomie de 15 min pour une quantité de charges absorbées de 15000 mAh et une masse totale en vol de 9,5 kg. Le modèle donne une autonomie de 14 min 36 s pour les mêmes conditions de vol. Loin d'être parfait, le

logiciel donne tout de même une approximation de l'autonomie. Idéalement, des tests d'autonomies devraient être effectués avec le drone afin d'effectuer une corrélation entre le modèle et la réalité.

2.4. Instrument d'échantillonnage

Étude du circuit aéraulique

Le design du circuit aéraulique du prototype est choisi en fonction des besoins du prototype. La configuration choisie est celle d'une seule conduite d'aspiration amenant directement à un compresseur par l'intermédiaire d'un filtre¹. Celui-ci a pour but de protéger le compresseur en retenant les particules d'une taille trop importante, non pertinentes à l'analyse en laboratoire. En sortie, on retrouve un raccord en croix dont une des branches sert au contrôle de la pression² et les deux autres mènent aux deux sacs d'échantillonnage. Ce raccord en croix est assimilé à un raccord en T pour les calculs, car le débit dans une des branches du raccord est nul. Étant donné que le compresseur est placé dans une boîte, trois raccords passe-cloisons sont ajoutés au système (un à l'aspiration et deux au refoulement).

De cette manière, on obtient le design ci-dessous :

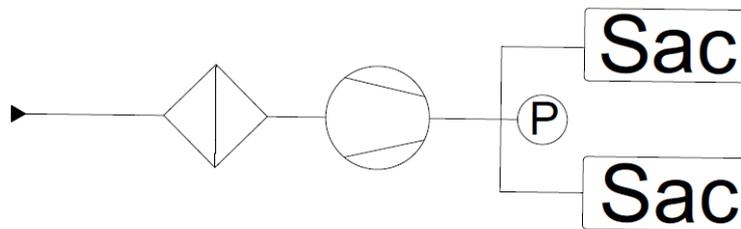


Figure 1 – Schéma de principe du circuit aéraulique

La première étape du dimensionnement a été de calculer l'ensemble des pertes de charge dans le circuit. À ces fins, diverses approximations ont été faites.

Tout d'abord, le fait que les conduites d'aspiration et de refoulement ne soient pas rectilignes a été négligé. En effet, les conduites en dehors de l'instrument sont principalement rectilignes ou ont des rayons de courbure très grands par rapport à leur

¹ Il a été décidé d'utiliser un filtre de 90 μm afin d'empêcher l'intrusion de particules non essentielles tout en minimisant les pertes de charges.

² Afin de contrôler la pression, un capteur de pression différentielle est utilisé. Celui-ci génère une tension en fonction de la différence de pression entre ses deux entrées : ici, l'intérieur du circuit de refoulement et l'atmosphère.

diamètre. Pour ce qui est des conduites à l'intérieur de l'instrument, jusqu'au moment de l'implémentation, la forme qu'elles allaient prendre était inconnue et les calculer aurait mené à de trop grandes incertitudes.

Les pertes de charges dans les raccords d'union droite ou les passe-cloisons ont été négligées, faute de données permettant de les calculer.

La résistance au gonflement du sac a été évaluée expérimentalement, mais pas théoriquement.

Ces calculs ont mené au tableau ci-dessous :

Pertes de charge			
Régulières	Δp_c	<i>mbar</i>	8,54
Aspiration	Δp_{in}	<i>mbar</i>	0,19
Raccord en T	Δp_T	<i>mbar</i>	0,97
Filtre	Δp_{filtre}	<i>mbar</i>	18,55
Gonflement du sac	Δp_{sac}	<i>mbar</i>	4,20
Total	Δp_{tot}	<i>mbar</i>	32,45

Tableau 1 – Calcul des pertes de charge

Choix du compresseur

Afin de pallier les contraintes de matériaux déjà citées précédemment, les compresseurs sont sélectionnés chez KNF. Quatre compresseurs sont choisis tous suffisamment puissants pour vaincre les pertes de charge (voir tableau 2). Ceux-ci sont tous largement surdimensionnés, il n'y a donc aucun problème avec les approximations faites lors du calcul des pertes de charges.

