

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

DÉVELOPPEMENT D'ÉCHANTILLONEURS D'AIR MINIATURISÉS ET
EMBARQUÉS SUR DES OISEAUX POUR LA CARACTÉRISATION DE LEUR
EXPOSITION À DES NOUVEAUX CONTAMINANTS

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR
ALI REZAEI

NOV 2016

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.07-2011). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

DEVELOPMENT OF A MINIATURIZED PASSIVE AIR SAMPLER TO
CHARACTERIZE THE EXPOSURE OF EMERGING CONTAMINANTS IN BIRDS

MASTER THESIS
PRESENTED
AS A PARTIAL REQUIREMENT
OF THE MASTER'S DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING

By
ALI REZAEI

NOVEMBER 2016

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, Pr Ricardo Izquierdo, ainsi que mon codirecteur, Pr Jonathan Verreault pour leurs conseils et leurs suggestions qui m'ont été utiles durant tout mon mémoire.

Je remercie aussi madame Manon Sorais, Dr Sujittra Poorahong et monsieur Mojtaba Mirzaei, Alexandre Robichaud, ainsi que les organisations suivantes pour leurs soutiens : UQAM, CoFaMic, TOXEN, AVITOX, RESMIQ, la Chaire de recherche du Canada, et le Fond de recherche nature et technologies.

Finalement, je tiens à remercier ma femme et ma mère, qui m'ont soutenu tout au long de ce périple, du début à la fin, des meilleurs moments aux plus difficiles

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	xi
LISTE DES TABLEAUX.....	xv
RÉSUMÉ.....	xvii
ABSTRACT.....	xix
CHAPITRE I.....	1
INTRODUCTION.....	1
1.1 Description de projet.....	1
1.2 Échantillonnage d'air passif et actif.....	3
1.2.1 Échantillonnage d'air passif.....	4
1.2.2 Échantillonneurs d'air actifs.....	9
1.3 Problématique et objectifs.....	11
1.4 Méthodologie.....	13
1.5 Plan de présentation de la thèse.....	14
CHAPITRE II.....	17
CONCEPTS ET SIMULATIONS D'ÉCHANTILLONNAGE D'AIR PASSIF.....	17
2.1 Concept 1.....	20
2.1.1 Modèle 1.....	20
2.1.2 Simulation de la conception 1.....	21
2.2 Concept 2.....	25
2.2.1 Modèle 2.....	25
2.2.2 Simulation de la conception 2.....	26
2.3 Concept 3.....	29
2.3.1 Modèle 3.....	29
2.3.2 Simulation de la conception 3.....	31
2.4 Concept 4.....	34

2.4.1	Modèle 4	34
2.4.2	Simulation de la conception 4.....	37
2.5	Concept 5	40
2.5.1	Modèle 5	40
2.5.1.1	Modèle 5-1.....	40
2.5.1.2	Modèle 5-2.....	44
2.5.2	Simulation de la conception 5.....	46
2.6	Concept 6	50
2.6.1	Modèle 6	50
2.6.2	Simulation de la conception 6.....	55
2.7	PAS comparaison and sélection	59
2.7.1	Les valeurs de traînée des PAS	59
2.7.2	Comparaison des PAS et procédure de sélection.....	61
2.8	Résumé.....	65
CHAPITRE III		66
FABRICATION ET ESSAIS PASSIFS DE L'ÉCHANTILLON		66
3.1	Fabrication du PAS	66
3.2	Adsorbants.....	69
3.2.1	Mousse de polyurethane.....	69
3.2.2	Filtre en fibre de verre (FFV).....	71
3.2.3	Polydimethylsiloxane (PDMS)	71
3.2.4	Oxyde de graphène	73
3.3	PAS tests sur site.....	73
3.4	Résumé.....	76
CHAPITRE IV		79
CIRCUIT EMBARQUÉ		79
4.1	Les capteurs et leur utilisation.....	79
4.2	Circuit électronique de mesure de vitesse anémométrique	86
4.3	Modèle de conception PAS (modifié pour le capteur embarqué)	91
4.4	Simulation	95

4.5 Validation et étalonnage du capteur	100
RÉSUMÉ ET DISCUSSION	106
CONCLUSION	109
Références	111

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Test de feu sur papier avec et sans retardateur de flamme.....	2
Figure 1.2 : Oiseaux volant autour d'une décharge et à la recherche de nourriture.....	3
Figure 1.3 : Schéma d'échantillonneur d'air passif habituel avec un échantillon à l'intérieur	5
Figure 1.4: Schéma d'échantillonneur d'air passif habituel avec deux échantillons de mili...	6
Figure 1.5 : Un échantillonneur d'air passif real pendant le processus d'échantillonnage	6
Figure 1.6 : Un casque utilisé comme échantillonneur d'air passif avec un milieu de).....	7
Figure 1.7 : Échantillonneur à écoulement continu.....	8
Figure 1.8 : Échantillonneur d'air actif.....	10
Figure 2.1: premier concept PAS.	21
Figure 2.2: Vue 3D de la conception 1. (a) Vue de dessous 3D. (b) Vue de dessus	21
Figure 2.3: Maille non structurelle sur la conception 1 - vue de côté	23
Figure 2.4: Conception 1 résultat du flux d'air vectoriel sur PAS, vue latérale	23
Figure 2.5: Conception 1 résultat de flux d'air vectoriel sur PAS, vue de dessus	24
Figure 2.6: Conception 1 résultat du flux d'air vectoriel, vue de dessus	24
Figure 2.7: Deuxième concept PAS	26
Figure 2.8: Vue 3D deuxième concept PAS. (a) Vue de dessous. (b) Vue de dessus.....	26
Figure 2.9: Volume Tetra angle maille non structurelle sur la conception 2, vue de dessus	27
Figure 2.10: Résultat du flux d'air vectoriel Design 2, vue de dessus.....	28
Figure 2.11: Résultat du flux d'air vectoriel Design 2, vue latérale 3D, structure PAS.....	28
Figure 2.12: Résultat de flux d'air vectoriel Design 2, vue de dessus 3D, structure PAS....	29
Figure 2.13: troisième concept PAS.....	30
Figure 2.14: Vue 3D troisième concept PAS. (a) Vue de dessous. (b) Vue de dessus	31
Figure 2.15: Volume Tetra angle maille non structurelle sur la conception 3 - vue de côté	32
Figure 2.16: Conception 3 résultat de flux d'air vectoriel, vue de côté	32

Figure 2.17: Résultat du flux d'air vectoriel concept 3, vue de dessus.....	33
Figure 2.18: Résultat du flux d'air vectoriel Design 3, vue 3D	33
Figure 2.19: quatrième partie de conception PAS	35
Figure 2.20: Vue 3D concept 4 PAS	35
Figure 2.21: quatrième partie supérieure de conception PAS	36
Figure 2.22: Partie supérieure vue 3D PAS conception 4	36
Figure 2.23: quatrième concept design pièces de positionnement en vue 3	37
Figure 2.24: Volume Tetra angle maille non structurelle sur la conception 4, vue de côté .	38
Figure 2.25: Conception 4 résultat du flux d'air vectoriel, vue de côté.....	39
Figure 2.26: Conception 4 résultat du flux d'air vectoriel, vue 3D, corps PAS inclus.....	39
Figure 2.27: Design 4 : résultat du flux d'air vectoriel, vue 3D, corps PAS inclus.....	40
Figure 2.28: cinquième concept (5-1) de PAS, partie inférieure du design	41
Figure 2.29: PAS cinquième (5-1) concept design partie inférieure vue 3D.....	41
Figure 2.30: cinquième (5-1) concept partie supérieure du design	43
Figure 2.31: cinquième cinquième concept design partie inférieure vue 3D	43
Figure 2.32: PAS cinquième concept design pièces de positionnement en vue 3D	44
Figure 2.33: cinquième (5-2) partie inférieure de concept design. (a) Vue de dessus.	45
Figure 2.34: cinquième (5-1) concept design partie inférieure vue 3D.....	45
Figure 2.35: cinquième concept : pièces de positionnement en vue 3D.....	46
Figure 2.36: Volume Tetra angle maille non structurelle sur la conception 5, vue de côté .	47
Figure 2.37: Conception 5 résultat du flux d'air vectoriel, vue de côté, supports inclus.....	48
Figure 2.38: Conception 5 résultat de flux d'air vectoriel, vue de côté, espace compris	48
Figure 2.39: Conception 5 résultat de flux d'air vectoriel, vue de dessus	49
Figure 2.40: Conception 5 résultat de flux d'air vectoriel, vue 3D.....	49
Figure 2.41: partie inférieure du concept 6.....	51
Figure 2.42 :Partie inférieure vue 3D du concept 6 de PAS	52
Figure 2.43: Partie supérieur du concept 6	53
Figure 2.44: Partie supérieure vue 3Ddu sixième concept de PAS	53
Figure 2.45: PAS sixième concept : pièces de positionnement en vue 3D	54

Figure 2.46: Volume Tetra angle maille non structurée sur la conception 6, vue de côté .	55
Figure 2.47: Conception 6 : résultat du flux d'air vectoriel, vue de côté, supports inclus....	56
Figure 2.48: Conception 6 : résultat du flux d'air vectoriel, vue de côté, espace compris ...	56
Figure 2.49: Conception 6 résultat de flux d'air vectoriel, vue latérale 3D	57
Figure 2.50: Conception 6 résultat du flux d'air vectoriel, vue de dessus	57
Figure 2.51: Résultat du flux d'air vectoriel de la conception 6, vue de dessus	58
Figure 2.52: Conception 6 résultat du flux d'air vectoriel, vue 3D	58
Figure 2.53: Mesure expérimentale des coefficients de traînée pour certaines formes.....	60
Figure 3.1: PAS accepté fabriqué avec la technologie d'impression 3D	68
Figure 3.2: Ruban Téflon tubulaire naturel utilisé pour monter le PAS sur les oiseaux.....	69
Figure 3.3: Mousse de polyuréthane.....	70
Figure 3.4: Moule PDMS pour former le PDMS	72
Figure 3.5: PAS monté sur un oiseau, en utilisant le ruban de téflon dans la colonie	75
Figure 3.6: Masse totale moyenne (ng) de $\Sigma 15$ PBDE, HBB et $\Sigma 3$ Dec.....	75
Figure 4.1: Diagramme de tube pitot, statique et Pitot-Statique	82
Figure 4.2: Capteur de pression différentielle.....	84
Figure 4.3: Capteur de température et humide	85
Figure 4.4: Schéma électrique des capteurs et contrôleurs.....	87
Figure 4.5: PCB conçu et adapté pour être installé à l'intérieur du PAS	90
Figure 4.6: Carte électronique complète incluant tous les composants.....	90
Figure 4.7: Modèle de PAS (4 vues de côté).....	91
Figure 4.8: Modèle modifié de PAS (vue modifiée de la 3 ^{ème} partie).....	92
Figure 4.9: Représentation 3D du diagramme des composants électroniques	92
Figure 4.10: Modèle PAS modifié (vue de profil de la partie 4).....	93
Figure 4.11: Représentation du PAS modifié.....	93
Figure 4.12: Représentation complète du PAS avec les 4 parties et les composants	94
Figure 4.13: Coupes transversales complètes et finales du PAS	95
Figure 4.14: Simulation CFD sur PAS complet, résultats sur plan Y	96
Figure 4.15: Simulation CFD sur PAS modifié, résultats sur plan Z	97

Figure 4.16: Simulation CFD sur PAS modifié, résultats sur plan Z	98
Figure 4.17: Simulation CFD sur PAS modifié, résultats sur la vue de dessus du plan Z ...	98
Figure 4.20: PAS modifié pour intégrer les capteurs actifs.....	99
Figure 4.21: Anémomètre universel PASCO 850.	101
Figure 4.22: Prise en compte de la configuration pour la validation.....	102
Figure 4.23: Résultats de sortie préliminaires et calibrés du PAS	103
Figure 4.24: Résultats de sortie préliminaires et calibrés du PAS	103
Figure 4.25: Graphique de comparaison de température.....	104
Figure 4.26: Graphique de comparaison d'humidité relative.....	105

LISTE DES TABLEAUX

Table 2.1 : Calcul de la force de traînée du motif	61
Table 4.1 : Liste des principaux composants électroniques	89
Table 4.2 : Conception 7 calcul de la force de traînée	99

RÉSUMÉ

La protection de la santé humaine et de l'environnement est une préoccupation majeure depuis plusieurs années. Cependant, l'augmentation spectaculaire du nombre de produits chimiques nocifs rejetés par les industries ainsi que le nombre croissant de produits de consommation qui contiennent des composés chimiques entraîne des défis importants. Parmi ces produits chimiques, on retrouve une grande quantité de contaminants organiques halogénés qui sont constamment rejetés dans les écosystèmes. Ces contaminants peuvent ensuite s'accumuler dans les espèces sauvages, comme les oiseaux. Toutefois, il existe d'importantes lacunes dans les connaissances sur les sources alimentaires et non alimentaires de ces contaminants et c'est le cas en particulier pour certaines substances chimiques pour lesquelles aucune réglementation internationale n'existe. Par conséquent, une étude sur les sources atmosphériques de retardateurs de flamme halogénés (y compris les éthers diphenyliques polybromés (PBDE)) est nécessaire. Afin de réaliser cette étude, deux échantillonneurs miniaturisés pouvant être portés par des oiseaux ont été développés pour la première fois. Il s'agit d'un échantillonneur d'air passif (PAS) ou uniquement un filtre est utilisé comme capteur et d'un deuxième ou des capteurs électroniques sont intégrés. Différentes architectures ont été conçues en utilisant des simulations de mécanique des fluides numériques (CFD) afin d'évaluer le flux d'air à l'intérieur et à l'extérieur du PAS et la façon dont la surface des absorbants sont exposées à l'air qui y circule. Le dispositif a été fabriqué en utilisant une imprimante 3D et peut être équipé de différent absorbant. Il a par la suite été monté sur des goélands afin de retracer les sources de retardateurs de flammes dans la région de Montréal. Finalement, le dispositif retenu a été muni d'un capteur commercial afin d'obtenir des données complémentaires pour de meilleures analyses d'absorbant. Ce projet fait partie d'un projet global en collaboration entre des groupes de recherche du département de biologie et informatique de l'UQAM

MOTS-CLÉS : Échantillonneur d'air passif, Échantillonneur d'air actif, PAS, Adsorbeur, Simulation CFD, Retardateur de flamme, PBDE, Impression 3D.

ABSTRACT

Protection of human health and the environment has been one major concern in recent years, however, the dramatic increase in the number of noxious chemicals produced by industries causes an important challenge. Among these chemicals, there is a group of organic contaminants, flame retardants, which are discharged into the wildlife environment and could become concentrated inside the bodies of different species in different ways. However, there is a lack of knowledge related to the dietary and non-dietary sources of these contaminants, especially for the type of chemicals for which is no international restriction. Therefore, an investigation on the atmospheric sources of flame retardants, both gas and particle phase (including Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs)), can help us to have a better understanding about their effects on ecosystems. In order to address this investigation, for the first time, a miniaturized bird-borne passive air sampler was developed. This project was a part of a global project undertaken in a collaboration between research groups from computer science and biology departments of UQAM. In order to optimize the sampler, several patterns were designed and studied as a point of airflow, inside and outside the geometries, using computational fluid dynamic (CFD) simulation. Then, our colleagues from biology were responsible to select the most appropriate design based on their requirements. The design was fabricated using 3D printing technology, equipped with different kinds of sampling media and mount on a ring-billed gulls in order to track the sources of flame retardants in Montreal area. Finally, the approved passive air sampler was modified to be equipped with some commercial sensors in order to have complementary data for better adsorbents analysis.

KEYWORDS : Passive air sampler, Active air sampler. PAS, Adsorber, CFD simulation, Flame retardant, PBDE, 3D printing.

CHAPITRE I

INTRODUCTION

1.1 Description de projet

Cette thèse fait partie d'un projet plus global qui résulte d'une collaboration entre les groupes de recherche en ingénierie microélectronique et en biologie. Le projet global s'intitule «Combinaison de techniques de biotéléométrie haute résolution et d'échantillonnage passif de l'air: une approche novatrice pour comprendre les variations interspécifiques de l'exposition émergente aux contaminants chez les oiseaux ». Celui-ci concerne l'étude des sources de pollutions dans l'environnement et de leur effet sur l'écosystème. Plusieurs espèces en voie de disparition vivent à proximité des sources d'eau où l'on peut trouver différentes sources de contaminants. Parmi les sources de contamination, les contaminants organiques peuvent se bioaccumuler dans certaines espèces, dont les oiseaux, du fait qu'ils se répandent continuellement dans l'écosystème. Parmi toutes ces pollutions, les composés ignifuges, y compris les diphényléthers polybromés (PBDE), sont un groupe de produits chimiques massivement utilisés dans les industries. Ces mêmes produits chimiques sont ajoutés à différents types de produits tels que les meubles, les composants et les tableaux électroniques, les isolateurs pour réduire les risques d'incendie (Figure 1.1).

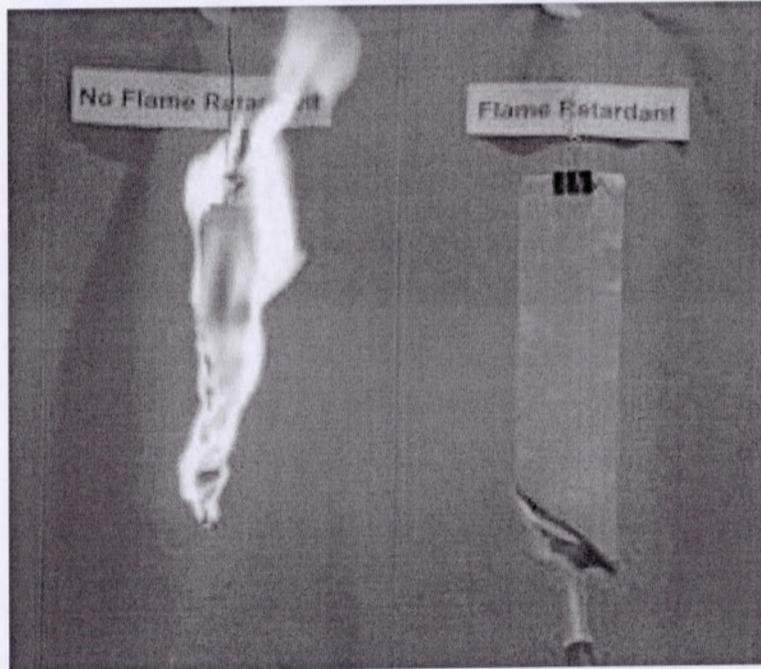


Figure 1.1: Test de feu sur papier avec et sans retardateur de flamme

Issu de: http://www.rutlandplastics.co.uk/advice/plastics_additives_fr.html

Une étude menée par le groupe du département de biologie de l'Université UQAM (Chaire de recherche du Canada en toxicologie aviaire comparative) a révélé l'existence d'une forte accumulation de PBDE et d'une série d'autres types de composés ignifuges dans les tissus des oiseaux vivant à Montréal. Ils ont suggéré que l'alimentation d'une espèce d'oiseau (goélands à bec cerclé) pourrait être la source d'exposition à ces types de produits chimiques en plus de la pollution atmosphérique. En tant qu'espèce omnivore (Figure 1.2), ces oiseaux peuvent être étudiés pour la contamination de l'environnement liée à l'alimentation, dans la région de Montréal. Cela peut être accompli en utilisant ces mêmes oiseaux pour trouver la source de contaminants en utilisant un dispositif d'échantillonnage de l'air monté sur eux. L'échantillonnage de l'air consiste à capturer le contaminant à partir d'un volume d'air, à mesurer la quantité de contaminants capturés et à afficher les résultats sous forme de concentration. Pour ce faire, l'air est passé à travers un milieu d'échantillonnage (peut être un type varié d'absorbants) qui capte les polluants. Ensuite, la

quantité de polluants capturés dans le milieu d'échantillonnage est mesurée par diverses techniques analytiques. Enfin, le volume d'air échantillonné est rapporté à la quantité de pollution capturée, ce qui donne la concentration exprimée en milligrammes par mètre cube (mg / m^3) ou par partie par million (ppm). Ce processus peut être effectué par échantillonnage d'air passif ou actif. Des informations détaillées sur cette technique et les instruments connexes seront fournies tout au long des prochains chapitres.



Figure 1.2 : Oiseaux volant autour d'une décharge et à la recherche de nourriture

Issu de:<http://www.gettyimages.ca>

1.2 Échantillonnage d'air passif et actif

Il existe deux principaux moyens de surveiller la pollution de l'air, l'échantillonnage passif et l'échantillonnage actif. Dans la section suivante, nous présenterons diverses techniques et systèmes qui ont été rapportés pour l'échantillonnage de l'air actif et passif.

1.2.1 Échantillonnage d'air passif

Un PAS (échantillonneur d'air passif) est un dispositif très simple qui n'a pas besoin de pompe ni de pièces électriques. Généralement, un échantillonneur d'air passif se compose d'un boîtier et d'une structure interne pour contenir différents types d'absorbeurs. Le boîtier peut être conçu de différentes formes et il protégera les parties internes de la pluie ou l'exposition directe à la lumière du soleil. Il permet également à l'air d'entrée d'avoir une meilleure circulation à l'intérieur du boîtier afin d'avoir une exposition maximale pour les absorbeurs. En fonction des applications PAS, différents types de structures internes peuvent être conçus pour utiliser différents types d'absorbeurs. Ce type d'échantillonneur peut être installé partout où l'échantillonnage de l'air est nécessaire, tels que: bureaux, chambres, parking ou places extérieures. Afin d'avoir suffisamment d'air d'échantillonnage Influence sur les absorbeurs, le PAS peut être maintenu en place pendant quelques jours à plusieurs semaines. La durée de l'échantillonnage dépend du temps de saturation des absorbeurs et des exigences de l'application. Il existe différents types de conception pour les PAS. L'un des plus utilisés est constitué de deux boîtiers en acier inoxydable demi-sphériques de différentes tailles (Figure 1.3) et installés de manière à pouvoir recouvrir les supports d'échantillonnage internes (Abdallah et Harrad, 2010). Les deux parties du boîtier sont fixées l'une au-dessus de l'autre à l'aide d'une longue vis centrale. Le support d'échantillonnage ou toute pièce mécanique supplémentaire peut être installé à l'intérieur du PAS en utilisant cette vis longue centrale. Sur la base de cette conception, l'air d'échantillonnage peut pénétrer dans le PAS à travers l'espace existant entre les parties supérieure et inférieure du boîtier. Après avoir traversé le milieu d'échantillonnage ou les absorbeurs, l'air prélevé peut sortir par les trous encastrés au fond de la partie du boîtier plus petite. Les autres rôles de ces deux parties de boîtier sont: protéger les milieux internes contre le dépôt direct de particules, réduire l'effet de la vitesse d'écoulement du fluide (Hazrati et Harrad, 2007) et protéger les échantillonneurs internes d'une exposition directe à la lumière pour certaines applications où la protection de la lumière est importante.

Selon le type de pollution à étudier, différents types d'absorbants peuvent être utilisés à l'intérieur du PAS. Par exemple, les filtres en MPU (mousse de polyuréthane) sont connus pour capter les composés en phase vapeur (Abdallah et Harrad, 2010) et les filtres en fibre de verre sont connus pour échantillonner les phases particulaires (Abdallah et Harrad, 2010) (Figure 1.4). D'autres types de matériaux tels que le polydiméthylsiloxane (PDMS) (Park et al., 2014) ou le GO (oxyde de graphène) peuvent également être utilisés comme absorbants pour vérifier leur fonctionnalité. Dans cette configuration PAS, différents types d'absorbants peuvent être utilisés seuls ou assemblés ensemble (Abdallah et Harrad, 2010). Cela peut être fait en utilisant la longue vis centrale pour monter divers absorbants. L'utilisation de la longue vis centrale apporte également l'avantage de pouvoir modifier la distance entre les différents PAS constitués de pièces et d'installer le PAS complet pour des utilisations internes ou externes (Figure 1.5).

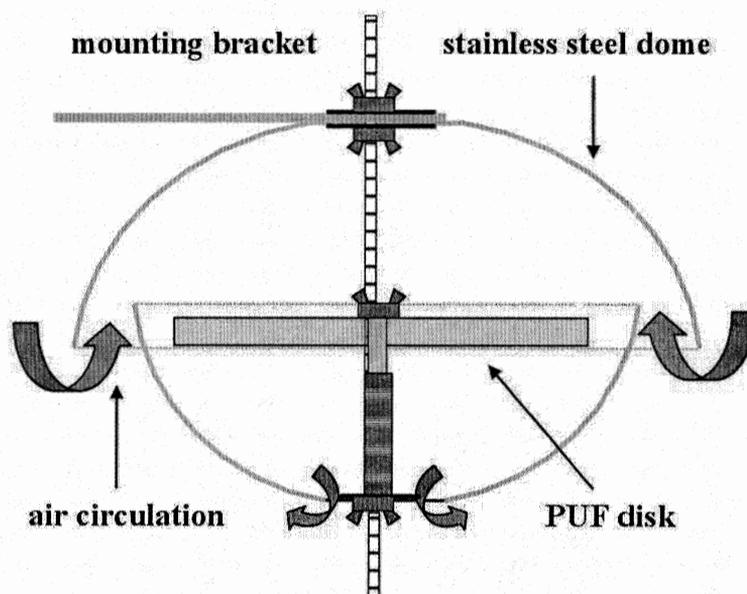


Figure 1.3 : Schéma d'échantillonneur d'air passif habituel avec un échantillon à l'intérieur

Issu de: <http://www.monairnet.eu/index-en.php?pg=methods--passive-air-sampling>

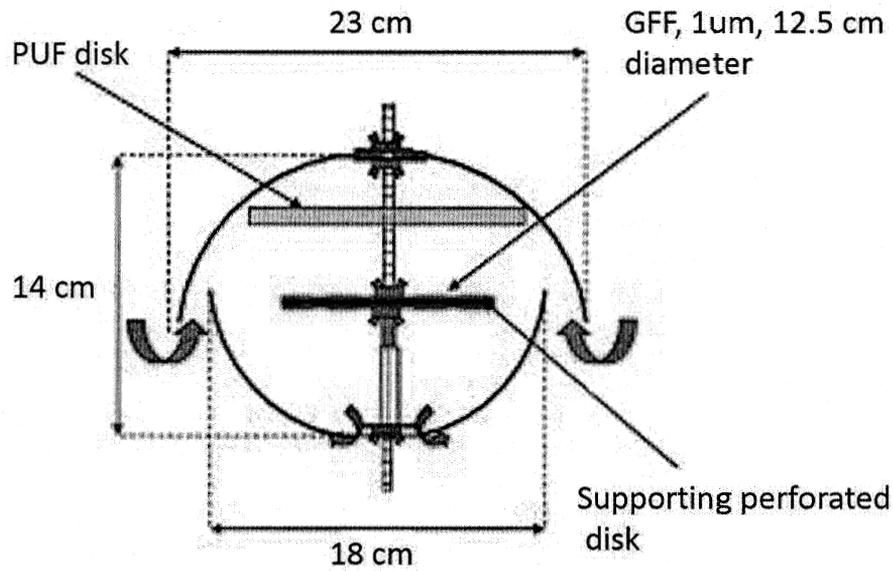


Figure 1.4: Schéma d'échantillonneur d'air passif habituel avec deux échantillons de milieu à l'intérieur (Abdallah et Harrad, 2010)



Figure 1.5 : Un échantillonneur d'air passif réel pendant le processus d'échantillonnage

Issu de: <http://www.monairnet.eu/index-en.php?pg=methods--passive-air-sampling>

Dans une autre étude menée sur deux sites industriels (l'industrie des alliages), le PAS était intégré dans le casque du travailleur (Bohlin et al., 2010) (Figure 1.6). En effet, les casques des travailleurs ont été modifiés de manière à agir en tant que PAS. Un petit morceau de MPU a été déployé dans leur casque et les travailleurs les ont portés pendant les heures de travail. Les MPU ont été exposés à l'air et quand ils sont devenus saturés, ils ont été analysés pour extraire les résultats.

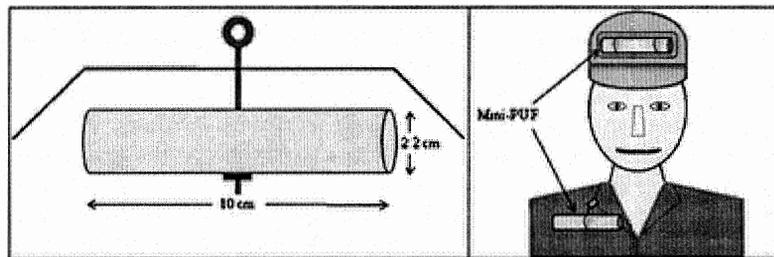


Figure 1.6 : Un casque utilisé comme échantillonneur d'air passif avec un milieu de prélèvement interne (Bohlin et al., 2010)

Dans une autre étude, un type différent de PAS appelé «flow through sampler» (échantillonneur à courant interne) a été présenté (Xiao et al., 2007) (Figure 1.7). Ce PAS a été modifié et adapté pour augmenter fortement le taux d'échantillonnage de l'air sans utiliser de pompe (Xiao et al., 2007) ou tout autre appareil électrique. Ce PAS est constitué d'un tube horizontal qui peut forcer l'air à souffler à travers les absorbeurs et d'une partie d'ailette verticale (agissant comme un gouvernail d'aéronef) qui permet au PAS de tourner dans la direction du vent. De cette manière, plus d'air se retrouve en contact avec le support d'échantillonnage, ce qui réduit le temps de saturation du support. Ce type de PAS est plus adapté aux applications pour un temps d'étude limité.

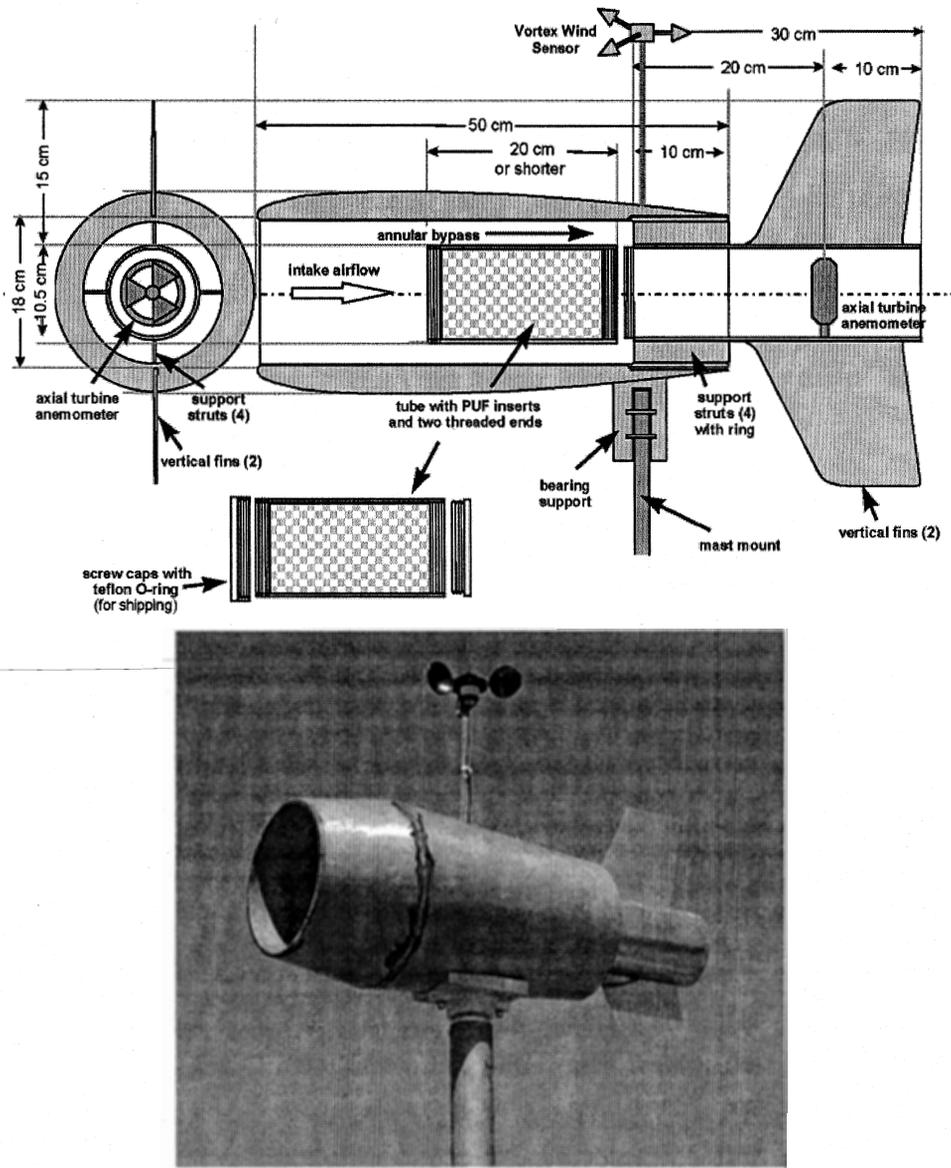


Figure 1.7 : Échantillonneur à écoulement continu (Xiao et al., 2007)

Le type conventionnel de PAS peut être installé partout (dans des endroits tels que bureaux, écoles, voitures, toits, terrains, etc.), cependant, les MPU peuvent être exposés avec une vitesse d'air différente et ceci peut affecter le taux d'échantillonnage des MPU (Tuduri et al., 2006). Une étude intitulée «Effet du vent sur le taux d'échantillonnage» (Tuduri et al., 2006) signale qu'en exposant les MPU à un environnement contaminé aux BPC (BPC:

biphényle polychloré) dans une soufflerie à vitesse variable, le taux d'échantillonnage des absorbeurs a augmenté continuellement et après avoir atteint une certaine vitesse, a fortement augmenté alors que la conception des boîtiers a pu atténuer l'effet du vent (Tuduri et al., 2006). Dans ce cas, le calcul de la vitesse du vent autour du PAS peut aider à valider les résultats de l'analyse MPU.

En outre, la compréhension de la circulation de l'air, de la vitesse de l'air à l'intérieur et à l'extérieur d'un PAS et de l'exposition de l'air aux disques MPU pourrait aider à mieux comprendre l'ensemble des fonctionnalités du PAS (Tuduri et al., 2006). Ainsi, deux autres études présentent la simulation de la CFD (dynamique des fluides numérique) sur un disque MPU et un PAS typique pour modéliser la circulation et la vitesse de l'air autour et à l'intérieur du PAS. Sur la base de ces simulations CFD, ils ont prouvé que le taux d'absorption des absorbeurs dépend de la vitesse du vent externe. De plus, la variation des conditions aux limites autour du disque MPU se traduira par des relations variables entre la pollution absorbée et la vitesse du vent (Thomas et al., 2006). De plus, la simulation CFD confirme l'intégrité des rapports précédents sur l'augmentation de la fréquence d'échantillonnage due à l'augmentation de la vitesse du vent. Ils montrent également que l'augmentation du taux d'échantillonnage dépend également de l'angle du vent ambiant (May et al., 2011). Enfin, les résultats rapportés, montrent l'avantage de procéder à la simulation CFD avant de s'attarder à construire un nouveau design.

1.2.2 Échantillonneurs d'air actifs

L'un des échantillonneurs d'air actif les plus courants est illustré à la figure 1.8. Ce système utilise une pompe d'aspiration ou un ventilateur pour aspirer l'air à échantillonner dans un récipient. Ce conteneur est équipé de différents types de filtres et d'absorbeurs, qui dépendent de la fonctionnalité de l'échantillonneur d'air actif. Ainsi, cet appareil est

composé de pièces électriques et mécaniques qui nécessitent suffisamment de puissance électrique pour fonctionner.

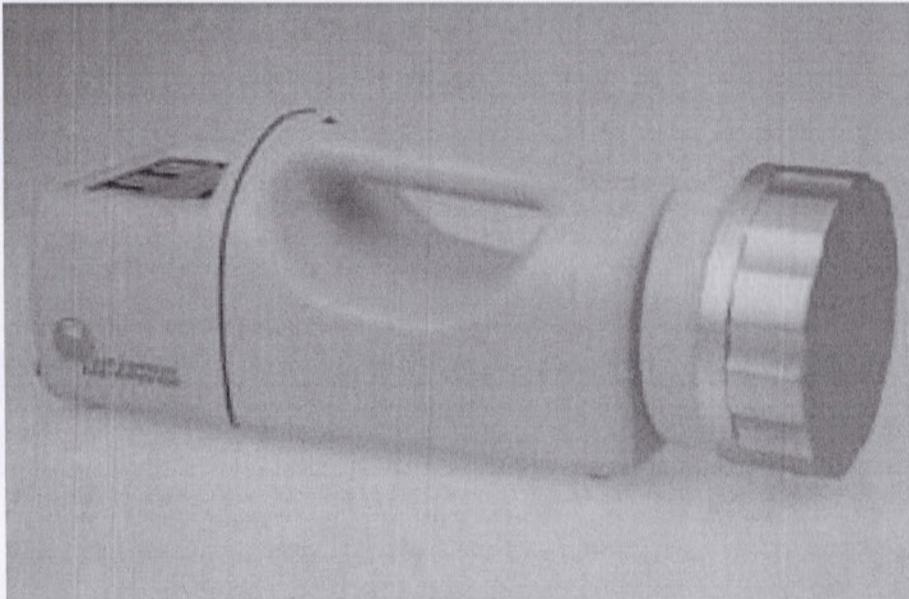


Figure 1.8 : Échantillonneur d'air actif

Issu de: http://www.biosci-intl.com/products/sas_100_180.htm

Certaines études ont porté sur un gaz spécifique à l'aide de capteurs d'air actifs. Sur la base des caractéristiques de gaz ciblées, un type de matériau ou une combinaison de plusieurs couches de matériaux différents peut être utilisé pour détecter le type spécifique de molécules de gaz. Ces matériaux changent leurs caractéristiques électriques (résistivité, capacité, conductivité, etc.) lorsqu'ils entrent en contact avec ces types de molécules de gaz et en mesurant la variation de ces caractéristiques, le gaz cible peut être détecté.

Des échantillonneurs de gaz actifs pourraient également être construits en utilisant des techniques microfluidiques. En utilisant des dispositifs microfluidiques, il est possible d'avoir plusieurs entrées et chaque entrée peut être conçue pour un matériau spécial tel que

l'eau, l'air, les gaz, etc. De nombreuses nouvelles techniques peuvent être utilisées pour la détection de gaz. Par exemple, il peut être utilisé pour fabriquer un «capteur de gaz à base de bulles» (Bulbul et al., 2014) qui mélange le liquide entrant dans un canal avec le gaz entrant d'un autre canal afin de créer de petites bulles contenant le gaz cible à mesurer. En mesurant la taille des bulles créées et en utilisant un logiciel personnalisé, le type de gaz entré peut être détecté. Dans une autre étude, une "centrifugeuse à gaz microfluidique" a été présentée. Il utilise le poids moléculaire du gaz pour séparer un mélange de gaz (Li et al., 2007).

Généralement, dans les dispositifs microfluidiques, une pompe est nécessaire pour injecter les liquides ou les gaz à l'intérieur des canaux fluidiques. Dans ces cas, une petite micro-pompe peut être intégrée dans l'appareil afin de déplacer le gaz à l'intérieur des canaux (Martini et al., 2012). Dans cette étude, la variation thermique a été utilisée pour servir de système de pompage le long des micro-canaux afin de guider le gaz dans les canaux (Martini et al., 2012).

De plus, les canaux fluidiques peuvent être utilisés pour guider le gaz prévu dans la chambre principale qui est fabriquée au-dessus d'une puce de lecture CMOS (Mu et al., 2012, Ward et al., 2012). La puce peut comprendre un réseau de chimiorésistance d'accrétion (CR) conçu pour amplifier et conditionner le signal détecté. La combinaison de réseaux CR, puce CMOS et techniques microfluidiques pourrait être utilisée pour construire un chromatographe micro-gaz (Mu et al., 2012, Ward et al., 2012).

1.3 Problématique et objectifs

Tous les échantillonneurs présentés sont trop grands par rapport à la taille moyenne d'un oiseau et il n'est pas possible qu'ils soient montés et portés par des oiseaux. Nous devons ensuite modifier la conception des échantillonneurs afin de les adapter aux oiseaux.

Comme il ressort des sections précédentes, l'échantillonneur d'air actif nécessite plusieurs pièces électromécaniques et ne convient pas à notre application. D'autre part, l'échantillonnage d'air passif présente plusieurs avantages par rapport à l'échantillonneur d'air actif. C'est une technique peu coûteuse qui ne nécessite aucune pièce électrique. Dans ce cas, pour cette étude, un échantillonneur d'air passif (PAS) peut être un dispositif prometteur pour capturer les composés ignifugeants halogénés.

Ce dispositif sera utilisé pour capter passivement les composés PBDE et d'autres types de retardateurs de flammes présents dans l'air à la fois dans les phases vapeur et particulaire pendant une période de temps (une, deux et trois semaines). Les conceptions seront basées sur un échantillonneur d'air passif existant qui est bien décrit par Abdallah et Harrad (May et al., 2011).

Après la fabrication et le test du dispositif PAS, il sera intéressant d'évaluer la possibilité d'y implanter des capteurs électroniques, afin de collecter des données complémentaires en cours de test.

Puisque ce projet a été réalisé en collaboration avec le département de biologie, la première étape pour lancer ce projet est de concevoir le PAS approprié. Dans ce cas, les objectifs suivants ont été fixés afin de répondre à toutes les explications ci-dessus:

- 1- Miniaturiser et valider un échantillonneur d'air passif (PAS) qui peut être transporté par un oiseau de taille moyenne et piéger les contaminants ignifuges halogénés en phase particule et en phase gazeuse.
- 2- Concevoir et fabriquer un circuit électronique à faible consommation d'énergie qui peut fonctionner pendant la période d'échantillonnage de l'air passif alors qu'il est intégré dans un PAS modifié afin de fournir des données complémentaires pour de meilleures analyses d'adsorbants.

1.4 Méthodologie

Afin de construire un appareil avec une petite taille et un poids requis pour cette application, les techniques de microfabrication disponibles seront évaluées. La plus appropriée sera choisie par l'utilisateur final (collaborateurs du département de biologie) en fonction des caractéristiques de l'oiseau.

Le boîtier d'échantillonnage peut être fabriqué en utilisant les techniques de lithographie douces. Dans cette technique, un moule peut d'abord être fabriqué en utilisant les matériaux de photorésine; ensuite, en coulant le polydiméthylsiloxane (PDMS) dans le moule, la chambre principale et les canaux associés seront formés et après le processus de durcissement, il peut être décollé du moule pour plus de manipulation (Qin et al., 2010). Les caractéristiques physiques du PDMS le rendent approprié pour ce type d'application (environnement climatique rigoureux) en raison de sa résistance aux chocs thermiques et physiques. Alternativement, la chambre PAS peut être fabriquée en utilisant la technologie d'impression 3D. Récemment, la technologie d'impression 3D a connu un développement massif et les nouvelles imprimantes peuvent imprimer des murs aussi étroits que 0,5 mm et des couches aussi fines que 50 micromètres. La taille et la conception de la chambre peuvent facilement être modifiées et mises à l'échelle en utilisant les deux techniques. Avant la fabrication, différents modèles conceptuels seront conçus et simulés pour étudier la circulation du fluide à l'intérieur et à l'extérieur du PAS et pour obtenir le meilleur contrôle du débit de fluide. Les concepts seront conçus de manière à pouvoir être équipés de différents types d'absorbeurs. Ce nouveau dispositif peut être utilisé pour différentes applications de toxicologie et de surveillance de la pollution. Il sera conçu de manière à pouvoir être porté par l'oiseau de taille moyenne pour la surveillance passive de l'échantillonnage de l'air. À l'avenir, il peut être équipé de certains capteurs, spécialement conçus pour des composés spécifiques. Cela va changer le rôle de cet appareil de l'échantillonneur d'air passif à l'échantillonneur d'air actif qui peut également envoyer des rapports en ligne ou des données au laboratoire.

Dans ce cas, des logiciels de conception 3D (conception Spark mécanique et Catia) ont été utilisés pour concevoir des modèles conceptuels. Ensuite, le test de dynamique des fluides computationnelle (CFD) peut être effectué sur des modèles conçus en utilisant ANSYS FLUENT 15 pour étudier les effets du flux de fluide (dans notre cas c'est de l'air). Le modèle et ses résultats connexes seront fournis au département de biologie afin de savoir s'il y a des faiblesses ou des problèmes critiques sur la conception. En cas de problème, le motif sera modifié ou un nouveau motif sera fourni. Cette procédure sera répétée jusqu'à ce qu'un modèle couvrant toutes les exigences du projet soit atteint et approuvé par le département de biologie. Le PAS approuvé sera fabriqué par une imprimante 3D afin d'être monté sur l'oiseau pour la première année de l'étude.

Suite à la première conception, afin d'équiper le PAS de quelques capteurs, le PAS serait repensé et modifié de manière à respecter la conception précédente tout en pouvant transporter des circuits électroniques incluant des capteurs. Le nouveau design sera fabriqué et équipé avec des circuits électroniques et des adsorbants afin d'être testé dans le dépôt.

Pour la partie active du PAS, les capteurs et les processeurs doivent être aussi petits que possible et ils doivent également être sélectionnés dans la catégorie de puissance ultra basse. La carte de circuit imprimé (PCB) et son schéma connexe seront conçus par un logiciel de fabrication de circuits (Altium design Co.), puis fabriqués à l'aide d'une machine de fabrication de circuits imprimés (LPKF - LPKF Laser & electronics AG).

1.5 Plan de présentation de la thèse

Tous les concepts seront présentés au chapitre 2, y compris leurs résultats de simulation CFD. La taille réelle des motifs, leur conception en 3D et en pointillés seront présentés sous forme de vues séparées et assemblées. Enfin, le processus de comparaison et de sélection de PAS sera basé sur les résultats de la simulation CFD et sur les expériences de notre collègue du département de biologie.

Au début du chapitre 3, le processus de fabrication du PAS, les résultats et toutes les conditions nécessaires à respecter pour la fabrication seront présentés. Suite à cela, différents types d'adsorbants qui ont été utilisés et peuvent être utilisés avec PAS miniaturisé seront introduits et ensuite les résultats biologiques du PAS seront présentés, y compris une image du travail déposé qui montre un vrai PAS imprimé 3D monté sur un oiseau et prêt à être libéré pour les tests.

Au chapitre 4, des capteurs pouvant être appliqués au PAS miniaturisé et la manière dont ils peuvent fournir des données complémentaires seront présentés. Ensuite, le PAS accepté sera modifié de manière à ce que tous les nouveaux composants, y compris les capteurs, les cartes de circuits imprimés et les contrôleurs, soient équipés à l'intérieur du PAS. Une nouvelle simulation sera effectuée sur le nouveau design afin de vérifier la fonctionnalité de PAS tandis que les nouveaux capteurs actifs sont intégrés dans le PAS. Ci-après, les résultats des capteurs actifs seront montrés et leur comparaison-validation avec un anémomètre pré-calibré. Enfin, en conclusion, une brève explication de tous les chapitres sera présentée.

CHAPITRE II

CONCEPTS ET SIMULATIONS D'ÉCHANTILLONNAGE D'AIR PASSIF

Comme c'était la première fois qu'un PAS miniaturisé était conçu et adapté pour être installé sur des oiseaux, plusieurs concepts conceptuels miniaturisés ont été réalisés avec le logiciel DesignSpark Mechanical (logiciel de conception 3D - Free License) et Catia (Dassault Systemes - version académique à l'école de technologie supérieure (ETS)). Sur ces modèles, nous avons essayé d'examiner plusieurs facteurs qui pourraient influencer la performance du PAS et aussi les capacités de vol des oiseaux. Ces facteurs qui peuvent également être considérés comme des limitations du projet sont: la forme aérodynamique du PAS, sa taille et son épaisseur (doit être inférieure à $45 \times 35 \times 20$ mm), son poids (doit être inférieur à 3% du poids total) position et enfin, la manière la plus efficace que l'air introduit peut exposer les médias d'échantillonnage. Dans ce cas, l'idée de chaque conception est basée sur les exigences mentionnées qui ont été fournies par nos collaborateurs du département de biologie. Par exemple, certaines conceptions auraient la surface active maximale du milieu d'échantillonnage, d'autres seraient plus aérodynamiques et d'autres pourraient avoir une exposition directe à l'air. La simulation de la dynamique des fluides computationnelle (CFD) a été effectuée sur des modèles conçus en utilisant le logiciel de simulation ANSYS Fluent afin de comprendre comment le PAS conçu se comportera avant la fabrication. Chaque design et ses résultats de simulation ont été proposés à nos collègues du département de biologie afin de connaître les avantages et les inconvénients de la conception et d'obtenir des suggestions pour améliorer la conception. À la fin, le design le plus approprié, celui qui répond à toutes les exigences du projet, tel que

suggéré par le groupe du département de biologie a été fabriqué et préparé pour être testé sur les oiseaux.

Pour les simulations CFD, le fichier de conception 3D a été exporté en tant que fichier STereoLithography (STL) et importé dans le logiciel ANSYS. Afin d'avoir la même condition de simulation pour tous les modèles, les mêmes paramètres ont été utilisés pendant toute la simulation comme suit:

Définition de la zone:

Afin de faire une simulation CFD sur un objet, cet objet doit être défini dans une zone qui est un espace à trois dimensions. L'outil de définition de zone nous permet de définir cet espace en dessinant des surfaces appelées murs. Ces murs feraient partie de la simulation CFD, ce qui signifie que le logiciel de simulation calculera les effets d'écoulement de fluide sur ces parois qui ne sont pas souhaités. Afin d'éliminer les effets des murs sur les objets principaux, cette zone doit être définie aussi grande que possible. Dans les simulations CFD, généralement, chaque dimension de zone est considérée comme quinze fois plus grande que les dimensions associées sur l'objet cible.

Matériau des objets:

Dans les simulations CFD, tous les objets conçus (murs, objets principaux, fluides) doivent être affectés à un type de matériau existant dans la bibliothèque logicielle. Ces matériaux peuvent être des fluides (air ou gaz chimiques), flexibles (plastiques, polymères, etc.) ou des matériaux rigides et non flexibles (comme l'aluminium). Puisque le prototype final de PAS sera fabriqué à partir d'un plastique dur qui n'est pas flexible, il a été défini comme un matériau solide non flexible dans le logiciel de simulation. Le matériau d'écoulement a été défini comme de l'air avec une vitesse de 15 m/s puisque l'air sera utilisé pour un échantillonnage normal. La vitesse de l'air de 15 m/s a été définie en fonction de la vitesse maximale de l'oiseau afin d'étudier le comportement du PAS dans les pires conditions.

Maillage:

Cette étape est la partie la plus importante de la procédure de réglage de la simulation puisque toutes les équations CFD seront calculées en fonction du maillage désigné. Dans la première étape de la génération de maillage, un maillage 2D sera généré sur toutes les surfaces. La taille des maillages définis lors de cette étape affectera le nombre d'itérations pendant la simulation. On a essayé de garder la même taille pour toutes les conceptions afin d'avoir les mêmes conditions de simulation. Ensuite, ces maillages 2D doivent être convertis en un maillage 3D appelé maillage volumique. Dans notre cas, le maillage non structuré tétra angle a été défini comme un type de maillage volumique en raison de sa facilité de génération avec un ratio 1.2 exponentiel. Ce rapport est lié à la croissance des mailles. Cela signifie que sur les surfaces importantes où une haute précision est nécessaire, la taille du maillage sera sa valeur par défaut (qui sera déterminée par l'utilisateur) et dès que les mailles commencent à s'éloigner des surfaces importantes, elles se développent selon un rapport déterminé. Cette augmentation de la taille du maillage pour certaines zones réduira le temps de simulation.