En posant un volume de sac à remplir, et en le divisant par le débit de chaque compresseur, on obtient un temps de remplissage pour chaque compresseur.

En posant une distance à parcourir jusqu'au lieu de prélèvement ainsi qu'une vitesse de déplacement, on obtient un temps de trajet aller-retour. Ici, la distance à parcourir aller-retour est de 600 m à une vitesse de 10 km/h. Ces valeurs ont été choisies en considérant les distances entre les lieux d'échantillonnages et ceux de décollage les plus probables.

Connaissant le temps de remplissage ainsi que le temps de trajet aller-retour, on peut en déduire le temps d'une mission. En divisant ce temps de mission par l'autonomie du drone dans les conditions de masses et de courant absorbé reporté à chaque compresseur, on obtient un nombre de missions avec une seule charge de batterie. Le compresseur idéal est le compresseur qui permet d'effectuer un maximum de mission avec une seule charge de batterie.

Le logiciel E-Calc est uniquement capable d'évaluer des états constants, c'est-à-dire qu'il ne permet d'effectuer des calculs d'autonomie si on actionne le compresseur que pendant un certain temps t . Il ne permet pas non plus d'évaluer l'autonomie en fonction du trajet à vitesse non constante : p. ex. 300 m à 10 km/h puis vol stationnaire pendant 2 min, etc. C'est par conséquent le cas le plus défavorable qui a été pris en compte pour évaluer l'autonomie à savoir une vitesse constante de 10 km/h et le compresseur en fonctionnement constant.

Une autre manière d'effectuer un choix est de calculer l'autonomie du drone en vol stationnaire en fonction de la masse du compresseur, du courant absorbé par celui-ci et de son débit. Il est important de comprendre que le problème ici n'est pas de maximiser l'autonomie du drone, mais bien de minimiser l'énergie nécessaire pour un échantillonnage. Par conséquent, le débit du compresseur est comparé à la consommation électrique du drone en vol stationnaire par minute. On obtient donc une valeur en mAh/l. Le résultat de ce calcul montre que c'est le prototype équipé du plus gros compresseur qui nécessite le moins d'énergie par litre d'échantillon récolté.

C'est finalement le compresseur **KNF NMP 850.1.2 KTDC-B**, qui est choisi.

Compresseurs			NMP 015.1.2	NMP 830	NMP 850	NMP 850.1.2
Caractéristiques			XTDC-B	KTDC	KTDC	KTDC - B
Débit Théorique	Q	<i>l/min</i>	1,4	2,5	3,9	6
Pression maximum	P	<i>bar rel.</i>	0,5	1	2,1	2,4
Masse	m	<i>g</i>	55	195	208	412
Courant maximum	I_max	<i>A</i>	0,22	0,25	0,4	0,49
<i>Première méthode de calcul</i>						
Temps remplissage sac 10 l	t_remp	<i>min</i>	7,7	4,3	2,8	1,8
Autonomie en vol stationnaire	t_vol_stat	<i>min</i>	17,1	16,7	16,6	16,1
Temps de mission total	t_mission	<i>min</i>	11,3	7,9	6,4	5,4
Nombre de missions avec une charge complète	N_mission	-	1,4	2,0	2,5	2,8
<i>Deuxième méthode de calcul</i>						
Consommation du drone par minute	C_min	<i>mAh/min</i>	1094	1120	1127	1161
Volume échantillonné sur une charge complète	V_sample	<i>l</i>	23,94	41,75	64,74	96,6
Consommation du drone par litre d'échantillon	C_l	<i>mAh/l</i>	781,12	447,90	288,85	193,58

Tableau 2 – Liste des compresseurs sélectionnés

Montage de l'instrument d'échantillonnage

Une fois tous les éléments du circuit aéraulique dimensionnés et commandés, ceux-ci peuvent être assemblés dans le boîtier prévu à cet effet.