Puisque le fluide circulant sur les surfaces de PAS est le paramètre le plus important de la simulation, le maillage de prisme a été défini seulement sur les surfaces d'objet. Dans ce cas, le maillage a été défini comme un maillage structuré avec un rapport exponentiel de 1.2, car il donne des résultats plus précis par rapport au maillage à angle tétra.

Conditions aux limites:

L'objectif de ces paramètres est de simuler les conditions environnementales qui affecteront le PAS lors de tests réels. Puisque le PAS sera testé pendant l'été alors qu'il est monté sur un oiseau, la vitesse de l'air est définie comme 15 m / s. Cette vitesse est estimée égale à la vitesse maximale de l'oiseau. La température a été définie à 25 ° C et la pression a été définie comme étant la même que la pression de l'air au niveau de la mer.

Dans ce qui suit, différents designs seront présentés sur la base d'idées différentes. Une simulation CFD sera effectuée sur chaque conception afin d'étudier le flux de fluide et

également de calculer l'énergie de la force de traînée. Ces valeurs de glissement seront ensuite utilisées pour les procédures de comparaison et de sélection PAS. Il y aura une discussion sur la sélection du PAS et la façon dont le PAS final a été sélectionné.

2.1 Concept 1

2.1.1 Modèle 1

Le premier modèle est basé sur la direction de vol avant des oiseaux. Dans cette conception, il a été considéré qu'avoir une entrée d'air large peut aider à absorber plus d'air dans le PAS et cela peut être augmenté quand l'oiseau vole. Dans ce cas, le PAS est conçu avec des parois aussi fines que 5 mm. Une entrée et une sortie sont considérées avec une taille de 23×3 mm pour les deux (Figure 2.1). La taille de l'appareil est de $27 \times 27 \times 5$ mm.

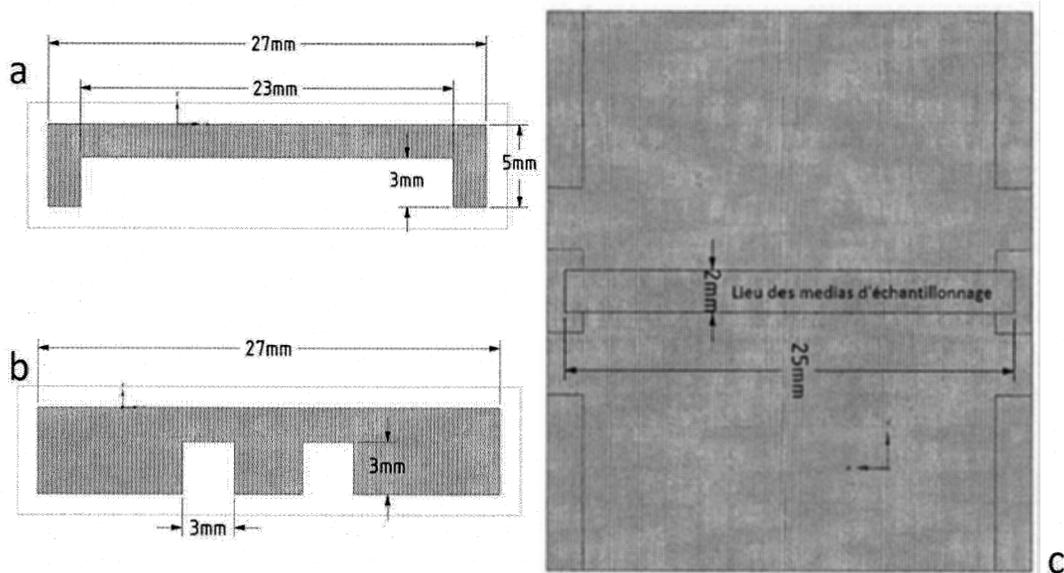


Figure 2.1: premier concept PAS. (a) Vue de face avec un seul canal large comme entrée et sortie. (b) Vue de côté avec deux trous de pression, avant et après le milieu d'échantillonnage. (c) Vue de dessous, le milieu d'échantillonnage est placé au milieu du PAS et peut être exposé à l'air dans les deux directions.

Deux trous de sortie sont considérés pour cette conception. Ils sont situés de chaque côté du PAS afin de réduire la pression d'air appliquée au milieu d'échantillonnage lorsque l'oiseau vole ou lorsqu'il y a un fort vent. Ces trous sont illustrés aux figures 2.1 b, 2.2 a et 2.2 b.

Le support d'échantillonnage est positionné au milieu du PAS. Ce média a une largeur de 2 mm et il y a une longueur de 25 mm où l'air peut directement exposer le milieu d'échantillonnage (Figure 2.1 c, 2.2 a).

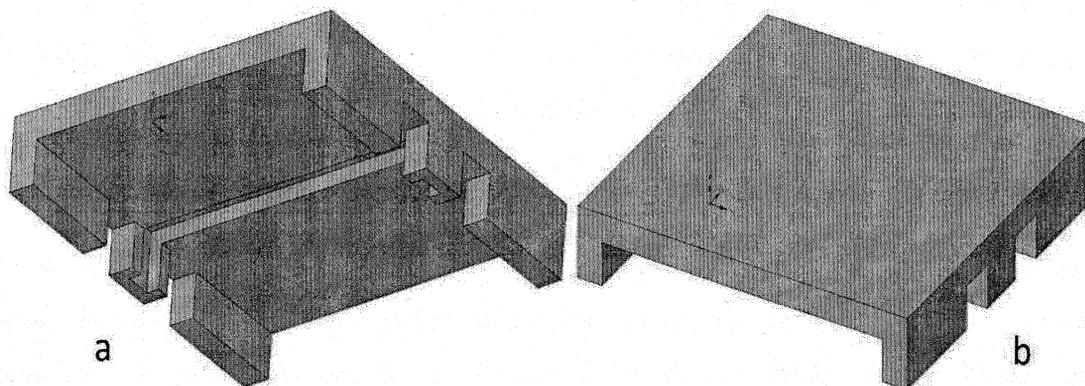


Figure 2.2: Vue 3D de la conception 1. (a) Vue de dessous 3D. (b) Vue de dessus

2.1.2 Simulation de la conception 1

La simulation du premier motif de conception a été faite à partir de son maillage généré (Figure 2.3). La simulation CFD sera effectuée sur chacun des tétra anges maillés (évidents comme trois angles verts) et cela signifie que le fluide circulera à l'intérieur de ces zones vertes. Les autres parties vides sont le corps du PAS et il n'y a pas de fluide qui coule à l'intérieur comme cela peut être vu sur les résultats de simulation fournis par ANSYS. Lorsque la simulation est terminée, un vecteur de vitesse sera fourni à la place de chaque maille tétra-ange. Chaque vecteur de vitesse aurait une direction qui dépend de la géométrie de l'objet. Les résultats sont fournis sous forme de vues 3D, mais ils doivent être affichés

sur un plan pour une meilleure analyse. Il peut y avoir plusieurs vecteurs de vitesse de fluide différents dans chaque sortie de résultat. Ces vitesses sont indiquées comme une légende sur le côté droit du résultat de sortie avec des couleurs différentes, de sorte qu'il serait facile de trouver la vitesse du fluide dans toutes les parties de la conception. Ces procédures sont fixes pour toutes les conceptions et la seule chose qui pourrait être différente est le plan des résultats. Choisir quel plan de résultats est le meilleur pour étudier et approfondir dépend de la géométrie de l'objet.

Les résultats de la simulation sur le premier modèle montrent la circulation de l'air et ses effets sur le PAS. Dans la figure 2.4, les espaces vides sont liés à la géométrie conçue et seul le flux de fluide est visible. Chaque flèche (Vector) représente le flux de fluide à ce point. La vitesse du fluide est indiquée par des couleurs différentes selon le diagramme de couleur. La vitesse la plus faible est démontrée par la couleur bleue et la couleur rouge est la vitesse la plus élevée. Les vitesses les plus basses et les plus élevées ont été définies dans les conditions aux limites. En outre, la direction des vecteurs indique la direction de l'écoulement du fluide après avoir fait face à notre géométrie. Comme prévu, l'air d'échantillonnage est entré dans le PAS et l'a traversé avec la même vitesse (Figure 2.4). Cette figure montre également que le milieu d'échantillonnage au milieu du PAS sera directement exposé à l'air introduit. En raison de la faible épaisseur du PAS, l'air passe doucement de l'extérieur du PAS et il n'y a pas d'effet d'air spécial (vortex) autour du PAS (Figure 2.5, 2.6).

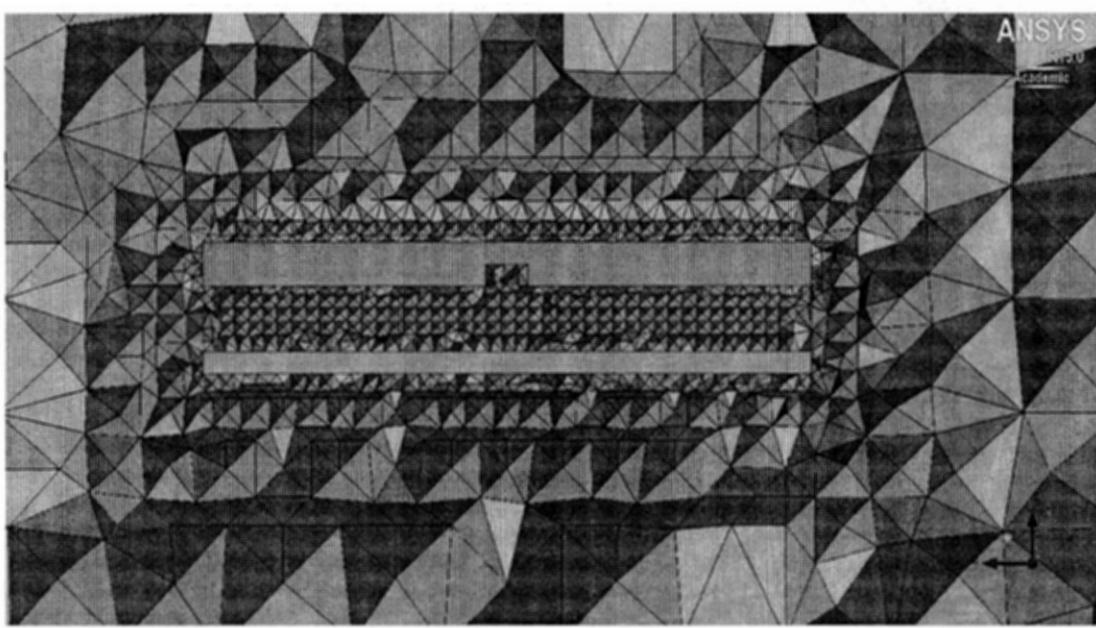


Figure 2.3: Maille non structurée sur la conception 1 - vue de côté

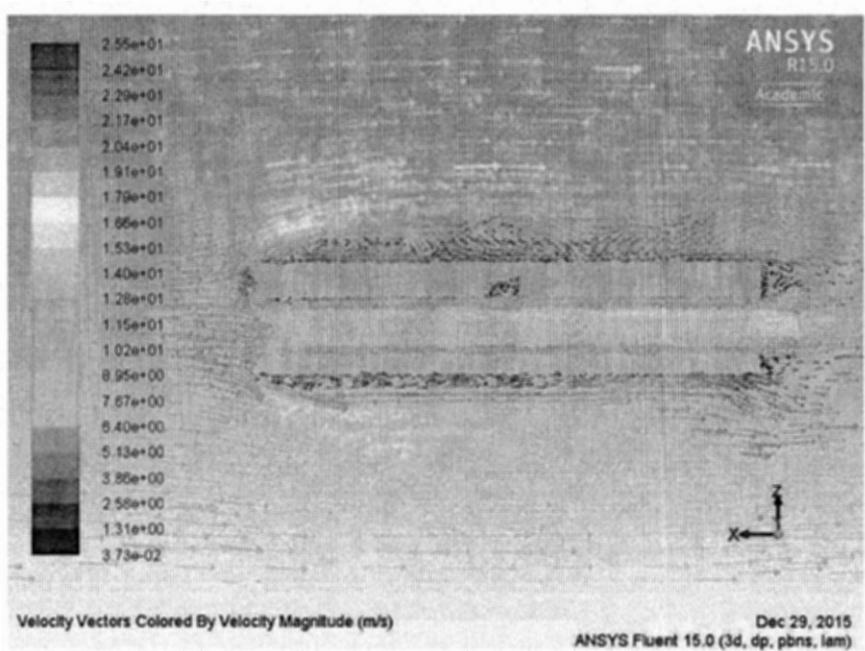


Figure 2.4: Conception 1 résultat du flux d'air vectoriel sur PAS, vue latérale, plan médian

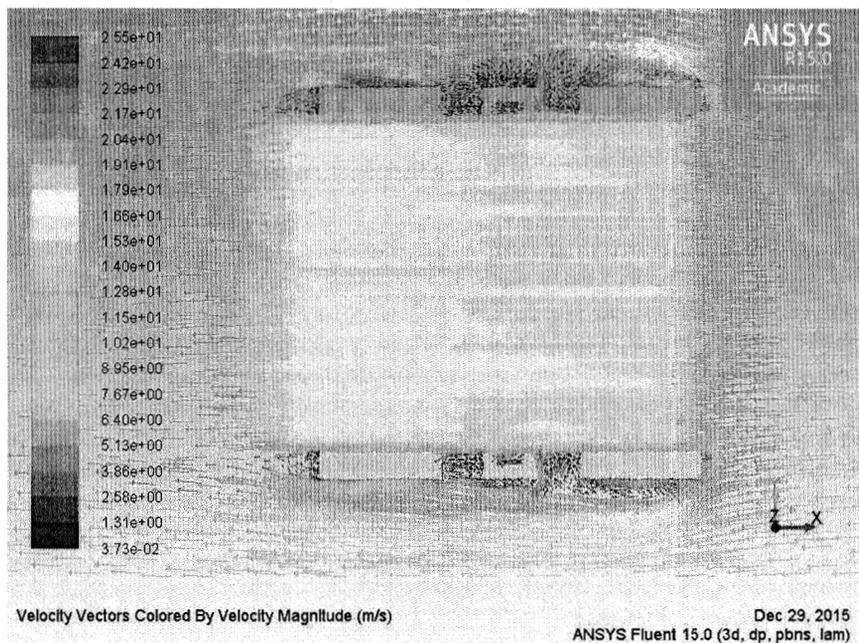


Figure 2.5: Conception 1 résultat de flux d'air vectoriel sur PAS, vue de dessus

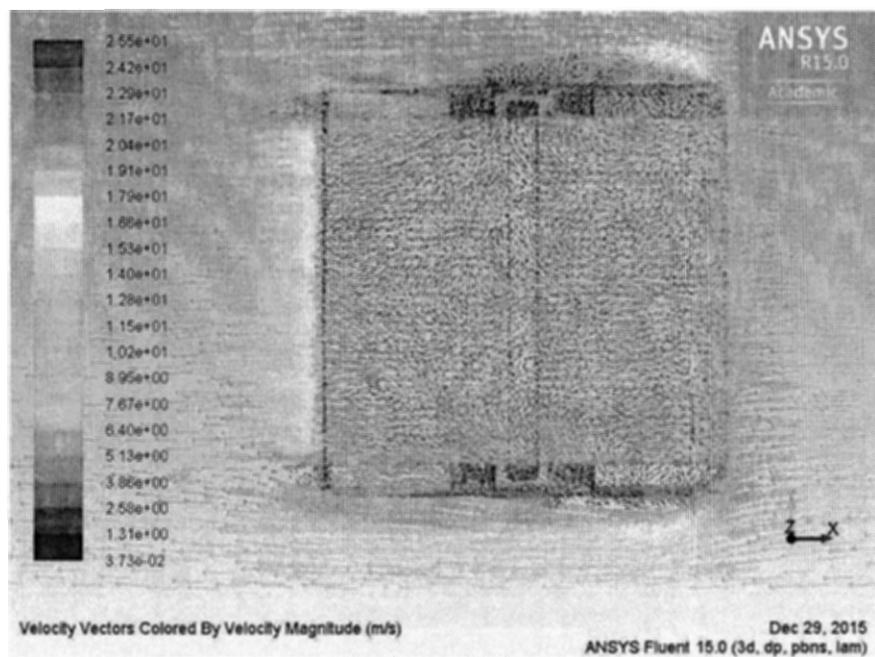


Figure 2.6: Conception 1 résultat du flux d'air vectoriel, vue de dessus

2.2 Concept 2

2.2.1 Modèle 2

La deuxième conception (figure 2.7) est similaire à la première, sauf qu'elle est plus étroite et que la conception intérieure est modifiée afin d'améliorer la forme aérodynamique de la conception et d'empêcher la déformation du support d'échantillonnage de l'exposition directe à l'air. La taille totale du motif est de $35 \times 16 \times 5$ mm, il y a une entrée et une sortie pour l'échantillonnage d'air (8×3 mm) (Figure 2.7 a) et deux supports d'échantillonnage peuvent être placés dans le PAS avec un 15.5×2 dimension mm (Figure 2.7 c).

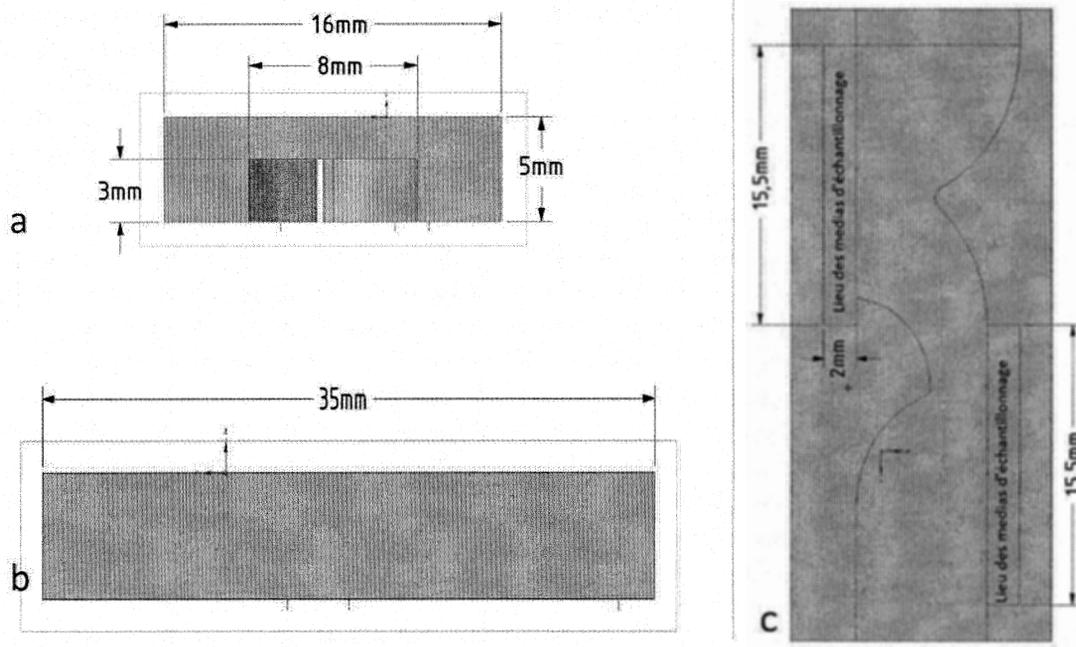


Figure 2.7: Deuxième concept PAS. (a) Vue de face avec une entrée et une sortie. (b) Vue latérale. (c) Vue de dessous. Les milieux d'échantillonnage sont des endroits parallèles à la direction du flux d'air tandis que deux courbes sont considérées comme faisant dévier l'air vers la surface du milieu d'échantillonnage.

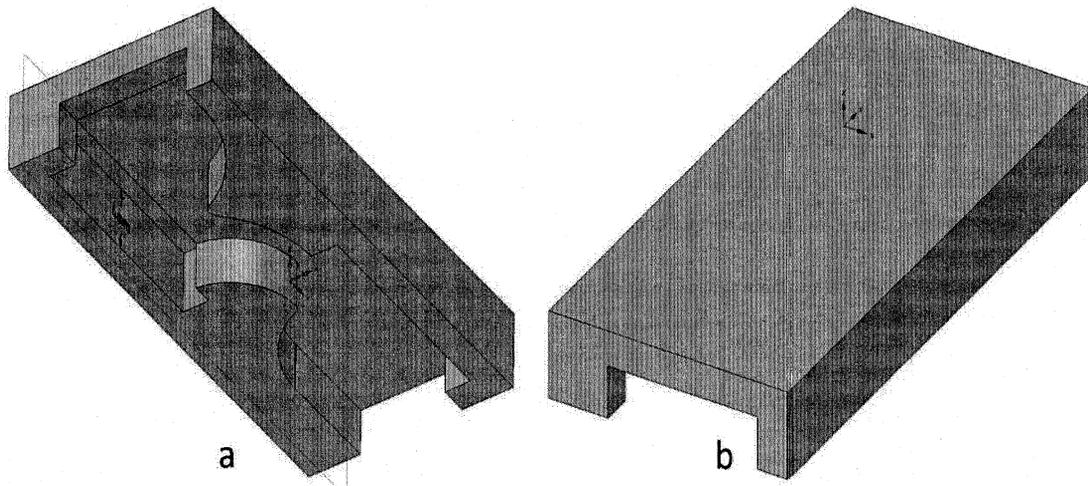


Figure 2.8: Vue 3D deuxième concept PAS. (a) Vue de dessous. (b) Vue de dessus

Les supports d'échantillonnage sont positionnés dans la même direction que le flux de vent. Dans ce cas, un vent fort ne peut pas les déformer ou les faire sortir lorsque l'oiseau vole (Figure 2.7). Afin de maximiser l'exposition de l'air aux médias, le canal d'entrée est plus étroit au milieu de la chambre en utilisant une courbe lisse. Ces courbes devraient avoir deux effets. Premièrement, il resserre le canal de sortie d'air et cela devrait augmenter la vitesse de l'air en raison de l'entrée plus grande (signifie plus de volume d'air) et d'une sortie plus étroite qui rend le flux d'air suffisamment fort pour le second milieu. Deuxièmement, cette courbe devrait distraire l'air introduit dans le premier milieu de manière à avoir le maximum d'impact sur la surface du support d'échantillonnage (Figure 2.7, 2.8).

2.2.2 Simulation de la conception 2

La simulation CFD du motif 2 montre clairement la circulation de l'air à l'intérieur du PAS et son exposition aux milieux d'échantillonnage. Il montre la réduction de la vitesse de l'air de 15 m / s à environ 4,5 m / s. Le premier milieu d'échantillonnage est exposé en entrant

dans l'air qui a une vitesse d'environ 4,5 à 5 m / s (un tiers de la vitesse maximale). Ensuite, le trajet d'air rétréci (dû aux deux courbes mises en œuvre) accélère la vitesse d'échantillonnage de l'air à environ 15 m / s (identique à la vitesse du vent extérieur). À ce stade, la vitesse de l'air d'échantillonnage est suffisamment élevée pour être exposée au second milieu et, à partir de là, elle peut facilement quitter le PAS (Figure 2.10).

De plus, les vues 3D et globales de la simulation incluant le corps PAS montrent qu'il n'y a pas de tourbillon d'air spécial sur le corps extérieur du PAS et que l'air passe doucement à travers le PAS (Figure 2.11, 2.12).

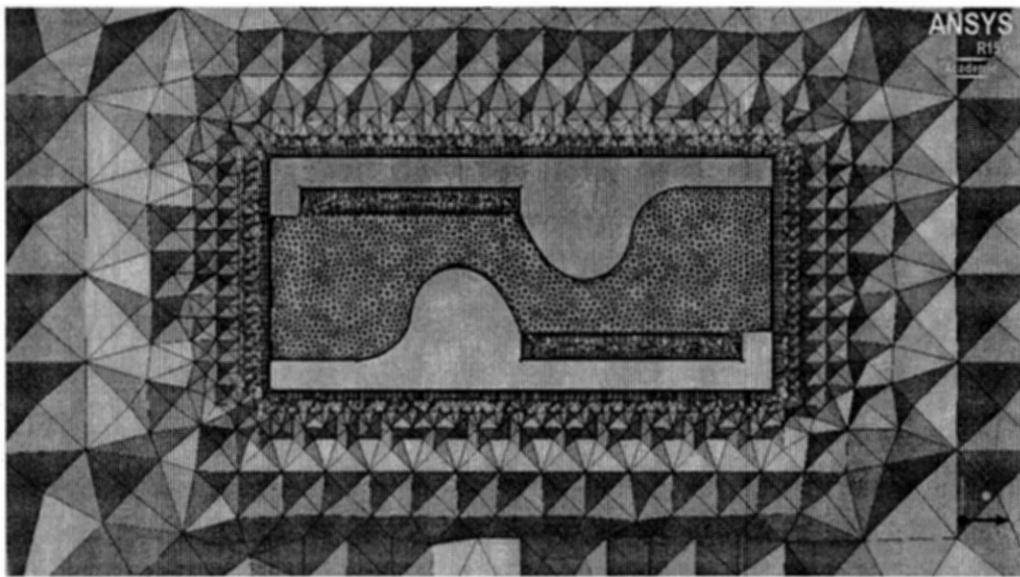


Figure 2.9: Volume Tetra angle maille non structurée sur la conception 2, vue de dessus

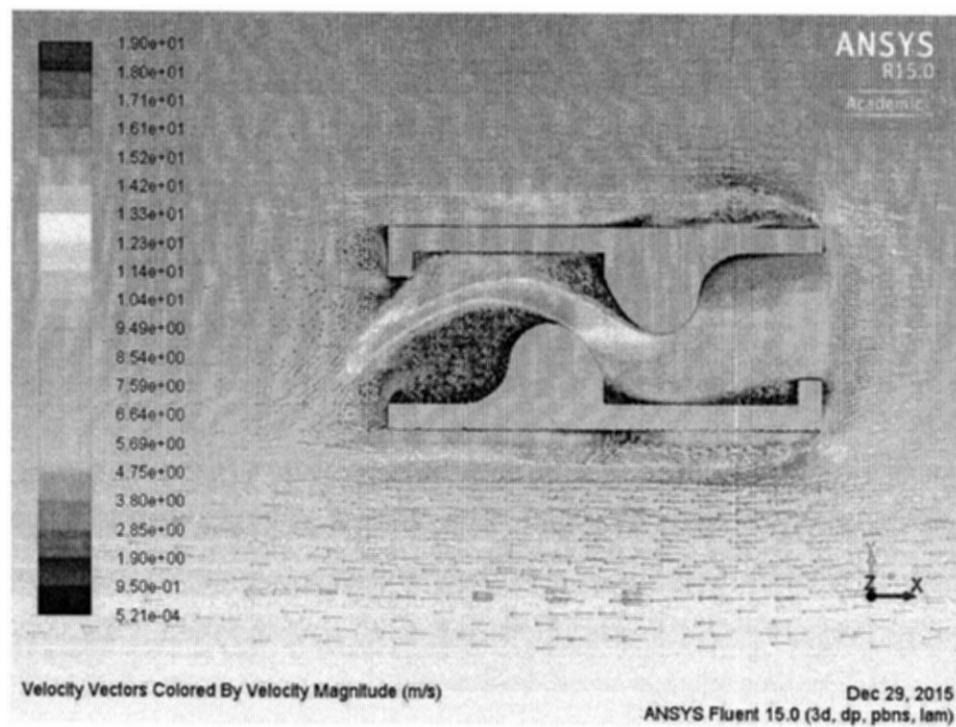


Figure 2.10: Résultat du flux d'air vectoriel Design 2, vue de dessus

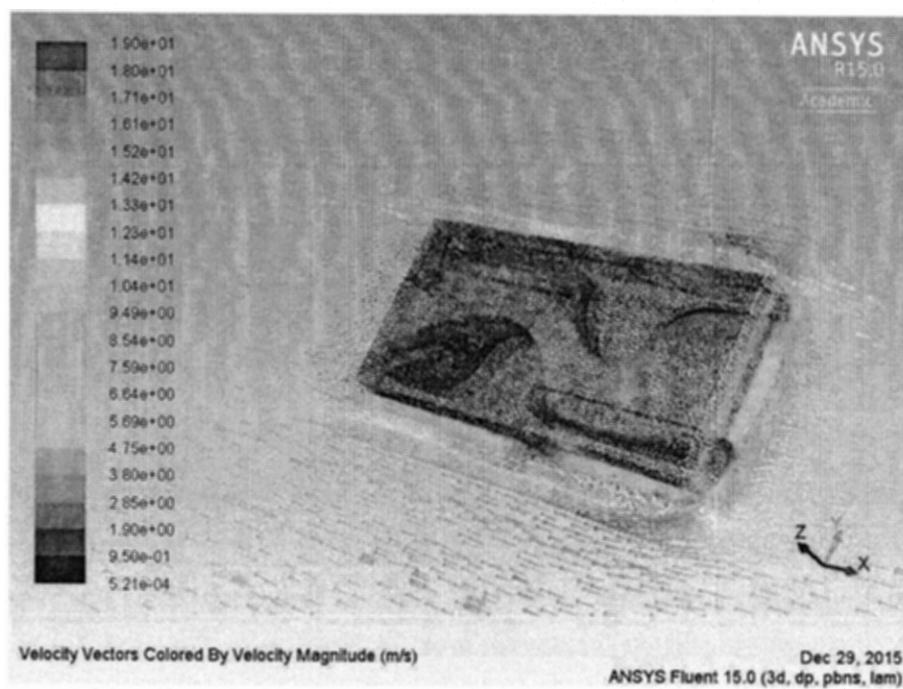


Figure 2.11: Résultat du flux d'air vectoriel Design 2, vue latérale 3D, structure PAS incluse



Figure 2.12: Résultat de flux d'air vectoriel Design 2, vue de dessus 3D, structure PAS incluse

2.3 Concept 3

2.3.1 Modèle 3

Comme il a été présenté ci-dessus, les deux premiers modèles ont été conçus avec une seule entrée et une sortie. Cela signifie que l'air d'échantillonnage ne peut pénétrer que dans une direction et que son efficacité maximale est pendant le temps de vol des oiseaux.

Dans le troisième modèle, on a essayé d'avoir plus d'entrées et de sorties de tous les côtés du PAS. Dans ce cas, le processus d'échantillonnage ne dépendrait pas de la direction de vol des oiseaux et l'échantillonnage de l'air pourrait entrer dans le PAS de toutes les directions (figure 2.13). Pour cette conception, quatre trous ont été placés sur le dessus du PAS afin de contenir quatre milieux d'échantillonnage de forme circulaire, d'une épaisseur

de 2 mm et d'un diamètre de 4,5 mm (Figure 2.13). Dans ce cas, la surface active serait de 3,5 x 2 mm.

Pour répondre à ces modifications, la forme PAS a été changée en cube avec des dimensions de 28 × 28 × 5 mm. Deux canaux d'entrée-sortie ont été introduits de chaque côté du PAS. Chacun peut agir comme une entrée ou une sortie en fonction de la direction du vent. Chaque entrée est connectée à une autre entrée qui est placée sur le côté droit de la première entrée. La combinaison de ces deux entrées fait un canal avec une entrée et une sortie avec un angle de 90 degrés entre eux. De cette façon, le canal peut être utilisé dans deux directions (Figure 2.14).

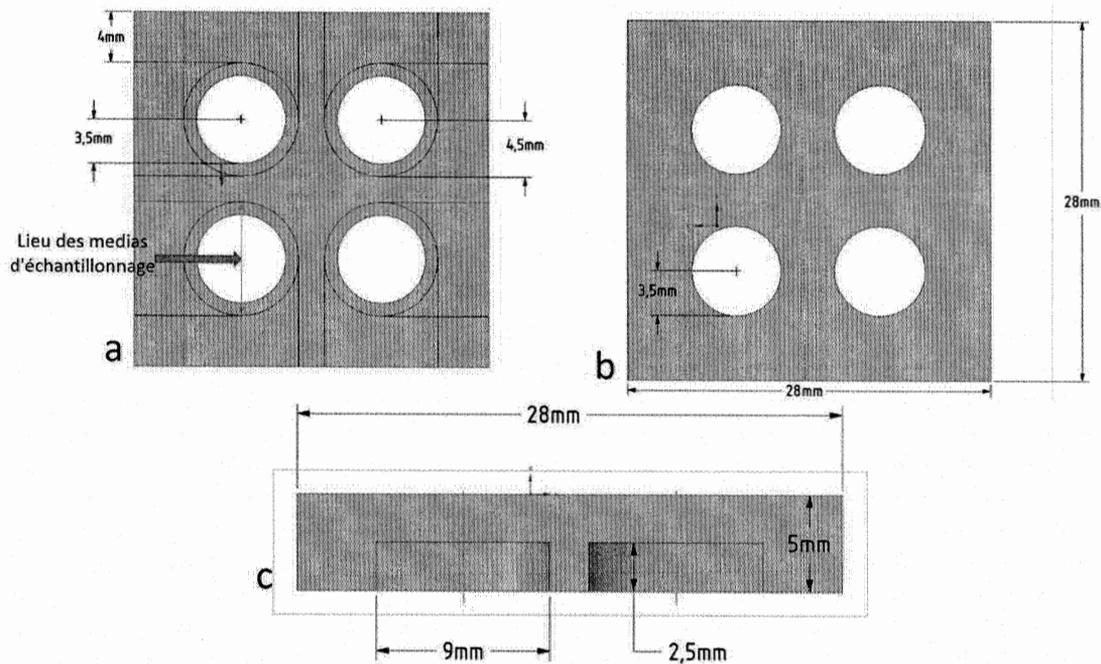


Figure 2.13: troisième concept PAS. (a) Vue de dessous. (b) Vue de dessus. (c) Vue de face (qui est la même pour tous les côtés car elle a été conçue symétriquement)

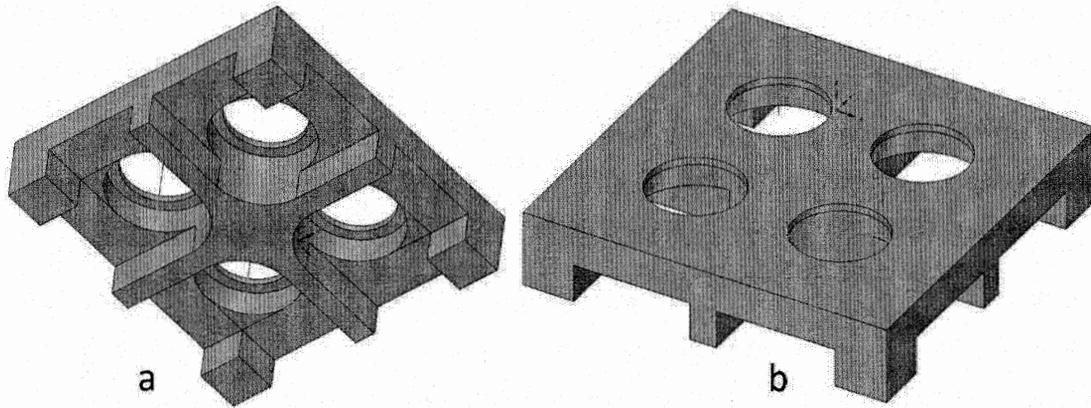


Figure 2.14: Vue 3D troisième concept PAS. (a) Vue de dessous. (b) Vue de dessus

2.3.2 Simulation de la conception 3

Les simulations d'écoulement d'air sur la conception 3 montrent les effets de l'entrée d'air d'échantillonnage sur les deux trous avant. Comme le montrent les figures 2.16 et 2.17, l'air pénètre directement dans les canaux et, en raison du virage à 90 degrés, certains d'entre eux sortent directement du trou d'échantillonnage par le flux réfléchi et le reste sort par le canal (Figure 2.16, 2.17).

De plus, les résultats de la simulation montrent qu'une partie de l'air d'échantillonnage qui est sorti à travers le canal et le trou du support d'échantillonnage pénètre dans deux trous arrière qui n'étaient pas prévus lors de la conception du modèle. Cela signifie que même avec un flux d'air à sens unique, tous les milieux d'échantillonnage seront exposés à l'air à échantillonner (Figure 2.17, 2.18).

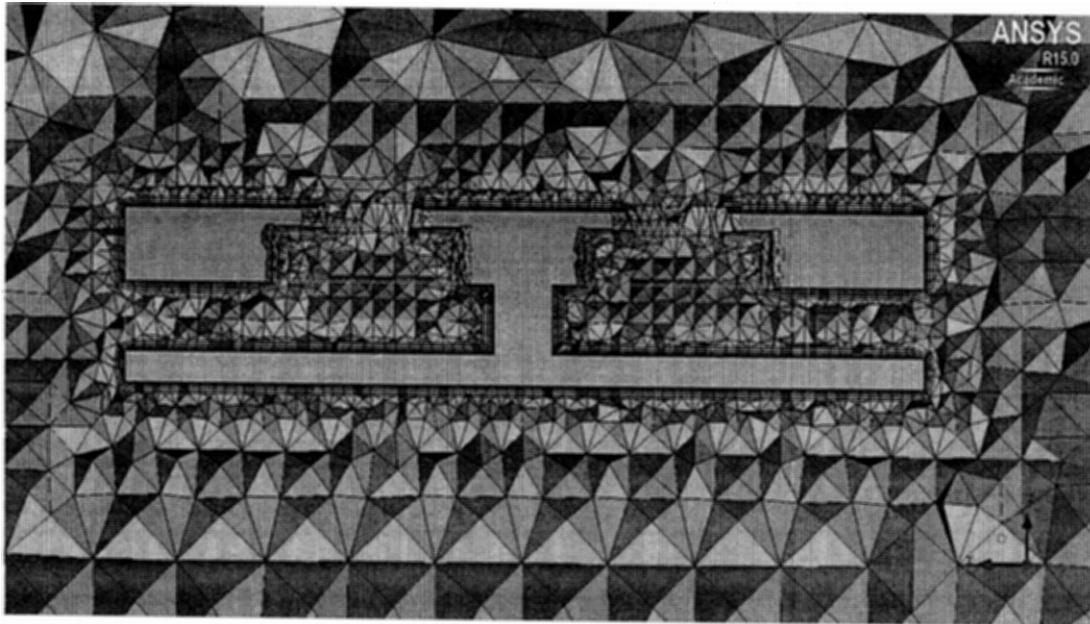


Figure 2.15: Volume Tetra angle maille non structurée sur la conception 3 - vue de côté

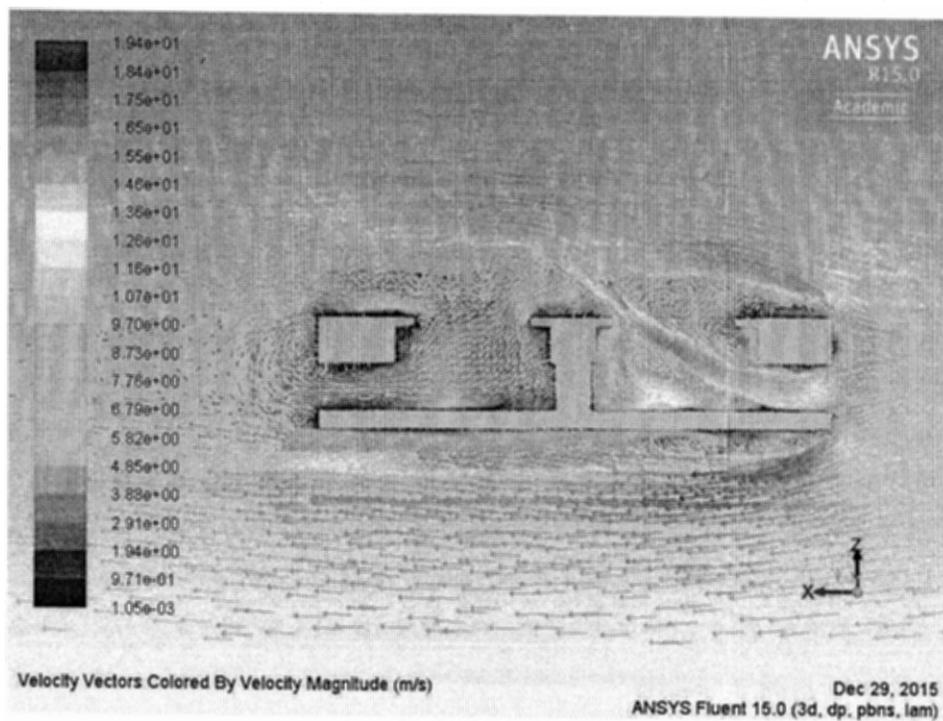


Figure 2.16: Conception 3 résultat de flux d'air vectoriel, vue de côté

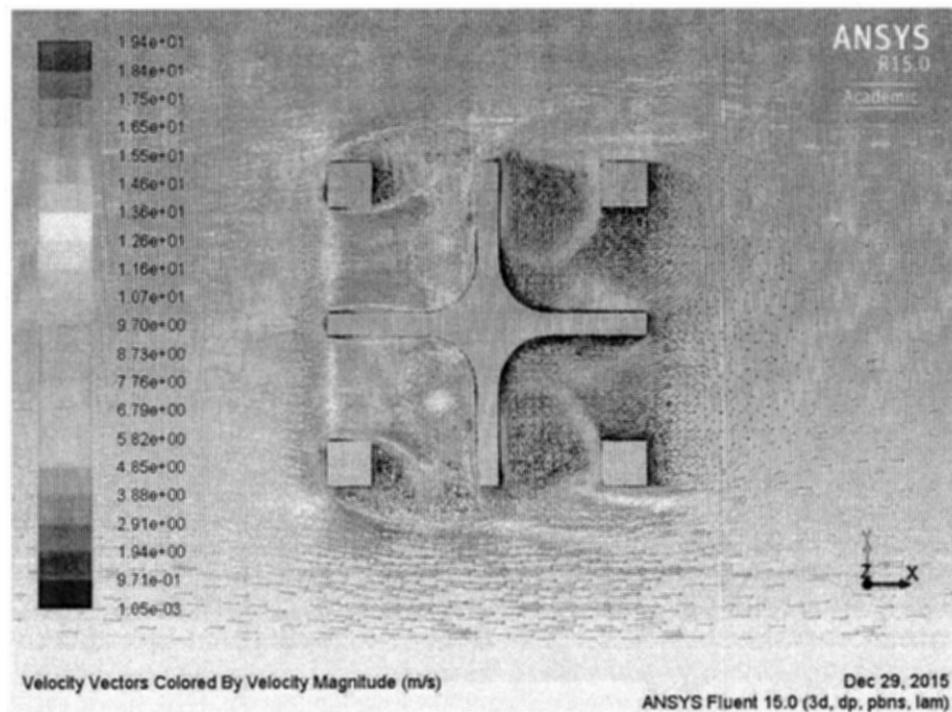


Figure 2.17: Résultat du flux d'air vectoriel concept 3, vue de dessus

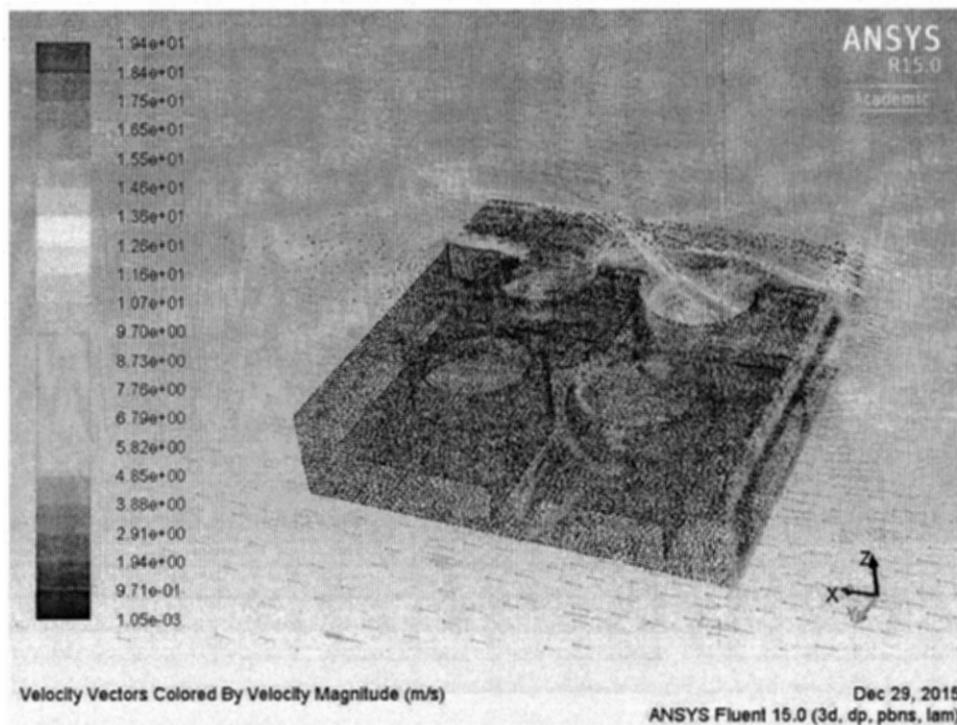


Figure 2.18: Résultat du flux d'air vectoriel Design 3, vue 3D, corps PAS inclus, résultat sur le plan Z

2.4 Concept 4

2.4.1 Modèle 4

À partir des résultats des trois conceptions précédentes, nous évaluons qu'il y avait quelques points qui pourraient être améliorés. Par exemple, en raison des larges entrées, il est possible que l'eau pénètre facilement dans le PAS. En outre, dans la troisième conception, il est possible que les milieux d'échantillonnage soient humidifiés dans des environnements pluvieux. Ensuite, le quatrième modèle a été conçu pour réduire la pénétration de l'eau dans le PAS et également pour améliorer la forme aérodynamique du PAS.

Le quatrième modèle se compose de deux parties séparées, la partie inférieure et la partie supérieure. Il y a un trapèze placé au milieu de la partie inférieure (Figure 2.19 d) qui contient le support d'échantillonnage d'une épaisseur maximale de 2 mm. Sur le côté avant de la partie inférieure, il y a une courbe semi-sphérique (Figure 2.19 b) qui: 1- absorbe l'air d'échantillonnage, 2- empêche l'eau de pénétrer à l'intérieur du PAS en augmentant l'épaisseur de l'entrée PAS et - dévier l'air d'admission vers la surface du support d'échantillonnage. De plus, deux canaux de sortie d'air étaient encastrés à l'arrière de l'appareil (Figure 2.19 a, d).

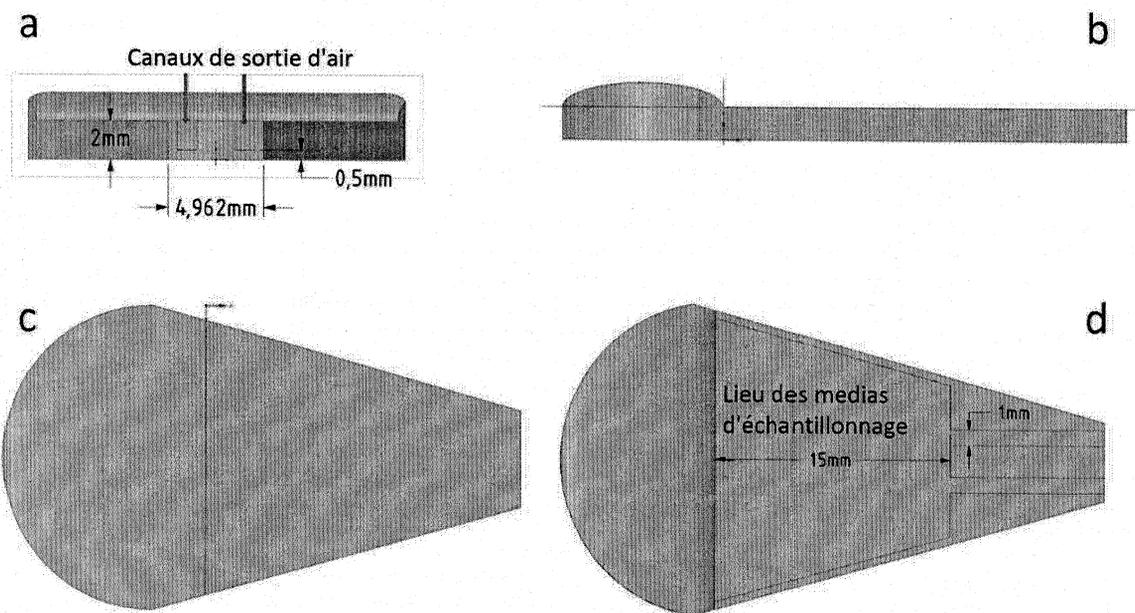


Figure 2.19: quatrième partie de conception PAS. (a) Vue arrière. (b) Vue latérale. (c) Vue de dessous. (d) Vue de dessus

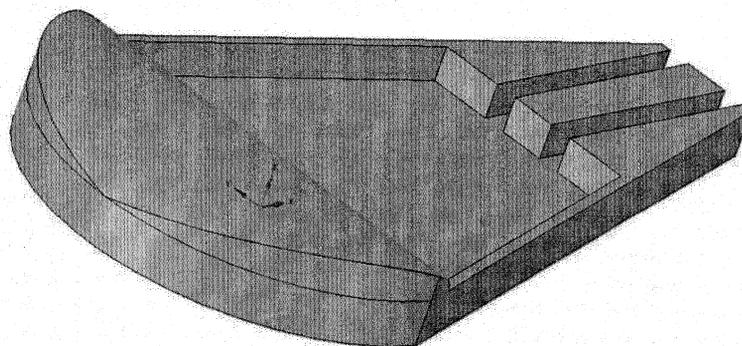


Figure 2.20: Vue 3D concept 4 PAS

La partie supérieure a été conçue comme une chambre qui: 1- recouvre la partie inférieure et les milieux d'échantillonnage; 2- avec son style de nervure, elle pourrait augmenter l'aérodynamique du PAS et 3- augmenter la pression de l'air intérieur en combinant sa

faible pente de l'avant vers l'arrière (Figure 2.21 b) et les canaux de sortie étroits sur la partie inférieure (Figure 2.19 a, d).