L'ensemble du circuit aéraulique est composé de tuyaux en téflon raccordés entre eux par l'intermédiaire de raccords en acier inoxydable. Finalement, les raccords en inox sont sertis sur les tubes en PTFE simplement en les serrant.

La figure 2 montre l'organisation des différents composants dans le boîtier. On a :

1. L'arrivée d'air dans l'instrument,
2. Le filtre de 90 μm ,

3. L'entrée du compresseur,
4. La sortie du compresseur,
5. Le raccord en croix avec, à gauche, la sortie vers le capteur de pression différentielle et, en haut et en bas, les sorties vers les sacs.

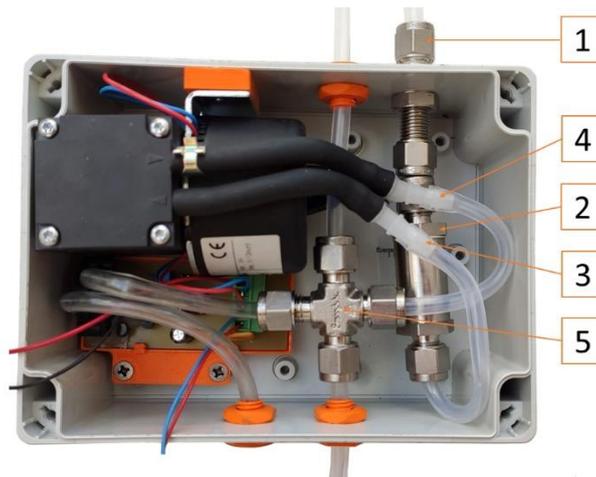


Figure 2 – Vue supérieure de l'instrument assemblé

Afin de placer tous les éléments nécessaires dans le boîtier et étant donnée sa petite taille, l'ensemble des éléments permettant sont aménagement ont été réalisé sur mesure. La plupart d'entre eux ont été imprimés en 3D. Par exemple, une cale permettant la fixation du compresseur au boîtier (figure 3), des raccords passe-cloison (voir figure 4) ou encore un support pour maintenir le circuit imprimé de commande du compresseur.

La figure 3 illustre le montage de la cale avec :

1. Le compresseur,
2. La cale d'épaisseur,
3. Les écrous M3 permettant de solidariser le compresseur et le boîtier,
4. Les vis M3*10 permettant de fixer la cale au compresseur,
5. Les vis M3*10 permettant de solidariser le compresseur et le boîtier.

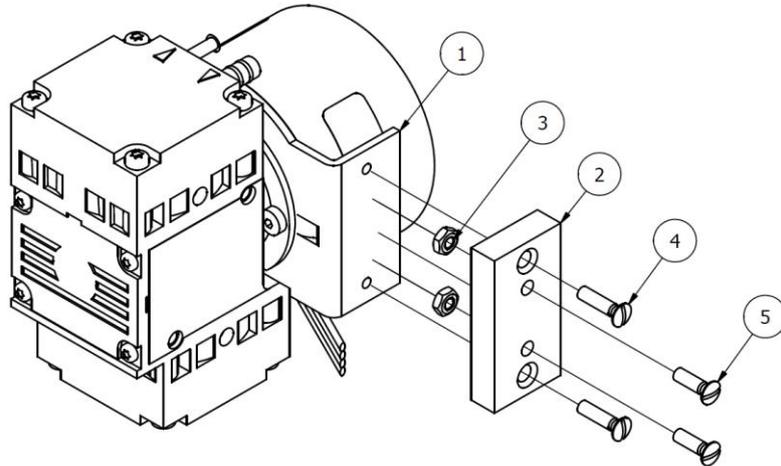


Figure 3 – Montage de la cale sur le compresseur

Un ensemble vis-écrou imprimé en 3D pèse 2 g, contre 30 g pour ceux en acier inoxydable. Par conséquent, dans une application où le poids compte, on effectue aisément une économie de $2 \times 28 \text{ g} = 56 \text{ g}$.