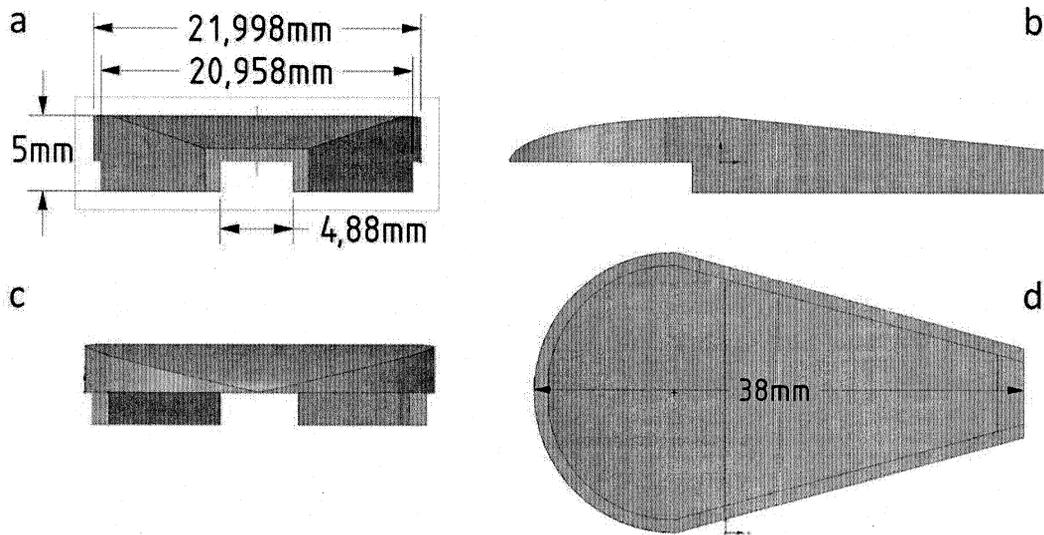


Figure 2.21: quatrième partie supérieure de conception PAS. (a) Vue arrière. (b) Vue latérale. (c) Vue de face. (d) Vue de dessous

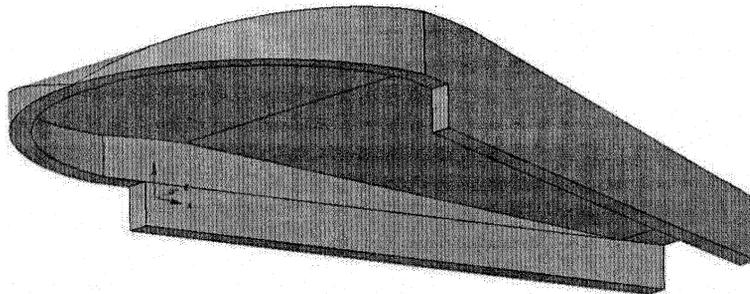


Figure 2.22: Partie supérieure vue 3D PAS conception 4

Après avoir placé le support d'échantillonnage à l'intérieur de la partie inférieure, la partie supérieure sera montée sur la partie inférieure et ils seront collés ensemble (Figure 2.23). L'entrée large, la pente douce et les trous étroits de sorties, augmenteront la pression d'air à

l'intérieur de la chambre. Plus de pression signifie une plus grande pénétration de l'air dans l'absorbeur et ceci peut également augmenter le taux d'échantillonnage du PAS.

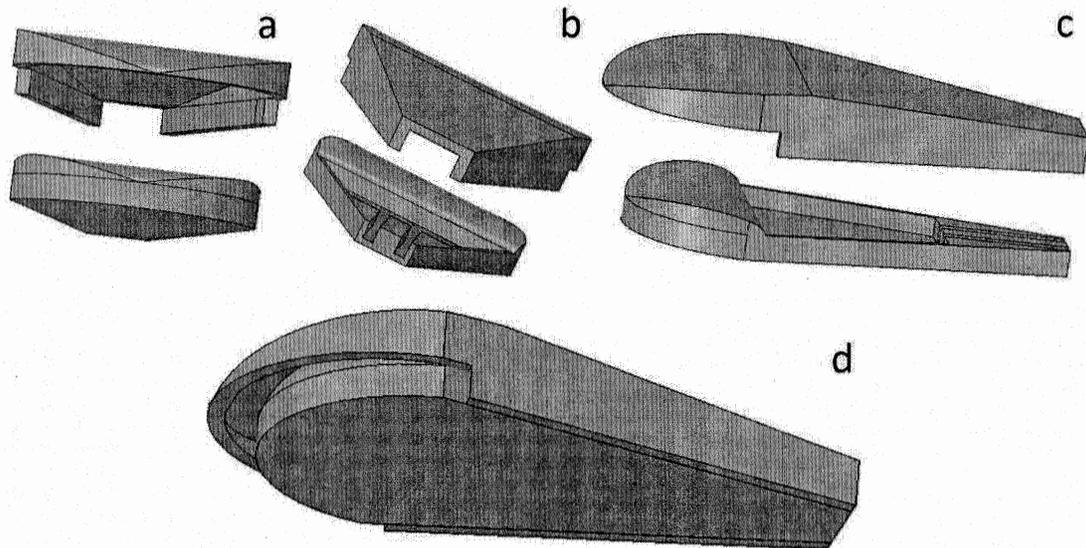


Figure 2.23: quatrième concept design pièces de positionnement en vue 3D. (a) Vue de face. (b) Vue arrière. (c) Vue latérale. (d) Complet et prêt à travailler PAS

2.4.2 Simulation de la conception 4

Comme prévu, les résultats de la simulation montrent que les modèles 4 et 1 sont plus aérodynamiques par rapport aux modèles précédents puisqu'ils peuvent traverser sans à-coup l'air avant sans augmenter l'air dévié (partie de l'air atteignant le corps PAS). (Figure 2.25). Comme cela est apparent dans cette simulation, la vitesse de la déviation a approximativement la même vitesse que l'air d'échantillonnage principal (vecteurs jaunes avec une vitesse de 15 m / s) après avoir heurté la face avant du PAS et cela est dû à la forme de nervure du PAS (Figure 2.26), il n'y a plus d'incrément de vitesse pour l'air dévié. L'air prélevé entre doucement dans le PAS et après avoir passé la petite courbe au-dessus du milieu d'échantillonnage, il descend (figure 2.25). Cela signifie que l'air introduit expose directement le support d'échantillonnage, puis quitte le PAS via les canaux de sortie. De plus, des canaux de sortie plus étroits provoquent une augmentation de la vitesse, ce qui

signifie plus de pression dans la chambre de l'échantillonneur, ce qui augmente l'exposition à l'air du milieu d'échantillonnage.

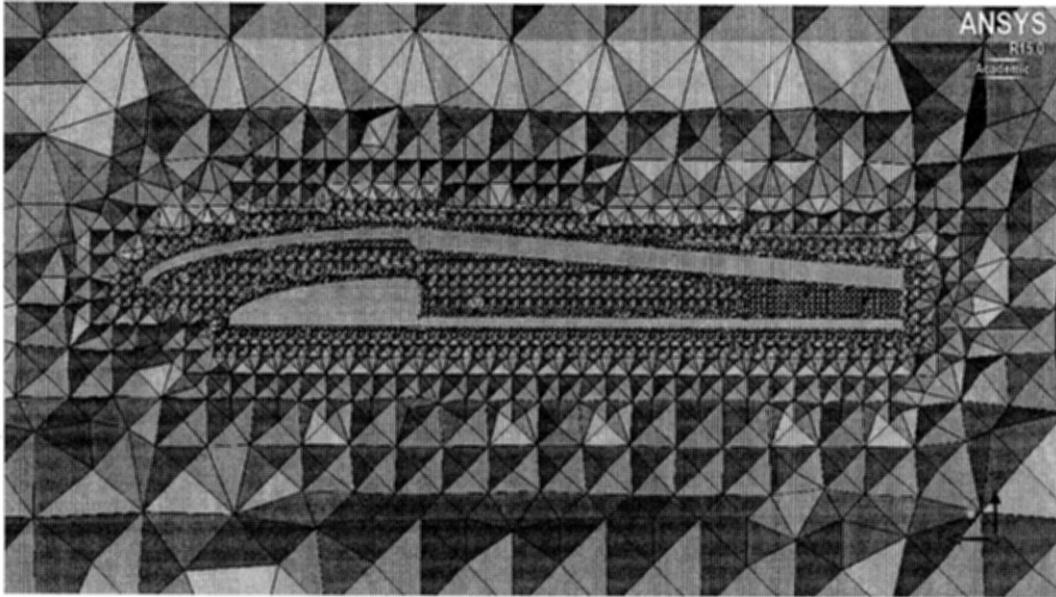


Figure 2.24: Volume Tetra angle maille non structurelle sur la conception 4, vue de côté

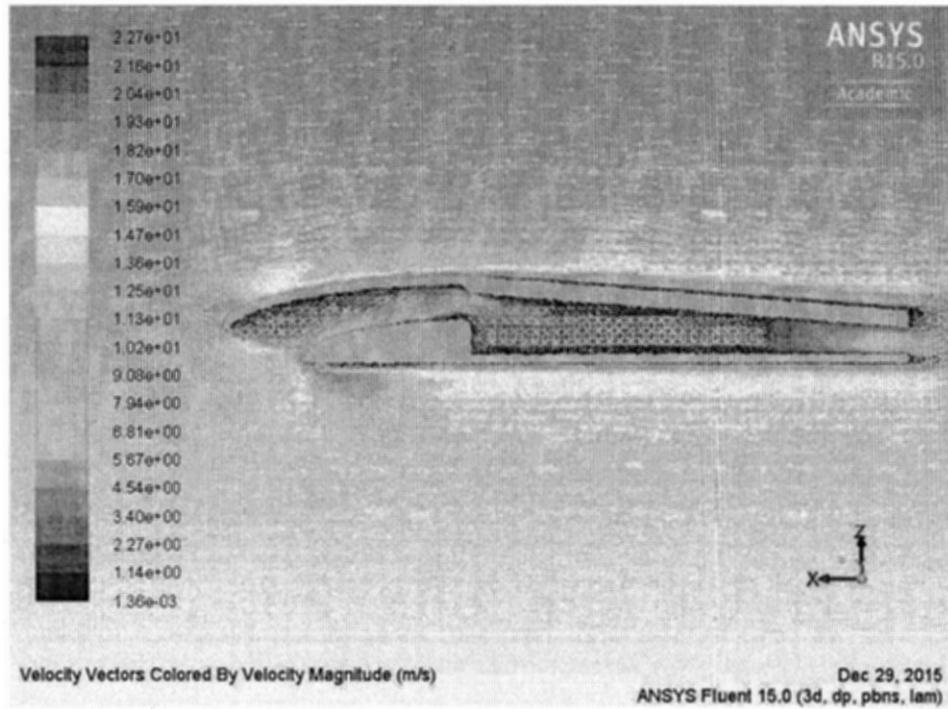


Figure 2.25: Conception 4 résultat du flux d'air vectoriel, vue de côté

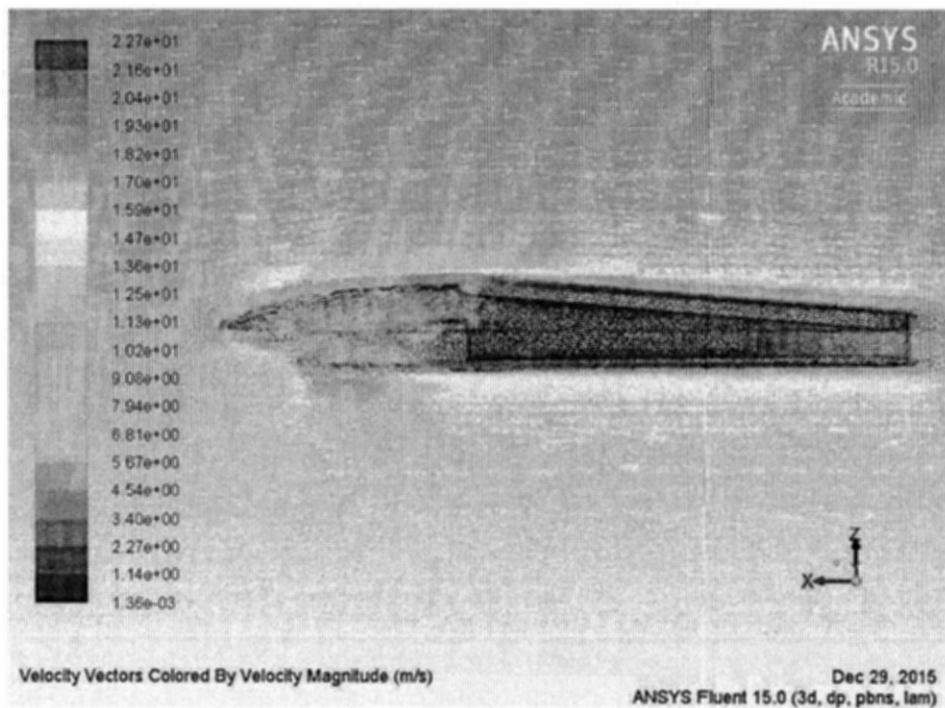


Figure 2.26: Conception 4 résultat du flux d'air vectoriel, vue 3D, corps PAS inclus

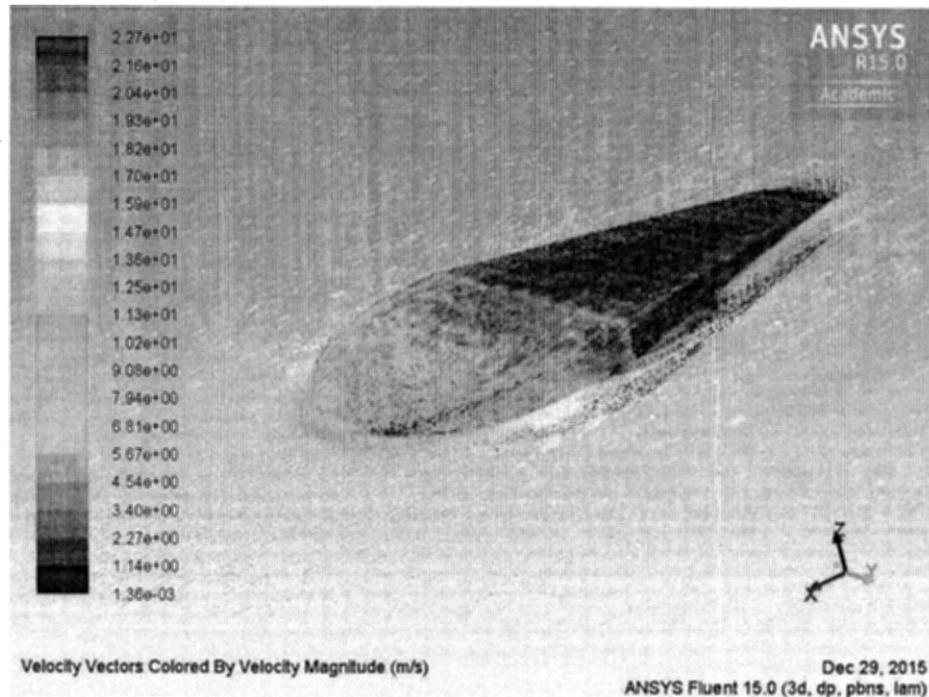


Figure 2.27: Design 4 : résultat du flux d'air vectoriel, vue 3D, corps PAS inclus

2.5 Concept 5

2.5.1 Modèle 5

2.5.1.1 Modèle 5-1

Le modèle 5 a été conçu sur la base des résultats des conceptions précédentes afin d'avoir un PAS qui sera capable de: 1-absorber autant de volume d'air que possible de toutes les directions, 2- être capable de protéger tous les milieux intérieurs contre l'exposition directe à l'eau et la lumière du soleil, 3- ont un support d'échantillonnage unique avec une plus grande surface active au lieu de plusieurs petits médias de surface qui nous aide à avoir les mêmes conditions d'exposition à tous les milieux d'échantillonnage pour une meilleure analyse, 4- être aérodynamique et 5- protéger l'échantillonnage les médias de l'exposition directe à l'air à grande vitesse pendant le vol des oiseaux.

Dans la cinquième conception, le motif PAS a été changé en une forme circulaire (Figure 2.28, 2.30). Il se compose de deux parties séparées comme pour la conception quatre. Le milieu d'échantillonnage serait placé au centre de la partie inférieure tandis que 5 petites épingles (2 mm de hauteur) (Figure 2.28 a, 2.29) le soutiendraient et le garderaient assez haut du plancher PAS pour une meilleure circulation de l'air. Quatre supports de $2,5 \times 4$ mm étaient considérés comme tenant la partie supérieure. Sous chacun d'entre eux, un canal a été conçu comme un trou de sortie d'air. Un filet de 2 mm a été utilisé pour courber la paroi interne du PAS pour une meilleure circulation de l'air sous le milieu d'échantillonnage.

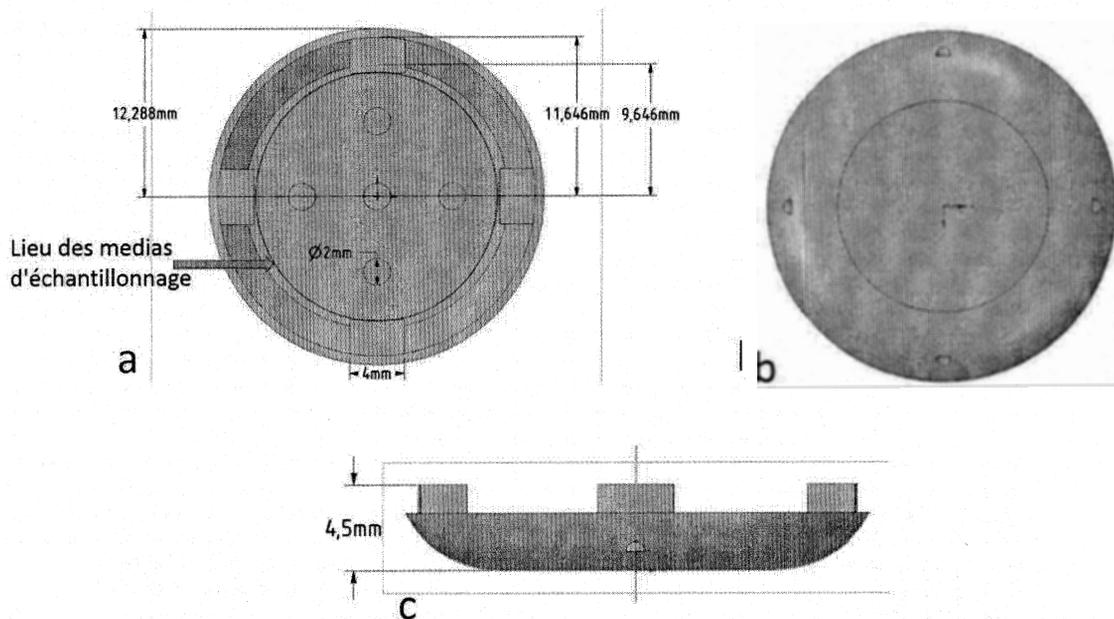


Figure 2.28: cinquième concept (5-1) de PAS, partie inférieure du design. (a) Vue de dessus. (b) Vue de dessous. (c) Vue de côté

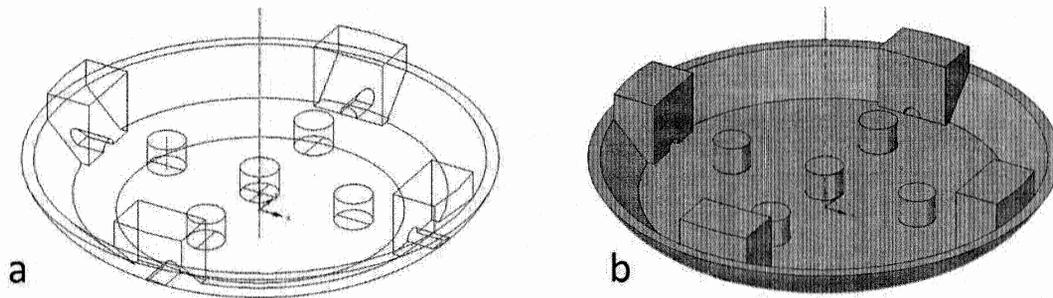


Figure 2.29: PAS cinquième (5-1) concept design partie inférieure vue 3D. (a) Vue câblée. (b) Vue ombrée. Notez que la vue câblée n'est fournie que pour une meilleure imagination.

La même forme a été utilisée pour concevoir la partie supérieure. La partie supérieure doit être conçue de manière à pouvoir recouvrir la partie inférieure et protéger les milieux internes de l'air à haute vitesse tout en laissant entrer de l'air à faible vitesse dans le PAS.

Dans ce cas, le diamètre de la partie supérieure doit être conçu plus grand que la partie inférieure (Figure 2.30 a, 2.28 a). Cela créera des espaces vides entre les deux parties qui agiront comme une entrée d'air. Afin de protéger les milieux d'échantillonnage de l'air à haute vitesse, la hauteur des quatre supports a été maintenue à l'intérieur de la partie supérieure (figure 2.31). Cela amènera la partie inférieure (afin d'être collés ensemble) à l'intérieur de la partie supérieure et cela fait un certain chevauchement entre les deux parties. Pour compléter l'assemblage PAS, la partie inférieure doit être collée sur les quatre supports internes, situés dans la partie supérieure, en utilisant la colle sans HFR (HFR: ignifugeants halogénés) pour garantir que le milieu d'échantillonnage est exempt de contamination HFR pendant le processus de préparation.

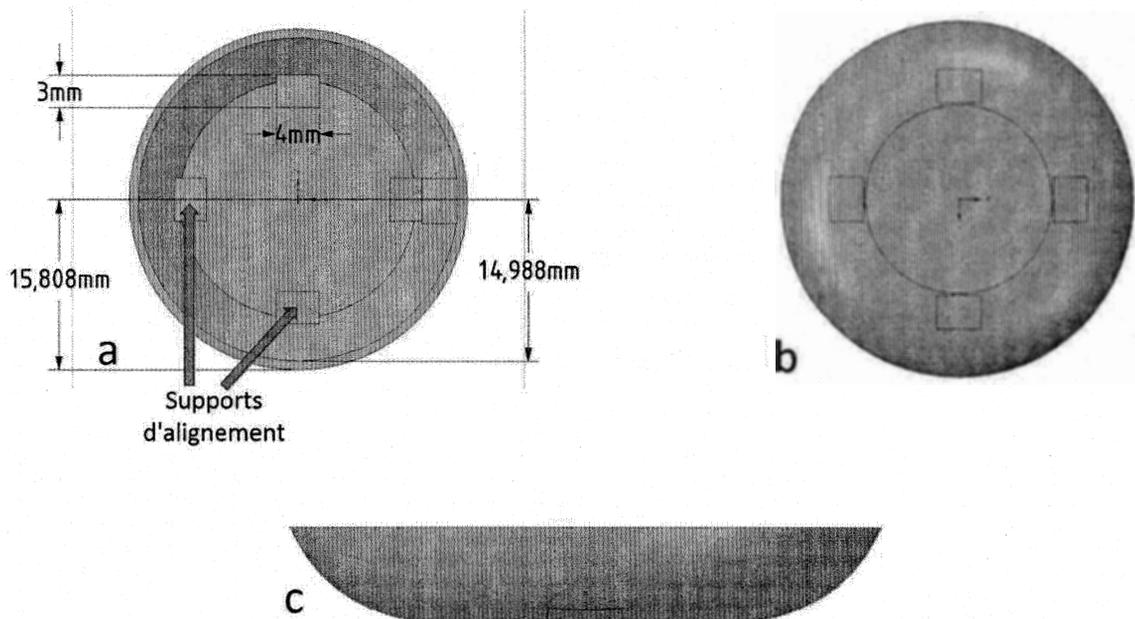


Figure 2.30: cinquième (5-1) concept partie supérieure du design. (a) Vue de dessus. (b) Vue de dessous. (c) Vue de côté

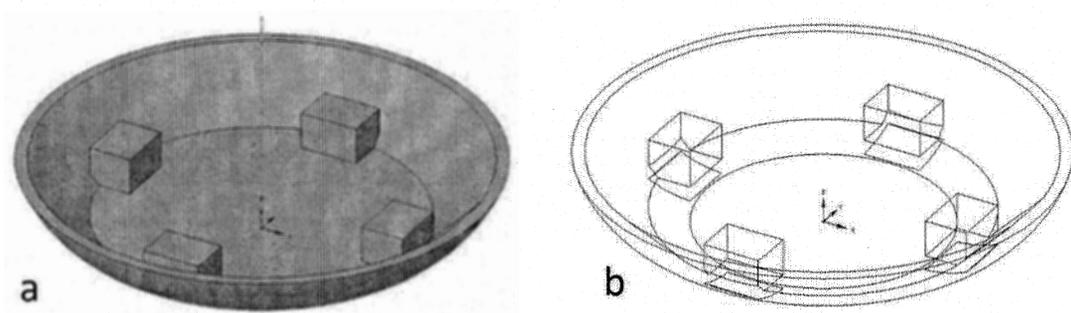


Figure 2.31: cinquième cinquième concept design partie inférieure vue 3D. (a) Vue ombragée. (b) Vue câblée

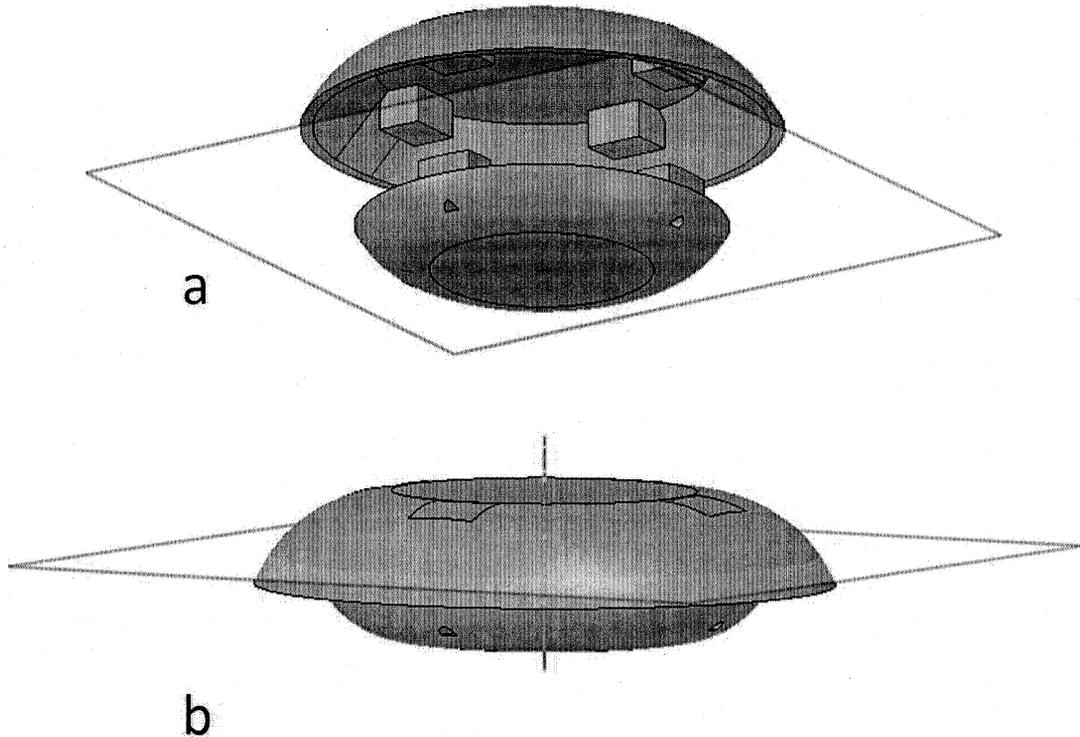


Figure 2.32: PAS cinquième concept design pièces de positionnement en vue 3D. (a) Vue d'ensemble avant le collage. (b) Complet et prêt à travailler

2.5.1.2 Modèle 5-2

Alors que dans la conception 5-1- la partie inférieure remplit la plupart des exigences PAS, il pourrait encore y avoir quelques améliorations. Les idées venaient de nos collaborateurs du département de biologie, et elles étaient liées aux plumes de l'oiseau.