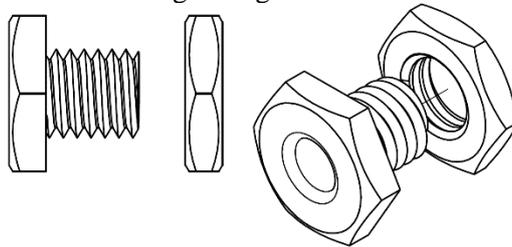


Figure 4 – Vis et écrou passe-cloison

Commande du système

Afin de piloter le système à distance, un des potentiomètres inutilisés de la télécommande du drone a été assignée à une sortie auxiliaire PWM³ de l'Autopilot du drone. En faisant varier la valeur du potentiomètre, on fait varier le rapport cyclique du signal PWM entre 0 et 100 %, ce qui doit permettre de contrôler le compresseur.

Lors d'une mission, le drone étant à une certaine distance du pilote, il n'est pas aisé d'évaluer si le sac est suffisamment gonflé ou non. Le compresseur ayant une pression de refoulement de 0,49 bar, il est tout à fait capable de surgonfler les sacs jusqu'à éclatement de ceux-ci. Afin d'éviter cela, il est utile d'évaluer le niveau de gonflement du sac et d'arrêter le compresseur une fois une valeur limite atteinte. À cette

³ Pulse-Width Modulation ou Modulation de Largeur d'Impulsion en français

fin, un capteur de pression différentielle est utilisé afin de mesurer la différence de pression entre l'air ambiant et le refoulement du compresseur.

La mise en marche ainsi que l'arrêt du compresseur sont contrôlés par un microcontrôleur. Celui-ci a deux fonctions :

1. Recevoir le signal PWM venant de l'Autopilote et renvoyer un signal PWM au compresseur
2. Interrompre le fonctionnement du compresseur une fois que la pression différentielle entre le milieu extérieur et l'intérieur des sacs devient trop importante.

2.5. Système d'aspiration et d'accroche des sacs

Le prototype étant réalisé, la dernière étape de la conception est de fixer les sacs d'échantillonnage au drone, ainsi que la tige permettant de prélever l'échantillon à distance.

Ce système doit être constitué d'une tige d'échantillonnage, de deux organes de fixation de sacs et de deux organes de sécurisation des sacs afin qu'ils ne soient pas un risque pour le bon déroulement du vol (mouvements avec le vent, chocs avec les hélices...).

Support

Afin de placer les différents éléments cités précédemment, un support est nécessaire pour faire office de base au système. Ce support a trois fonctions :

1. Supporter la tige d'échantillonnage
2. Solidariser tous les éléments cités précédemment et le drone
3. Supporter le système de fixation des sacs

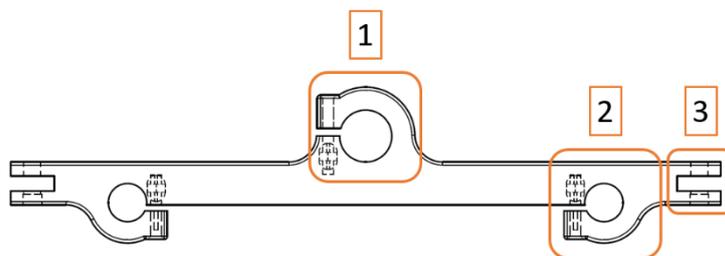


Figure 5 – Support

Le support conçu est visible à la figure ci-dessous et remplit bien les trois fonctions susnommées. La canne d'échantillonnage se glisse dans l'alésage supérieur du support (point 1 de la figure 5). La partie n°2 permet d'attacher le support au drone. La

partie 3 du support permet l'accroche des crochets de fixation des sacs. Le système d'accroche est un système de tenon-rainure carré. Le fait que le tenon et la rainure aient leur hauteur égale à leur largeur permet de les assembler droit ou à angle droit comme on peut le voir à la figure ci-dessous. Les deux raccords sont tenus ensemble grâce à une vis à tête ronde et à collet carré et une vis "papillon", et ce afin de minimiser le besoin d'outils supplémentaires à emporter en mission. Le collet carré s'insère dans l'épaulement carré prévu comme on peut le voir à la figure ci-après.