Le PAS complet doit être collé sur un substrat en plastique pour être monté sur les oiseaux. Cependant, en raison de sa faible épaisseur, il est possible que les plumes d'oiseaux recouvrent le PAS et empêchent l'air d'entrer dans le PAS.

Pour résoudre le problème des plumes, l'épaisseur de la partie inférieure du PAS 5-1 a augmenté. Cela rendra le PAS suffisamment élevé pour empêcher les plumes de le recouvrir. De plus, afin de chasser l'eau introduite dans le PAS, quatre autres trous de sortie d'eau ont été ajoutés à la partie inférieure (Figure 2.33, 2.34) afin de réduire les effets

possibles de l'eau sur les milieux d'échantillonnage. Après toutes ces modifications, le PAS final devient 8 mm plus épais que le modèle précédent (Figure 2.35).

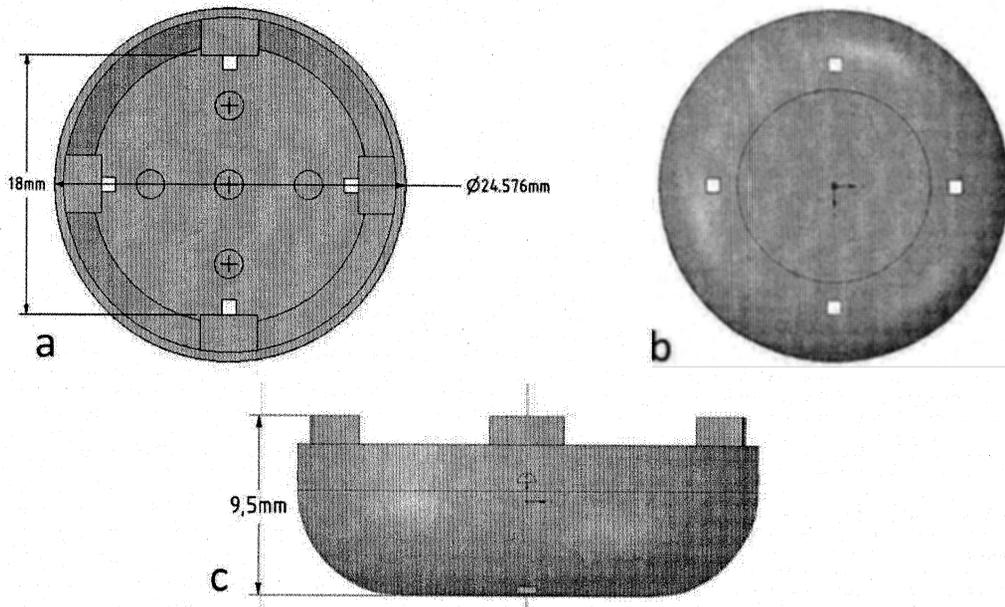


Figure 2.33: cinquième (5-2) partie inférieure de concept design. (a) Vue de dessus. (b) Vue de dessous. (c) Vue de côté

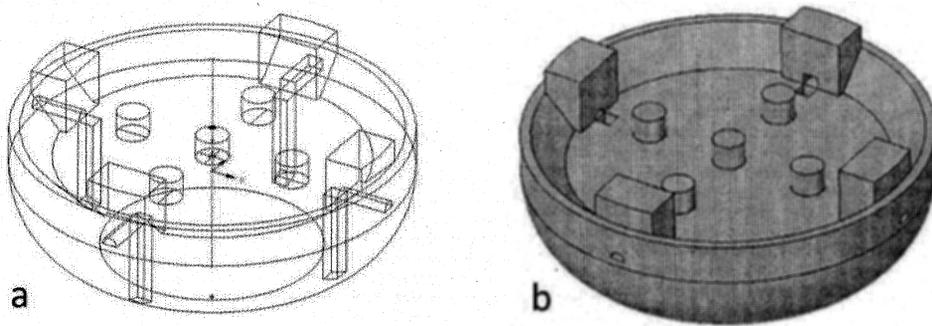


Figure 2.34: cinquième (5-1) concept design partie inférieure vue 3D. (a) Vue câblée. (b) Vue ombragée

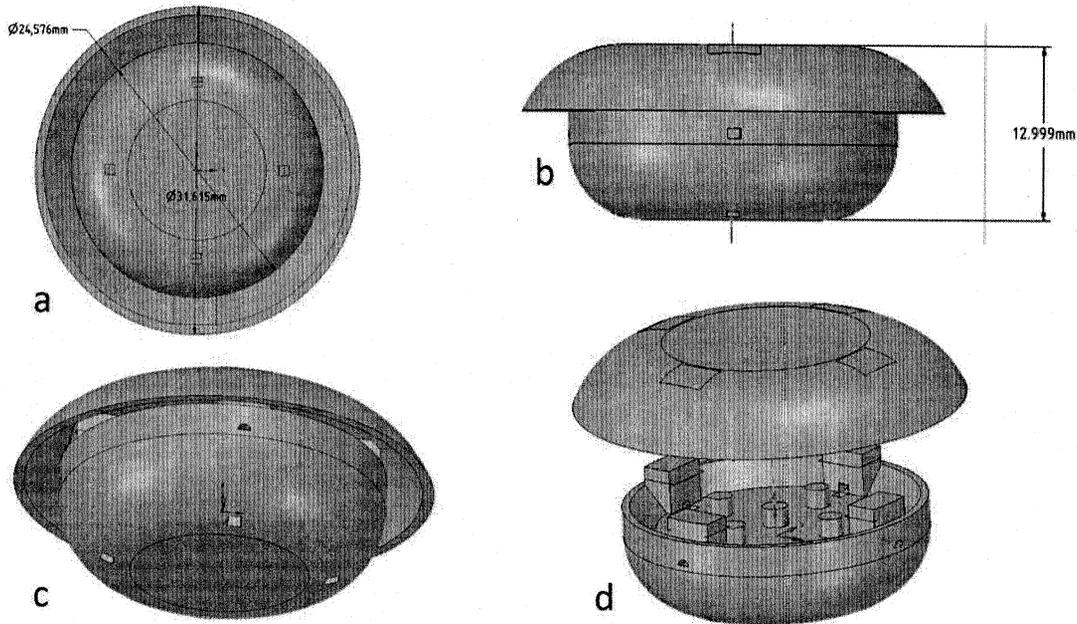


Figure 2.35: cinquième concept : pièces de positionnement en vue 3D. (a) Compléter la vue du fond du PAS, montrant l'espace d'entrée d'air entre deux parties. (b) Compléter l'épaisseur finale du PAS assemblé. (c) Compléter la vue 3D globale de PAS. (d) Positionnement 3D de la partie inférieure et supérieure pour l'assemblage

2.5.2 Simulation de la conception 5

Puisque la partie inférieure de la conception 5-1 n'était pas acceptable en raison de sa faible épaisseur, seule la conception 5-2 a été simulée. Les résultats sont montrés dans les figures 2.37, 2.38. Comme on peut le voir sur les figures, l'air échantillonné entre dans le PAS avec une vitesse d'environ 13 m / s. Après avoir touché la partie supérieure (Figure 2.38), il atteint une circulation douce à l'intérieur du PAS avec une vitesse comprise entre 1 et 5 m/s (Figure 2.38, 2.39). Ensuite, il sort du PAS par les trous de sortie situés autour et au bas de l'appareil. De plus, nous pouvons voir sur la figure 2.37 que le trou de sortie avant génère une petite turbulence sous le support d'échantillonnage. Cet effet devrait être évité. Comme le montre la figure 2.37, il y a une turbulence de l'air où les deux parties sont connectées en raison de l'impact de l'air dans l'espace bloqué. Cela pourrait provoquer la séparation des

pièces dans des conditions de vitesse de l'air élevée. De plus, la vitesse de l'air autour du PAS est augmentée à 20 m / s après les impacts sur le haut et le bas du PAS, tandis que l'air entrant à gauche et à droite du PAS a approximativement la même vitesse (Figure 2.38, 2.39) .

Sur la base des résultats des simulations, certaines modifications doivent être apportées à cette conception de PAS afin de réduire la vitesse de l'air entrant dans le PAS, de réduire les effets turbulents sur le support avant et d'éliminer les turbulences sous les supports d'échantillonnage. et pour empêcher l'accélération de la vitesse de l'air.

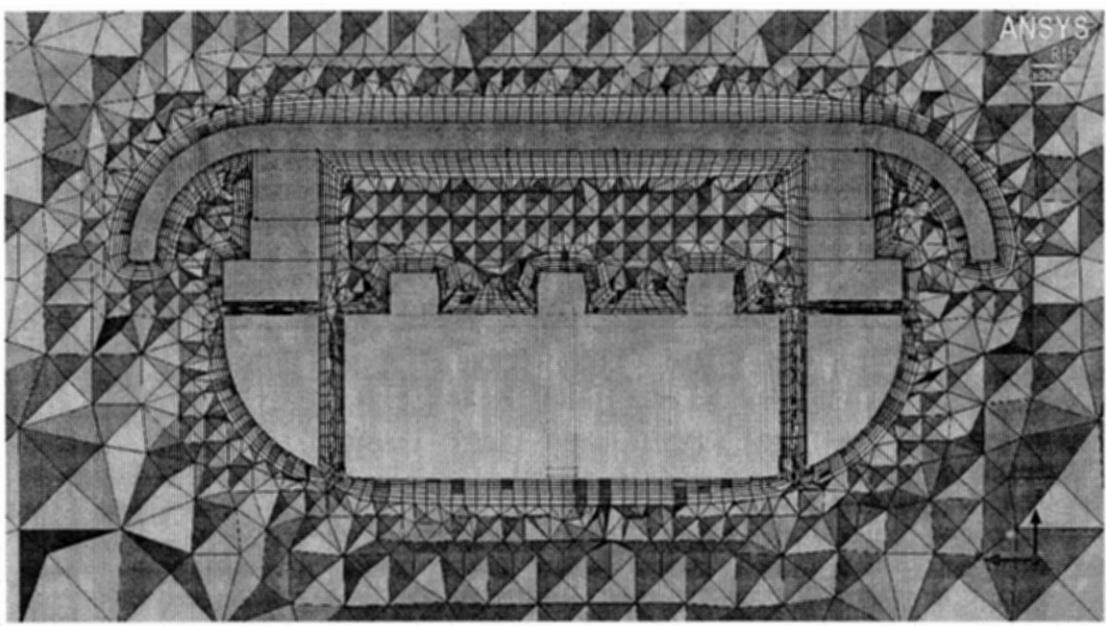


Figure 2.36: Volume Tetra angle maille non structurale sur la conception 5, vue de côté

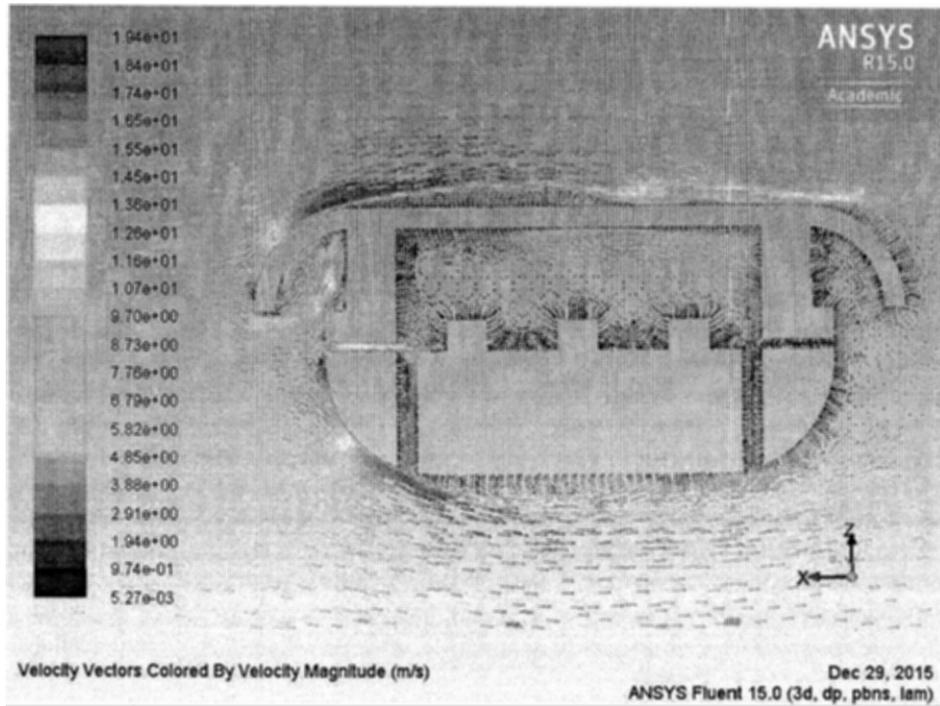


Figure 2.37: Conception 5 résultat du flux d'air vectoriel, vue de côté, supports inclus

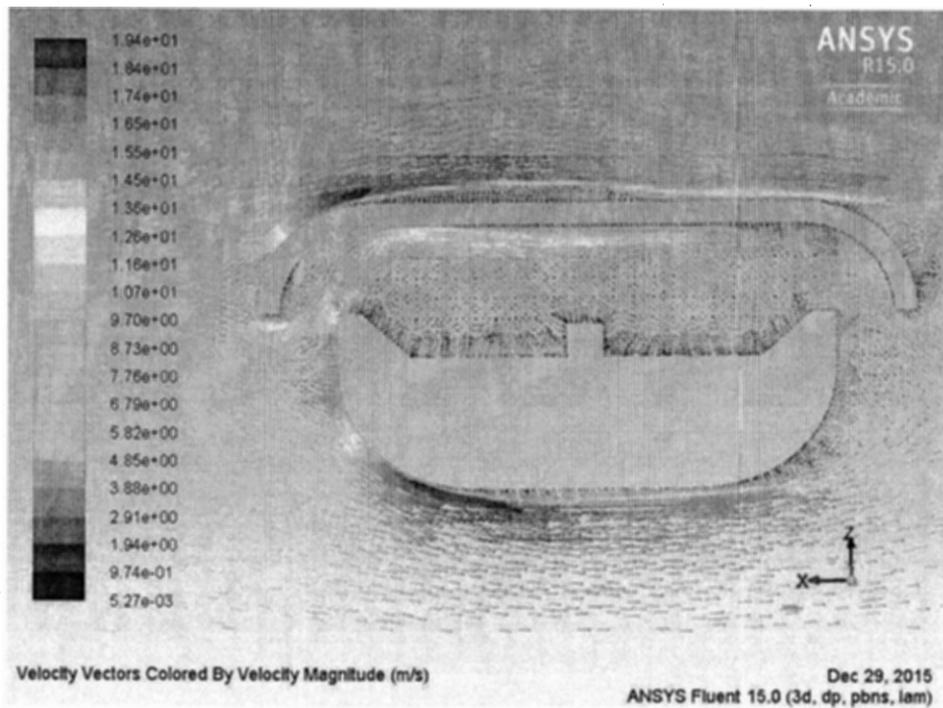


Figure 2.38: Conception 5 résultat de flux d'air vectoriel, vue de côté, espace compris

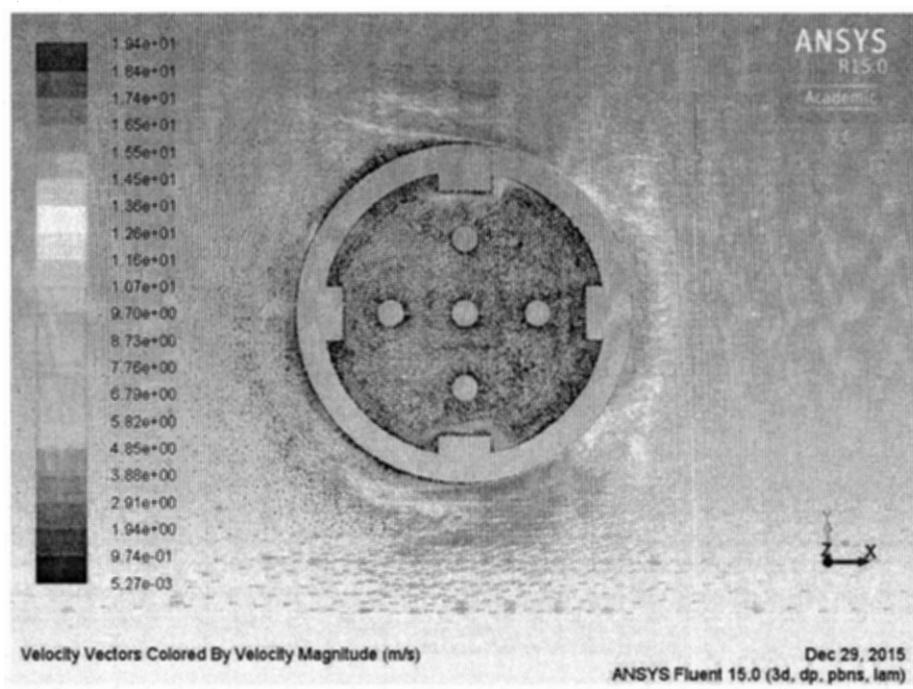


Figure 2.39: Conception 5 résultat de flux d'air vectoriel, vue de dessus, résultats sur le plan Z au milieu du PAS

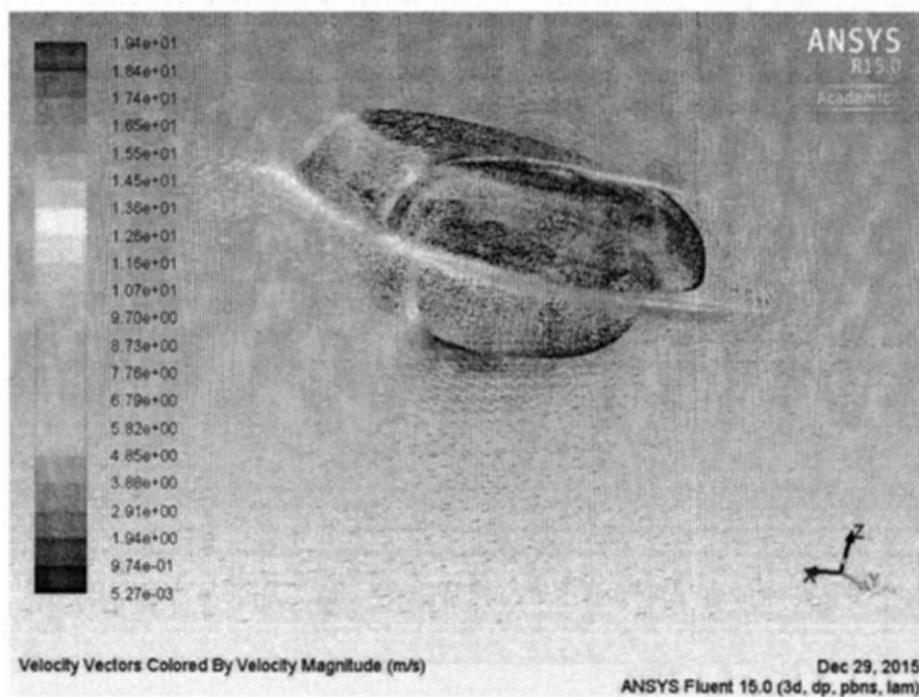


Figure 2.40: Conception 5 résultat de flux d'air vectoriel, vue 3D, corps PAS inclus, résultats sur plan Y et Z

2.6 Concept 6

2.6.1 Modèle 6

Même si la conception 5 couvrait la plupart des exigences du PAS, des améliorations pourraient néanmoins être apportées en fonction des résultats de la simulation. Selon les résultats de la simulation, l'air entrant frappe la partie supérieure de l'appareil avec approximativement la même vitesse qu'avant l'entrée. Si cette vitesse pouvait être réduite, cela pourrait être utilisé comme un avantage pour augmenter la surface active des milieux d'échantillonnage. Cela augmenterait le taux d'échantillonnage du PAS et pourrait aider à une meilleure analyse. De plus, une nouvelle suggestion est venue de nos collaborateurs à propos d'une option pour un meilleur montage de PAS qui pourrait être envisagée. Au lieu de coller le PAS complet sur un substrat pour l'installation sur les oiseaux, il pourrait être plus efficace de modifier la conception 5 de manière à ce que le dispositif puisse être serré autour de l'oiseau en utilisant du ruban Teflon plutôt que de le coller sur un autre substrat.

Pour répondre aux nouvelles exigences, plusieurs modifications ont été apportées à la conception 5. La taille maximale de toutes les conceptions antérieures était basée sur les contraintes de physiologie des oiseaux rapportées par nos collègues du département de biologie. Cela signifie que la largeur maximale du PAS ne peut pas dépasser 30 mm. Ensuite, le motif 5 a été conçu pour avoir la même taille dans toutes les directions. Cependant, après avoir examiné le motif 5 et basé sur la physiologie de l'oiseau, les biologistes ont déterminé que la taille maximale pouvait être augmentée à 45 mm, mais seulement le long du corps de l'oiseau. Pour mettre en œuvre la nouvelle suggestion, la forme circulaire de la conception 5 a été changée en une forme elliptique (Figure 2.41). Cette nouvelle forme a été choisie de manière à réduire la vitesse de l'air dévié autour du corps du PAS. Cette modification de forme pourrait également entraîner une augmentation de la surface active du milieu d'échantillonnage. De plus, l'épaisseur de la partie supérieure a été augmentée à 2 mm, ce qui permet de placer un deuxième support d'échantillonnage

dans la partie supérieure de l'appareil avec la même taille que le support d'échantillonnage dans la partie inférieure. Cette couche supplémentaire de milieu d'échantillonnage pourrait doubler la surface active du milieu d'échantillonnage (figure 2.43). De plus, afin de réduire la vitesse de l'air entrant, la partie supérieure a été modifiée de manière à pouvoir couvrir 1 mm de la partie inférieure d'où ils doivent être reliés ensemble (Figure 2.45 C, D). Cela a été fait en réduisant la hauteur des supports (ceux qui servent à aligner et à connecter la partie supérieure à la partie inférieure) et cela amène la partie inférieure à venir plus à l'intérieur de la partie supérieure pour entrer en contact avec elle pour le processus d'assemblage.

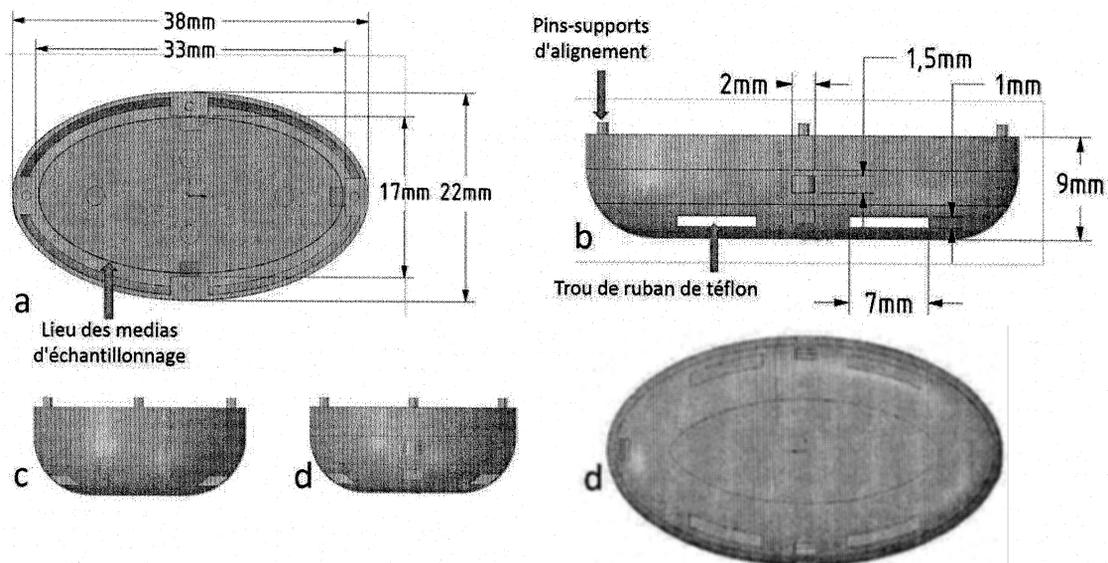


Figure 2.41: partie inférieure du concept 6. (a) Vue de dessus. (b) Vue latérale. (c) Vue de face. (d) Vue arrière. (e) Vue de dessous

Quatre broches et trous (Figure 2.42, 2.44) (1 mm de hauteur et 0,5 mm de diamètre) avec les mêmes coordonnées ont été considérés sur les supports de la partie inférieure et supérieure. Afin de coller la partie supérieure à la partie inférieure, les broches doivent être insérées dans les trous correspondants. Dans ce cas, les deux parties seraient collées

exactement là où elles le devraient sans avoir besoin d'utiliser un système d'alignement de montage de haute précision.