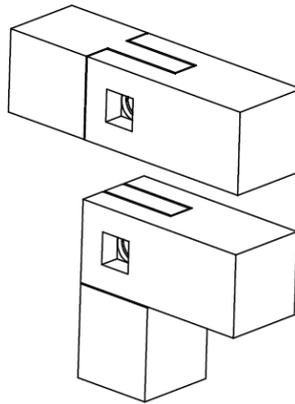


Figure 6 – Assemblage droit et en angle

Tige d'échantillonnage

La tige d'échantillonnage, comme déjà expliqué précédemment, permet de récupérer l'air en dehors de la zone de turbulence générée par le drone, mais également de supporter l'arc de sécurisation des sacs.

Afin d'éviter de contaminer l'échantillon, les deux matériaux disponibles sont l'acier inoxydable et le téflon. Or le téflon n'est pas assez rigide pour récupérer un échantillon à une grande distance du centre du drone et l'acier inoxydable, quant à lui, est lourd.

Il a donc été décidé d'utiliser une tige télescopique en fibre de verre et d'y insérer un tuyau en téflon. En position repliée, la tige mesure 58 cm de long. La boîte de rangement du drone mesure environ 60 cm à l'intérieur. En conséquence, si la tige est fixée de manière adéquate au drone, il n'est pas nécessaire de la retirer après chaque utilisation : il faut simplement la replier.

Cette tige permet d'effectuer le prélèvement à près de 70 cm de l'extrémité des hélices du drone, ce qui permet normalement d'échapper aux turbulences du drone.

Fixation des sacs d'échantillonnage

Les sacs d'échantillonnage utilisés par l'équipe SAM sont des sacs confectionnés directement en laboratoire à partir d'un rouleau de plastique tubulaire coupé à la longueur souhaitée en fonction du volume d'échantillonnage requis. Ils peuvent donc varier en longueur, mais également en diamètre. Ils ont cependant une particularité commune, à savoir le système de remplissage : il s'agit d'une tige en inox de 10 cm environ, avec un raccord à visser à son extrémité. Cette tige peut aisément être insérée dans un crochet afin d'être maintenue.

Cependant, étant donné que tous les sacs n'ont pas le même diamètre, le sac doit être plus ou moins éloigné du drone en fonction de la taille du sac. De la même manière, étant donné que les sacs n'ont pas tous la même longueur, le support doit être plus ou moins long pour accueillir le crochet et ainsi centrer le sac sur le drone.

À ces fins, une rallonge pour le support a été conçue, ainsi que deux types de crochets. Le petit crochet n'est requis que pour les très petits sacs. En effet, à partir d'un certain volume, le sac se gonfle jusqu'à son diamètre nominal. Lorsque le sac est petit, la manière dont il est conçu l'empêche d'atteindre son diamètre nominal. La figure ci-dessous montre les deux crochets, ainsi que le loquet de maintien et la goupille qui empêche le loquet de s'ouvrir.



Figure 7 – Crochets de fixation des sacs

La figure 8 illustre le montage du crochet dans la configuration "Grand sac". Si le volume d'échantillon requis est faible, il suffit alors de ne pas mettre la rallonge et de directement placer le plus petit crochet.

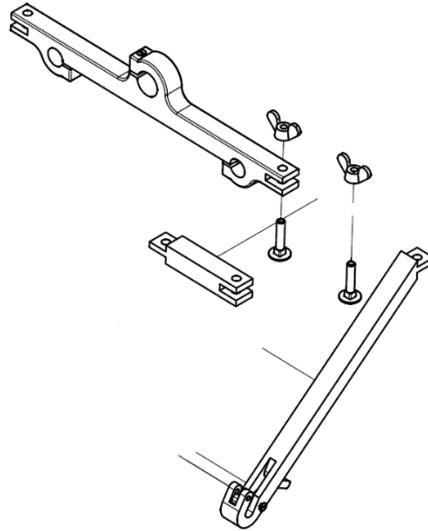


Figure 8 – Crochet de fixation configuration "Grand sac"

Sécurisation des sacs d'échantillonnage

Les arceaux de sécurisation ont pour objectif d'empêcher les sacs de déséquilibrer le drone, mais également d'empêcher les sacs d'entrer en collision avec les hélices ou autres parties critiques au vol.

Cet arceau de protection doit être réglable en diamètre en fonction de la taille de sac que l'on utilise. Par conséquent, l'arceau est composé d'une partie rigide et fixe, et d'une autre partie composée de plastique souple qui est maintenue dans l'arc rigide et ceinture le sac. C'est cette partie qui est réglable. La figure 9 montre le système de fixation de l'arc à la tige d'échantillonnage, l'arc de maintien de l'arceau, ainsi que le système qui permet de changer la taille de celui-ci. On peut y voir que l'arc de maintien et la partie fixant le système à la tige sont deux pièces distinctes.

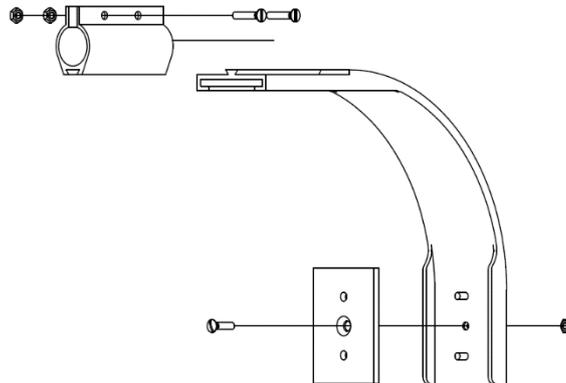


Figure 9 – Arc de sécurisation des sacs

Suite à cet assemblage, l'arceau en plastique souple s'insère dans l'arc et est ajusté en fonction du diamètre désiré. La figure ci-après montre la taille maximale et minimale que peut prendre l'arceau :

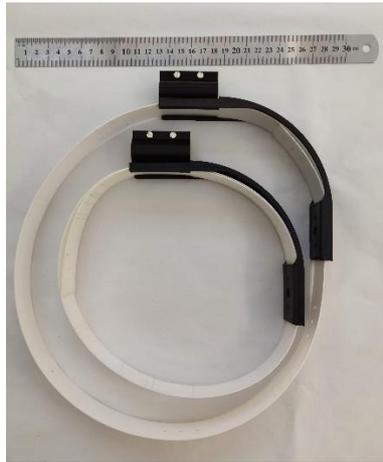


Figure 10 – Taille maximale et minimale des arceaux

Implémentation générale sur le drone

Une fois l'ensemble des éléments conçus et réalisés, ils sont assemblés sur le drone. Les figures 11 à 13 montrent l'assemblage de tous les éléments cités précédemment en dehors et sur le drone.