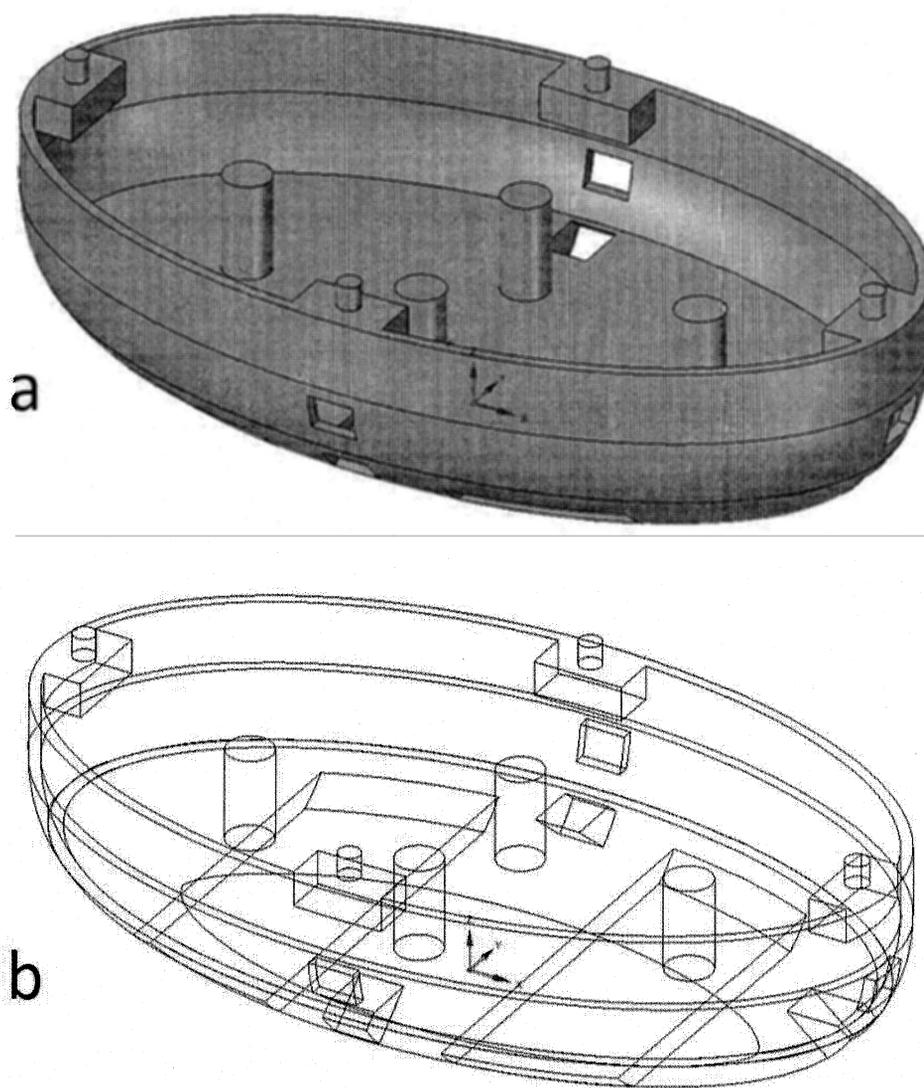


Figure 2.42 :Partie inférieure vue 3D du concept 6 de PAS. (a) Vue ombragée. (b) Vue câblée

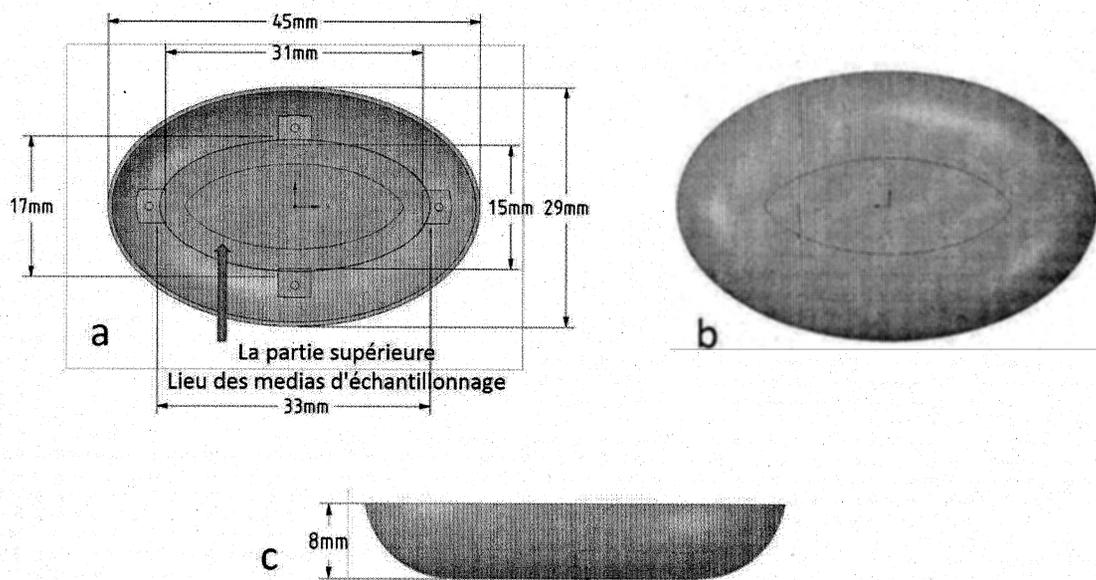


Figure 2.43: Partie supérieure du concept 6. (a) Vue de dessus. (b) Vue de dessous. (c) Vue de côté

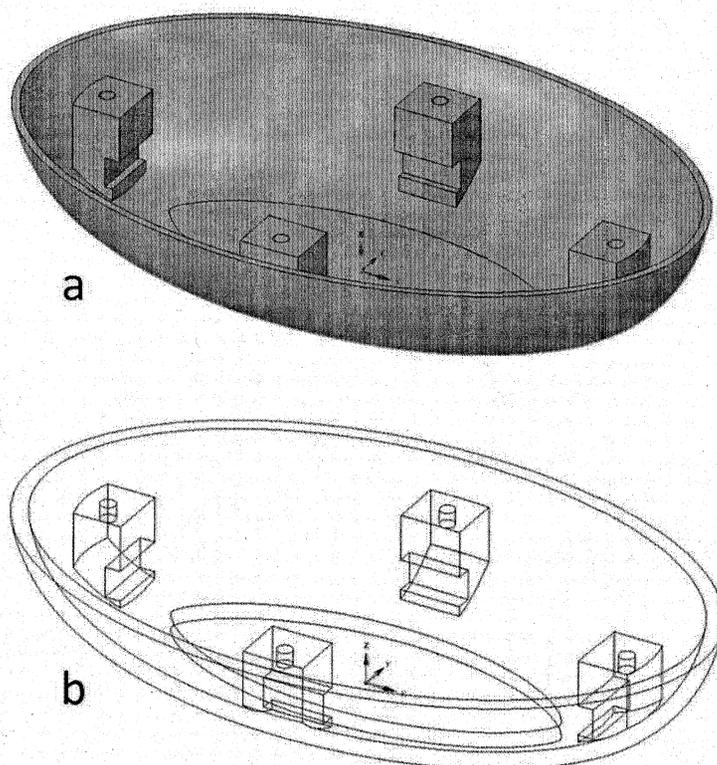


Figure 2.44: Partie supérieure vue 3D du sixième concept de PAS. (a) Vue ombragée. (b) Vue câblée

Lorsque l'épaisseur de la partie inférieure a été augmentée pour éviter que les plumes recouvrent le PAS, une structure inutilisée a été créée. Ces espaces ont été utilisés pour implémenter deux canaux séparés au bas du PAS. Ces canaux pourraient être utilisés pour monter le PAS sur le dos des oiseaux en utilisant des rubans en téflon.

De plus, la taille des trous de sortie d'air a été augmentée pour permettre une meilleure circulation de l'air. En outre, le trou de sortie d'air avant a été retiré pour empêcher l'entrée d'air à haute vitesse dans le PAS (Figure 2.41 b), ce qui provoquera une certaine turbulence sous le milieu d'échantillonnage.

Enfin, trois trous de sortie d'eau ont été implantés près des trous de sortie d'air avec une pente de 30 degrés pour une meilleure évacuation de l'eau. Leur taille a également été augmentée pour empêcher les canaux d'être obstrués par du sable probable trouvé dans l'environnement des oiseaux (Figure 2.41 b).

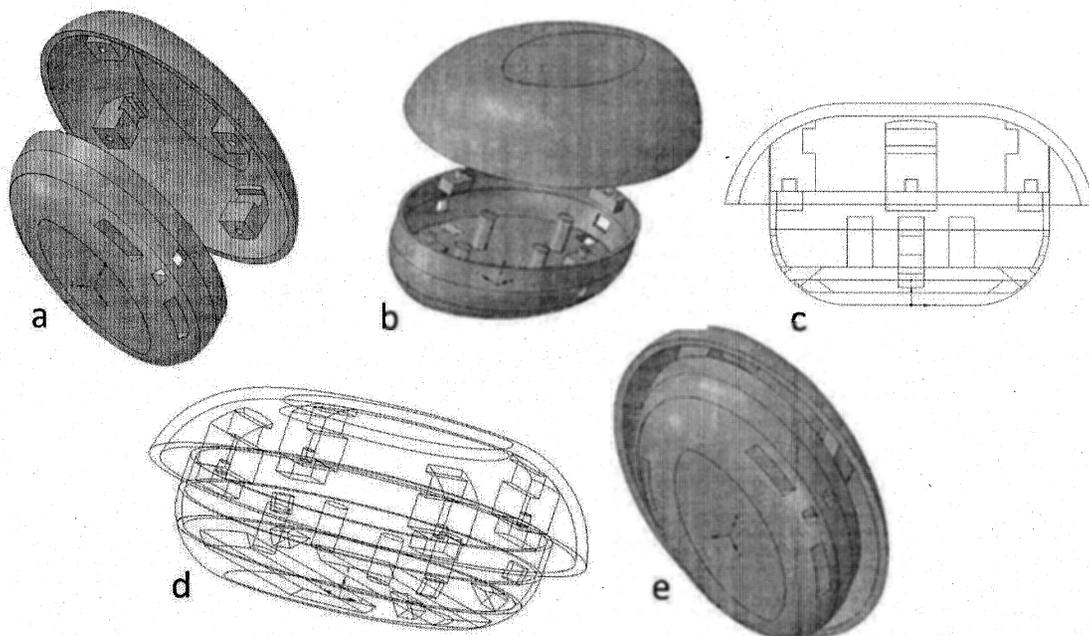


Figure 2.45: PAS sixième concept : pièces de positionnement en vue 3D. (a) Vue de face (à l'intérieur - positionnée en haut). (b) Vue de face (à l'intérieur du bas - positionnée). (c) vues câblées à l'avant (pièces assemblées). (d) Vue 3D câblée (pièces assemblées). (e) Vue d'ensemble (pièces assemblées)

2.6.2 Simulation de la conception 6

La simulation du PAS final modifié (conception 6) montre les avantages de toutes les modifications apportées à la conception 5. La vitesse de l'air d'échantillonnage introduit est réduite à environ 6 m / s sur la partie supérieure et à environ 2 m/s sur la partie inférieure (Figure 2.46, 2.47). Dans ce cas, le nouveau milieu d'échantillonnage a la bonne position sur la partie supérieure car l'air d'échantillonnage peut directement la traverser et faire ensuite une autre circulation à travers le premier milieu d'échantillonnage sur la partie inférieure. En enlevant le trou de sortie avant, aucune turbulence observée sous le milieu d'échantillonnage PAS. En outre, l'augmentation de la taille des trous de sortie conduit à une meilleure circulation de l'air à l'intérieur du PAS (Figure 2.49, 2.47). De plus, la nouvelle forme de PAS diminue la vitesse de l'air dévié de la plupart des parties du PAS par rapport à ce qui a été observé pour la conception 5 (Figure 2.50, 2.51). Cela signifie qu'une meilleure forme aérodynamique a été obtenue.

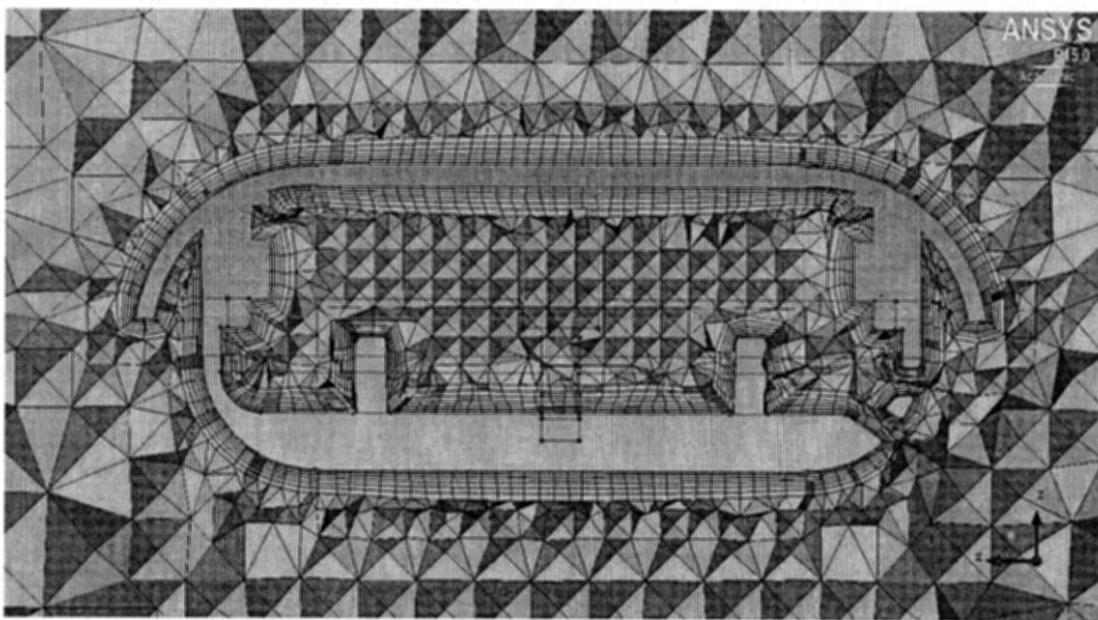


Figure 2.46: Volume Tetra angle maille non structurée sur la conception 6, vue de côté

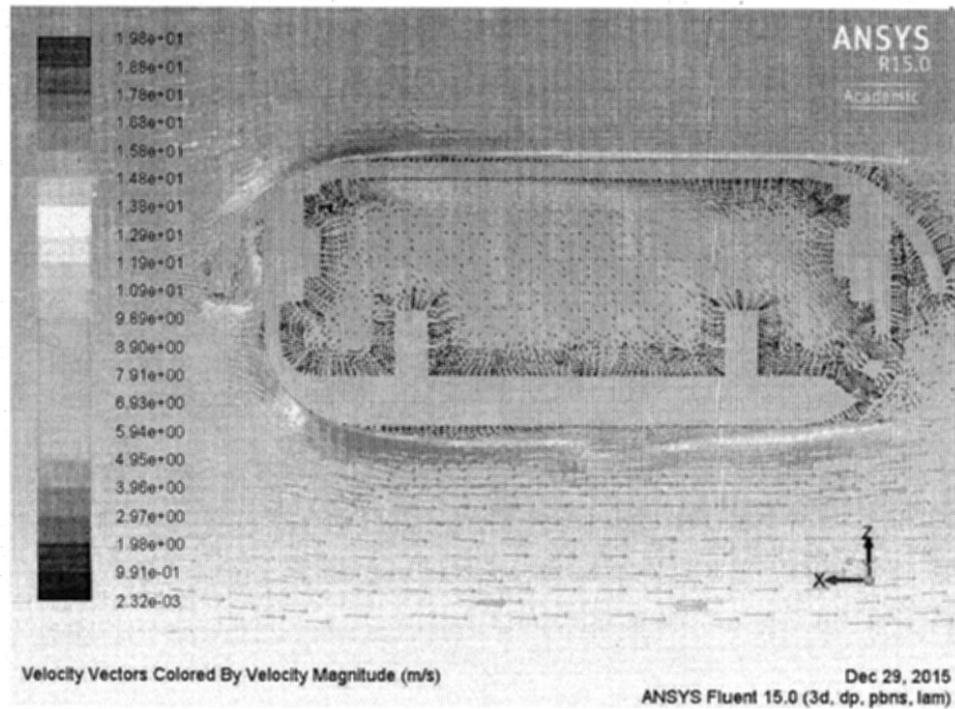


Figure 2.47: Conception 6 : résultat du flux d'air vectoriel, vue de côté, supports inclus

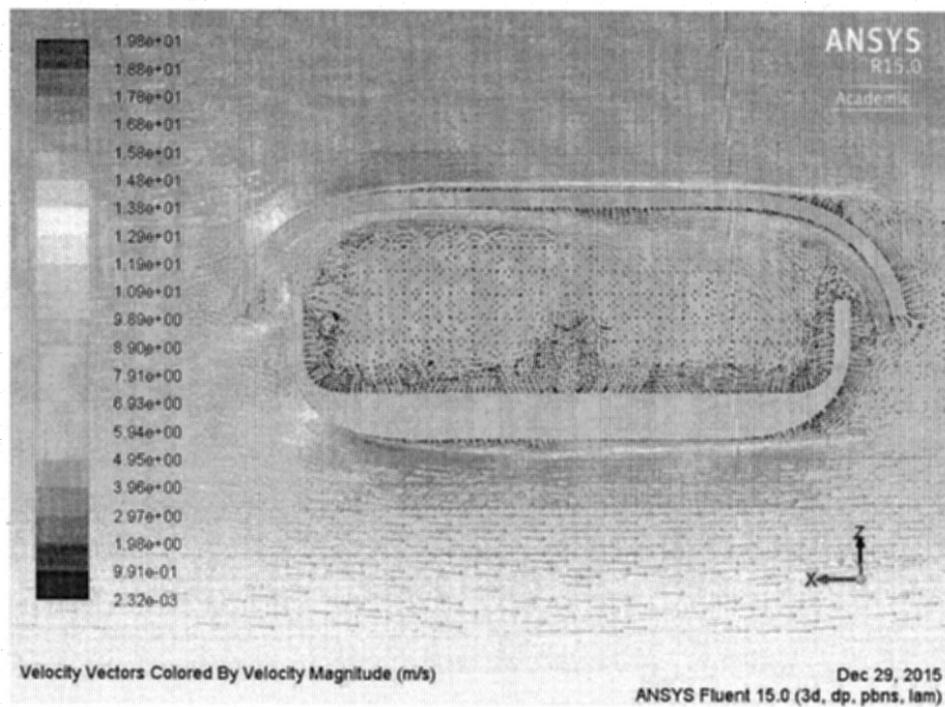


Figure 2.48: Conception 6 : résultat du flux d'air vectoriel, vue de côté, espace compris

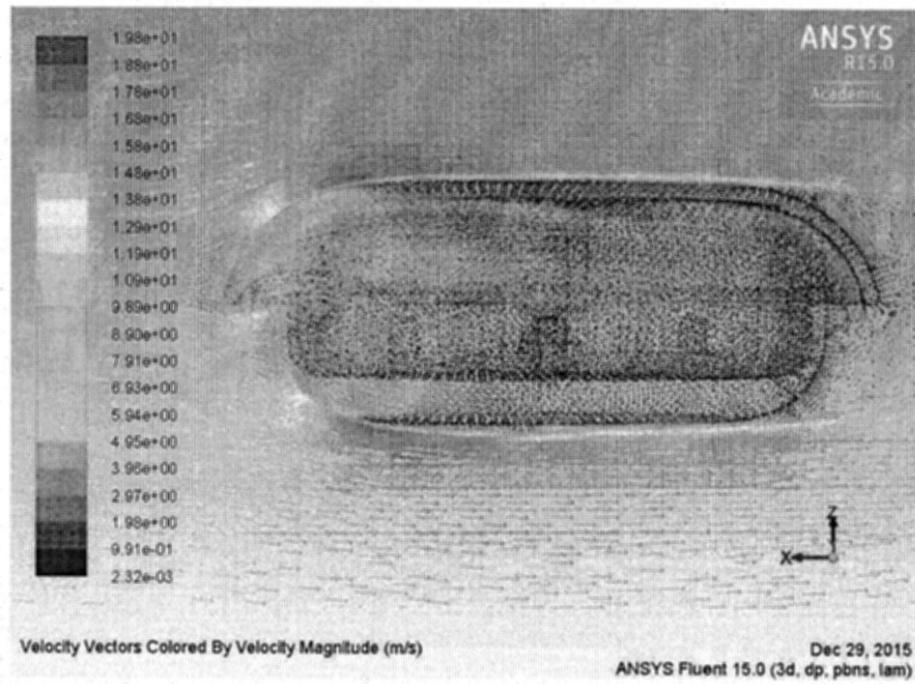


Figure 2.49: Conception 6 résultat de flux d'air vectoriel, vue latérale 3D

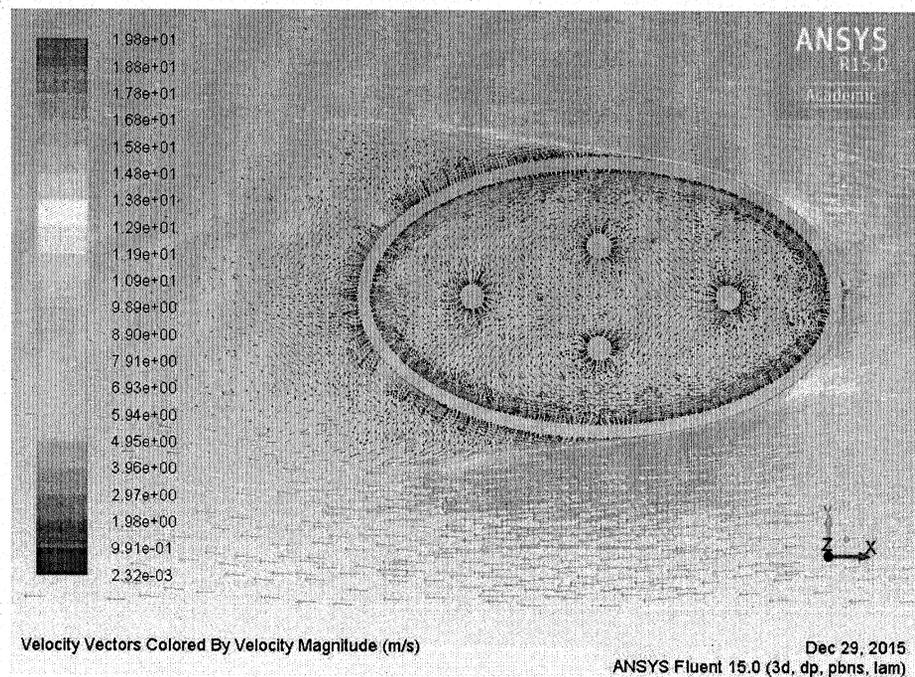


Figure 2.50: Conception 6 résultat du flux d'air vectoriel, vue de dessus, résultats sur le plan Z au milieu du PAS, partie inférieure

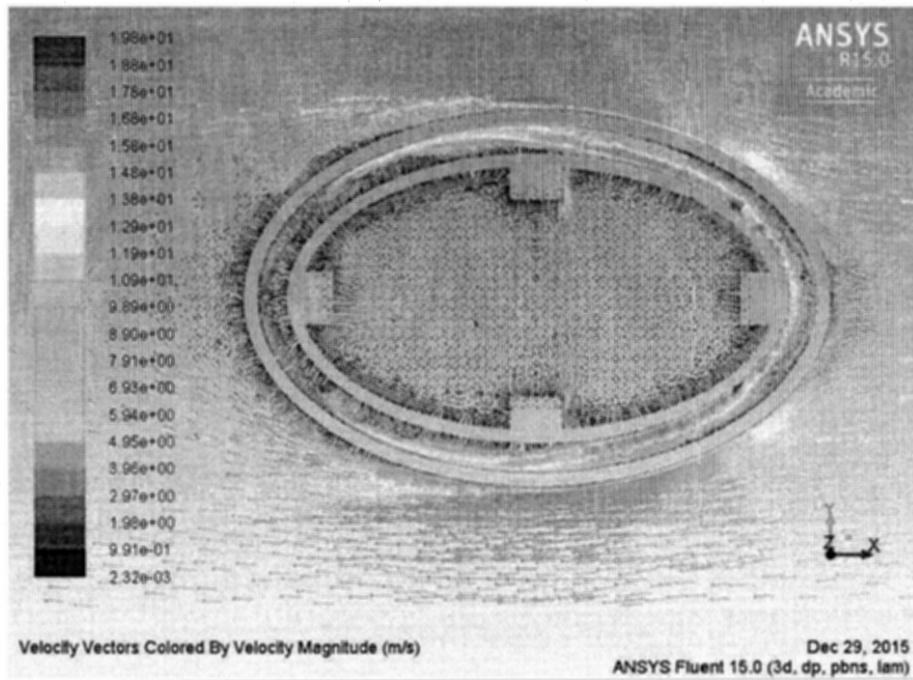


Figure 2.51: Résultat du flux d'air vectoriel de la conception 6, vue de dessus, résultats sur le plan Z au milieu du PAS, position de chevauchement

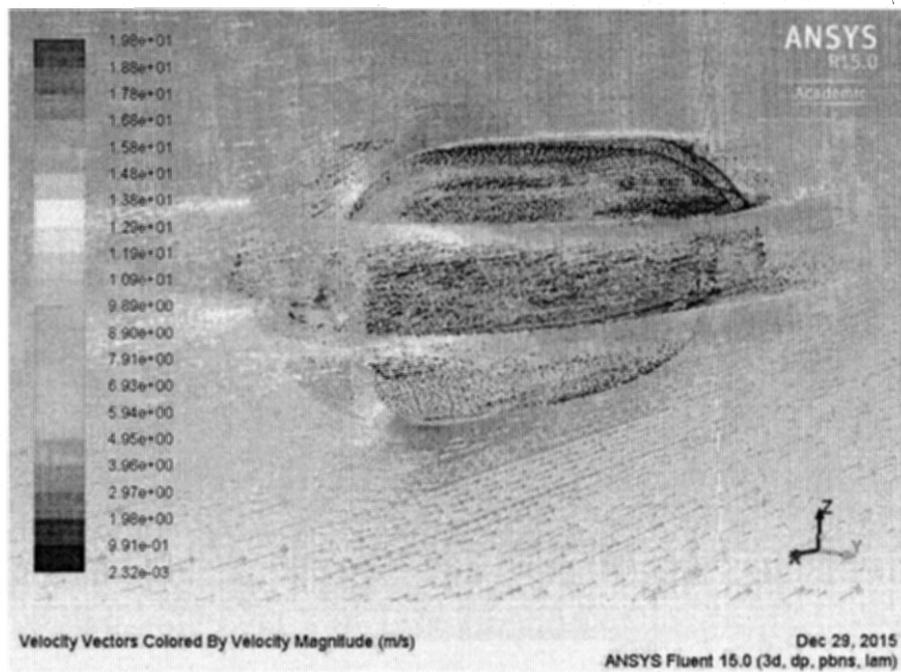


Figure 2.52: Conception 6 résultat du flux d'air vectoriel, vue 3D, corps PAS inclus, résultats sur les plans Y et Z

2.7 PAS comparaison and sélection

Dans cette section, une brève explication de l'énergie de la traînée sera présentée. Tout d'abord, les résultats de la valeur de traînée qui sont calculés sur la base de la simulation CFD seront présentés. Ensuite, sur la base de tous les résultats, une comparaison sera faite entre tous les modèles afin de sélectionner l'échantillonneur d'air passif le plus approprié pour notre application en ce qui concerne l'aérodynamique et le débit d'air.