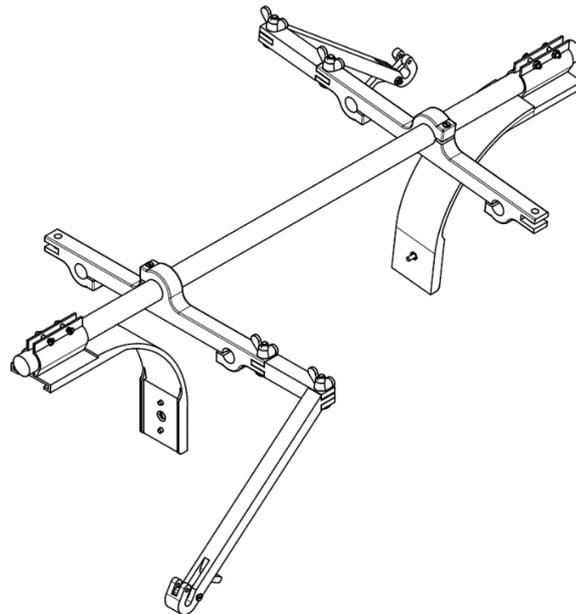


Figure 11 – Implémentation finale du prototype sur le drone

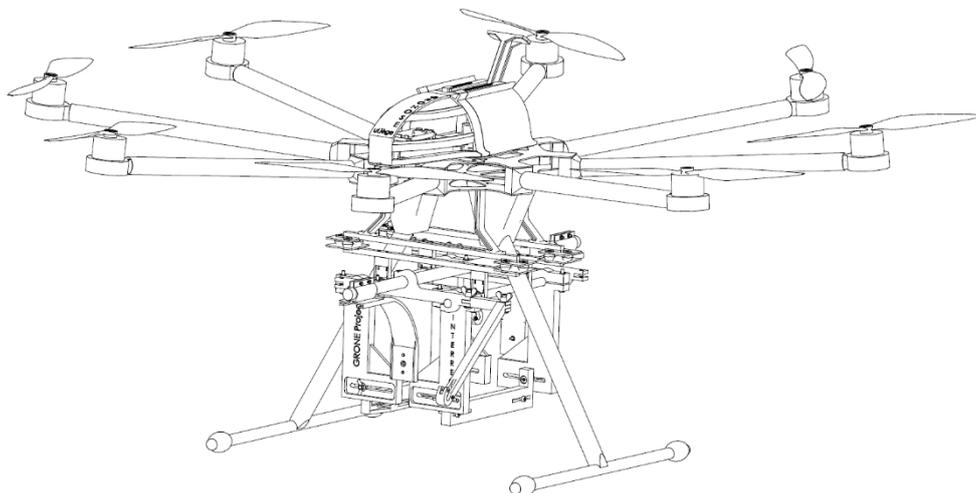


Figure 12 - Mise en place du système sur le drone



Figure 13 – Implémentation finale sur le drone

Le prototype, dans sa configuration maximum, c'est à dire en embarquant deux sacs de 10 l, pèse 1,539 kg soit 51,3% du poids limite fixée par le cahier des charges.

D'un point de vue financier, le cahier des charges est également respecté avec un coût total du prototype de 586,21 €, soit 58,6% du budget prévu.

3. Conclusion

Le développement du prototype a été poussé le plus loin possible, compte tenu de la situation en Belgique en 2020 (Covid-19).

Le projet est à présent terminé et fonctionnel. Les différents points du cahier des charges qui ont pu être vérifiés, montrent que le prototype répond aux différentes contraintes. En effet :

- Le prototype est bien destiné à être embarqué sur un drone et il pèse 1,539 kg soit 51,3% du poids limite fixée par le cahier des charges.
- Le prototype est tout à fait capable de fournir des échantillons de cinq litres minimum car il est capable d'emporter deux sacs de dix litres
- Le prototype fournit un échantillon pouvant être directement utilisé dans un processus d'analyse chimique pour déterminer sa composition.
- Le prototype coûte 586,21 €, soit 58,6% du budget prévu..

Il reste deux points du cahier des charges qui n'ont pas été vérifiés.

Premièrement, le prototype doit être commandable à distance. Le nécessaire a été fait au niveau de l'Autopilot et de la télécommande afin que ce soit le cas. Cependant, il n'a pas été possible de confirmer le bon fonctionnement de ce qui a été fait.

Deuxièmement, le prototype doit être capable de récolter un échantillon sans le contaminer. Une fois encore, le prototype a été conçu en suivant les recommandations des chercheurs en termes de matériaux, mais aucun test n'a été fait afin de prouver la capacité du prototype.

Finalement, l'étape suivante du développement du prototype est d'entrer dans une phase de test afin d'améliorer le prototype. Divers réglages, tant mécaniques que logiciels (PID) devront être réalisés sur le drone.

4. Sources

- [1] ROMAIN, ANNE-CLAUDE, *Techniques de mesure des polluants gazeux*, Arlon, Belgique : Université de Liège, 2018, 60p.