2.7.1 Les valeurs de traînée des PAS

La simulation CFD fournit les résultats du flux de fluide visualisé pour une meilleure analyse et compréhension du fonctionnement des PAS dans un environnement extérieur. En outre, il fournit la valeur du coefficient de traînée qui est notée C_d , pour le calcul de l'ampleur de la traînée, désignée par D , causée par l'écoulement d'air ou de fluide basé sur l'équation suivante de Drag (Hoerner, 1965):

$$D = C_d \times \frac{\rho \times V^2}{2} \times A$$

Où:

- D est la traînée de magnitude causée par le flux de fluide (parfois appelée résistance à l'air) (N);
- C_d est le coefficient de traînée;
- ρ est la densité du fluide (kg/m^3);
- V est la vitesse du fluide (m/s);
- A est la surface projetée frontale (m^2);

Dans la dynamique des fluides, la traînée est une sorte d'énergie qui agit contre le mouvement de tout objet qui se déplace dans un fluide (Hoerner, 1965). Cela dépend de la densité du fluide, du carré de la vitesse du fluide, de la taille et aussi de la forme de l'objet (inclinaison de l'objet par rapport au fluide). Généralement, les relations entre la géométrie de l'objet, l'inclinaison et la condition d'écoulement sont complexes. Une solution pour réduire cette complexité est de caractériser la dépendance par une seule variable. Pour la traînée, cette variable est le coefficient de traînée et elle est déterminée expérimentalement en utilisant des souffleries et des géométries de différents modèles. La valeur du coefficient de traînée a été mesurée auparavant en plaçant différentes formes et géométries avec la même surface frontale en soufflerie dans les mêmes conditions d'écoulement de fluide, y compris la même vitesse, densité et pression (Figure 2.53) (Hoerner, 1965).

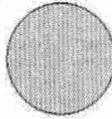
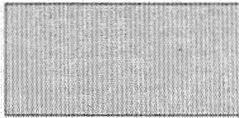
Forme		coefficient de traînée
sphère		0.47
Cube		1.05
Long cylinder		0.82
rationaliser demi-corps		0.09

Figure 2.53: Mesure expérimentale des coefficients de traînée pour certaines formes (Hoerner, 1965)

Cette valeur est fournie par le logiciel de simulation ANSYS CFD après chaque simulation. Il est important d'avoir les mêmes conditions d'écoulement de fluide pour toutes les géométries. Dans toutes les simulations effectuées, la vitesse de l'air a été déterminée à 15 m / s, la température à 25 ° C et la densité de l'air à 1,1839 kg / m³. La valeur de traînée est ensuite calculée en fonction de l'équation présentée, de l'état du fluide et de la surface frontale projetée. Les résultats de ces calculs sont présentés sur (Tableau 2.1).

Table 2.1 : Calcul de la force de traînée du motif

Numéro de Conception	Surface frontale (mm ²)	Coefficient de traînée	Force de traînée (Newton)
Conception 1	66	0.00010697462	9.404E-07
Conception 2	80	0.000082103365	8.748E-07
Conception 3	140	0.00019402422	0.000003618
Conception 4	110	0.00904174840	0.0001325
Conception 5-2	309.42	0.033784795	0.001392
Conception 6	352.09	0.0266051720	0.001248

2.7.2 Comparaison des PAS et procédure de sélection

Le processus de comparaison et de conception du PAS était basé sur les résultats de la simulation CFD 3D et sur les suggestions du département de biologie. La valeur de force de traînée a été utilisée pour mieux comprendre le facteur aérodynamique du motif lorsqu'il y avait une modification pour une meilleure fonctionnalité. Puisque dans la plupart des cas la valeur du coefficient de traînée peut être obtenue expérimentalement et que c'est la première fois qu'un échantillon d'air passif miniaturisé est conçu, il n'y a pas de valeur de

référence du coefficient de traînée, ni de force de traînée les modèles conçus ensemble et en les gardant pour de futures applications comme référence si nécessaire.

Après la première conception, la simulation CFD a montré un bon écoulement de fluide à travers le canal de fluide et il a également montré une très faible valeur de force de traînée. Le premier modèle devrait être modifié de manière à réduire l'impact direct du fluide sur le milieu d'échantillonnage, car à haute vitesse (ce qui n'est pas contrôlable), il pourrait être possible que les milieux d'échantillonnage sortent de leur position et que le canal soit ouvert dans l'espace libre, le support d'échantillonnage pourrait être perdu. De plus, la taille du milieu d'échantillonnage était trop petite et cela n'était pas suffisant pour capturer les composés désirés.

Pour résoudre ce problème, les modèles deux et quatre ont été proposés. Dans le modèle deux, deux médiums d'échantillonnage étaient positionnés parallèlement à la direction d'écoulement du fluide. Afin de maintenir l'exposition maximale des fluides aux milieux d'échantillonnage, on a considéré que les courbes internes détournaient le fluide vers le milieu d'échantillonnage. Dans ce cas, le corps PAS pourrait être plus étroit pour augmenter la fonction aérodynamique du PAS. Comme il ressort de la table 1, cette modification diminue la valeur de la force de traînée.

Dans le modèle 4, une nouvelle conception est proposée pour protéger le support d'échantillonnage de l'impact direct tout en augmentant fortement la surface active du support d'échantillonnage. On a essayé d'utiliser la même conception que le profil aérodynamique de l'avion pour une meilleure aérodynamique, puisque l'épaisseur du PAS devrait être augmentée afin d'avoir plus d'espaces internes pour des milieux d'échantillonnage plus grands. Apparemment, la valeur de la force de traînée a changé mais reste proche du zéro.

Bien que ces deux conceptions couvraient la plupart des exigences du projet, il y avait toujours un problème avec la direction de l'écoulement du fluide. Pour ce projet (inspiré d'une idée venant de nos collaborateurs du département de biologie), on a supposé que le

moment le plus important pour qu'un oiseau soit contaminé est le moment où il est assis et attend des aliments dans le champ terrestre. Dans ce cas, il n'y a aucun mouvement pour amener l'air d'échantillonnage à l'intérieur du PAS. Ainsi, les modèles doivent être conçus de manière à ce que le fluide puisse s'écouler dans le PAS de toutes les directions et même si l'oiseau ne bouge pas, les milieux d'échantillonnage doivent être exposés avec du liquide.

Le modèle 3 a été proposé afin de résoudre le problème de direction de l'écoulement du fluide. Pendant le vol, le fluide pourrait circuler à travers les canaux considérés, non seulement à partir de la direction avant, mais aussi à partir d'autres directions autour du PAS et s'exposer aux milieux d'échantillonnage. De plus, lorsqu'il n'y a pas de mouvement, l'air d'échantillonnage peut encore être exposé à la surface du support d'échantillonnage et ceci est dû à son emplacement. Comme ils sont situés à l'intérieur de 4 trous sur la surface supérieure de l'appareil, en cas de mouvement, l'air d'échantillonnage peut encore être exposé à la surface des absorbeurs. Le nouveau modèle proposé présentait quelques problèmes fondés sur des discussions avec nos collaborateurs du département de biologie. Tout d'abord, en utilisant le canal pour guider le fluide dans le milieu d'échantillonnage, pourrait également guider l'eau dans celui-ci. Cela signifie que lorsque l'oiseau flotte sur l'eau ou lorsqu'il pleut, l'eau peut facilement pénétrer dans le milieu d'échantillonnage. Dans ce cas, la conception doit être modifiée de manière à protéger le support d'échantillonnage. Le deuxième problème est le rayonnement direct de la lumière solaire sur les milieux d'échantillonnage. Comme ils n'avaient aucune étude sur l'effet de la lumière solaire sur les milieux d'échantillonnage, le PAS doit protéger les milieux d'échantillonnage contre le rayonnement direct de la lumière solaire.

Dans ce cas, le motif 5-1 a été proposé. Ce modèle couvre toutes les considérations dues à sa nouvelle forme. En fait, sa forme circulaire apporte plusieurs avantages en même temps. Il peut protéger les médias internes pendant qu'il y a un trou d'entrée tout autour du PAS. Dans ce cas, le fluide peut s'écouler dans le PAS de toutes les directions et même s'il n'y a pas de mouvement, le fluide peut toujours couler facilement dans le PAS. De plus, puisque la partie supérieure recouvre la partie inférieure, l'eau ne peut pas entrer facilement dans le

PAS. Le seul problème avec le nouveau design était sur son épaisseur. Comme il a été conçu aussi mince que possible, il était possible que les plumes d'oiseaux couvrent le PAS. Dans ce cas, l'épaisseur maximale du PAS a été définie par nos collaborateurs du département de biologie en fonction de leurs études antérieures et de la physiologie de l'oiseau.

Pour résoudre le problème de la plume de l'oiseau, l'épaisseur de la partie inférieure a été augmentée dans le modèle 5-2. Ensuite, le PAS conçu et approuvé a été fabriqué en utilisant l'impression 3D et testé par nos collaborateurs dans le département de biologie. Les résultats ont montré que la surface active du support d'échantillonnage (taille du support d'échantillonnage) est trop petite et qu'elle devrait être augmentée pour une meilleure analyse.

Afin de résoudre le nouveau problème, le modèle 6 a été proposé en fonction de la physiologie de l'oiseau et des résultats de la simulation 5-2. La largeur de PAS n'a pas pu être modifiée en raison de la position de l'aile de l'oiseau, mais il était possible d'augmenter la longueur du PAS le long du corps de l'oiseau. Cette première modification a augmenté la surface active du milieu d'échantillonnage de 254,34 mm² à 440,385 mm², ce qui signifie une augmentation de 73%. Également basé sur la simulation de modèle 5-2, une autre position a été considérée dans la partie supérieure avec la même taille que celle dans la partie inférieure. Ainsi, une nouvelle conception a augmenté la surface d'échantillonnage deux fois plus que la précédente (880,77 mm²). De même, la comparaison de la valeur de traînée entre les plans 5-2 et 6 montre que la valeur de traînée a été réduite de 0,001392 à 0,001248, ce qui constitue un autre avantage de la conception 6.

Puisque cette conception a été couverte toutes les conditions, elle a été approuvée par nos collaborateurs dans le département de biologie et elle a été envoyée pour la fabrication afin d'être examinée sur des oiseaux.

2.8 Résumé

Comme c'était la première fois qu'un dispositif échantillonneur d'air passif miniaturisé était conçu pour être monté sur un oiseau de taille moyenne, plusieurs concepts ayant des caractéristiques différentes ont été proposés et simulés. Pour chacune des architectures proposées, il a été tenté de mettre en œuvre des caractéristiques spécifiques puis de faire une simulation CFD sur celles-ci afin de comprendre comment se comportera le PAS conçu et quels sont les avantages et les inconvénients des caractéristiques mises en œuvre. Certaines conceptions ont été rendues plus aérodynamiques afin de réduire l'énergie de résistance contre les oiseaux. Chaque conception et ses résultats CFD connexes ont été proposés à nos collaborateurs du département de biologie pour analyse. Sur la base de leurs commentaires, certaines modifications ont été apportées aux conceptions et, dans certains cas, la conception a été complètement modifiée. Enfin, un concept de PAS (design 5) a été approuvé et quelques modifications supplémentaires ont été apportées pour l'adapter au montage sur les oiseaux et pour augmenter la surface active du milieu d'échantillonnage à l'intérieur du PAS (design 6). Dans le prochain chapitre (chapitre 3), les résultats de la fabrication et des tests de cet appareil seront présentés. Ensuite, cette conception sera modifiée de manière à être équipée de capteurs actifs pour les mesures en temps réel (chapitre 4). Ces capteurs aideront nos collaborateurs du département de biologie à envisager un meilleur échantillonnage de l'air dans leurs analyses.

CHAPITRE III

FABRICATION ET ESSAIS PASSIFS DE L'ÉCHANTILLON

3.1 Fabrication du PAS

Choisir la bonne technologie avec suffisamment de résolution et de matériel approprié, compatible avec nos exigences est le point critique lorsque la technologie d'impression 3D est choisie comme méthode de fabrication. Les technologies les plus disponibles et les plus populaires sont: FDM (Chute et Leong, 2003), SLA (stéréolithographie) (Hull, 1986), SLS (frittage sélectif par laser) (Kumar, 2003), DMLS (frittage métallique direct par laser). (Khaing et al., 2001) et l'impression 3D Polyjet (Barclift et Williams, 2012). L'impression 3D Polyjet a la capacité d'imprimer une largeur de canal de 0,3 mm, alors qu'elle peut imprimer des canaux avec une hauteur aussi fine que 50 μm et l'épaisseur minimale pour les autres techniques pourrait être de 0,5 mm. Les matériaux Vero (pour l'état solide) et Durus (pour l'état flexible) peuvent être utilisés comme matériaux d'impression (<https://www.fablabinc.com/fr/impression-3d/materiaux#material9883>). Un grand avantage de la technologie d'impression 3D est qu'elle peut utiliser différents types de matériaux pour l'impression. En plus des matériaux présentés, d'autres types de matériaux tels que le plastique, l'alumine et les métaux peuvent également être utilisés pour l'impression.

Le PAS, destiné à être utilisé et monté sur des oiseaux, doit être fabriqué dans des conditions spécifiques. Il devrait être fabriqué à partir du matériau aussi léger que possible. Le matériau doit être imperméable et reposer entre les procédures de nettoyage avec des solvants chimiques organiques (chloroforme et méthanol (rapport volumique 50:50), 15

min 3 fois, puis séché sous une hotte pendant deux heures). Il ne devrait pas être transparent afin de protéger les médias d'échantillonnage intérieurs de la lumière du soleil.

Le premier prototype d'échantillon a été fabriqué avec la technologie Polyjet et le matériau Vero, la technologie 3D la plus précise disponible dans la région de Montréal. Cela a été fait afin de vérifier si le prototype imprimé sera acceptable sous différents points de vue tels que les dimensions imprimées, la propreté, les processus d'assemblage, etc. Le prototype a été bien fabriqué avec des dimensions précises mais dissous dans les solvants organiques. Ceci n'est pas acceptable car chaque PAS doit passer le processus de nettoyage standard avant l'opération.

Le second prototype d'échantillon a été fabriqué par Sculpteo Company (Sculpteo Inc., 169, 11th Street, San Francisco, CA, USA) en utilisant un matériau plastique différent (modèle de polyamide PA2200). Le poids total de la PAS imprimée complète (Partie supérieure et inférieure) est de 2,875gr, ce qui est assez léger pour être monté sur les oiseaux (Figures 3.1, 3.2). De plus, le polyamide n'est pas affecté par le processus de nettoyage et ce prototype répond à toutes les autres exigences présentées ci-dessus. Comme ce prototype a été jugé acceptable, 100 unités de PAS ont été commandées (6,81 US \$ / unité).

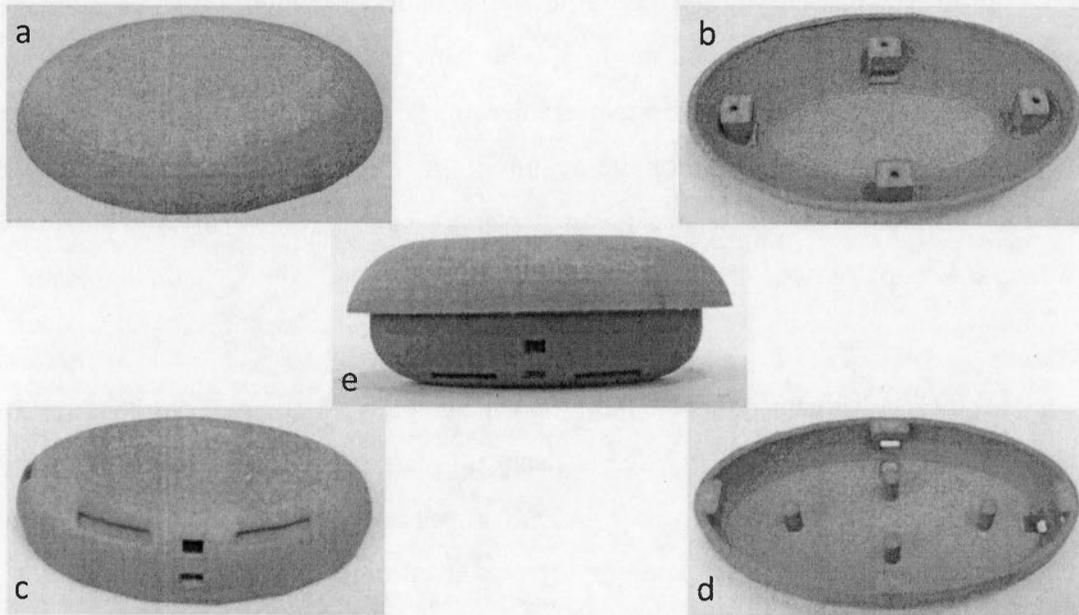


Figure 3.1: PAS accepté fabriqué avec la technologie d'impression 3D. (a) Partie supérieure à l'extérieur. (b) Partie supérieure à l'intérieur. (c) Partie inférieure à l'extérieur. (d) Partie inférieure à l'intérieur. (e) Complet assemblé PAS

Pour le montage des PAS assemblés, un ruban de Téflon tubulaire naturel (largeur: 3/16 ") a été utilisé pour fixer le PAS sur les oiseaux (Figure 3.2). Le ruban traverse les canaux positionnés sur la partie inférieure de PAS et après avoir mis l'appareil à l'arrière de l'oiseau, le ruban a été serré et caché sous les plumes.

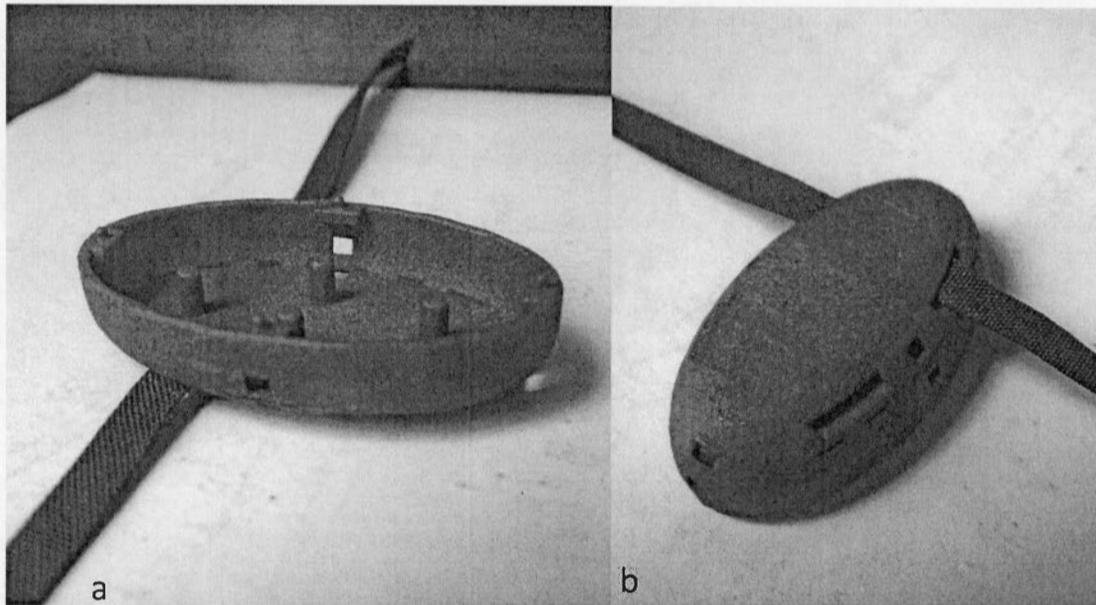


Figure 3.2: Ruban Téflon tubulaire naturel utilisé pour monter le PAS sur les oiseaux. (a) Vue de dessus de la partie inférieure. (b) Vue de dessous de la partie inférieure

3.2 Adsorbants

Dans la section suivante, quatre différents types d'adsorbants seront présentés qui ont été testés à l'intérieur de l'échantillonneur d'air passif. La mousse de polyuréthane (PUF) et le filtre à fibre de verre (FFV) sont deux adsorbants bien connus pour l'échantillonnage passif de l'air et deux nouveaux types d'adsorbants sont le polydiméthylsiloxane (PDMS) (Park et al., 2014) et l'oxyde de graphène.

3.2.1 Mousse de polyurethane

Le polyuréthane est un polymère ou un plastique (Bayer, 1947, Seymour et Kauffman, 1992). Le polyuréthane peut être un solide ou peut avoir une structure cellulaire ouverte (Figure 3.3), auquel cas on l'appelle mousse et la mousse peut être flexible ou rigide. C'est

un matériau polyvalent et il peut être utilisé dans différentes applications telles que la literie, les meubles, l'automobile ou l'isolateur de bâtiment (Prisacariu, 2011).

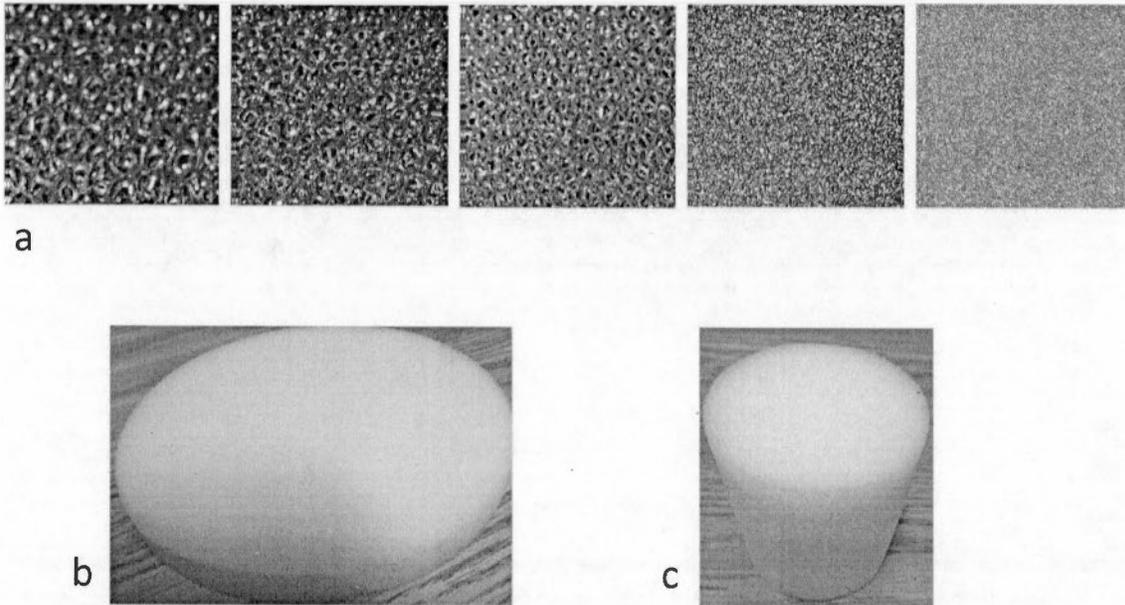


Figure 3.3: Mousse de polyurethane. (a) De gauche à droite, structure cellulaire ouverte pour fermer la structure cellulaire. (b) Forme de disque PUF. (c) Forme de cylindre PUF qui a été utilisée dans ce projet

Dans cette étude, la PUF (densité $0,023 \text{ g.cm}^{-3}$, Shawnee Instruments, Cleves, Ohio, USA) a été découpée en un disque de 2 mm d'épaisseur, de forme elliptique (surface active: 400 mm^2). Pour couper le cylindre PUF sous la forme d'un disque de 2 mm, le PUF a été mis dans l'eau puis congelé. Ensuite, le cylindre congelé a été coupé en utilisant une scie électrique dans des disques de 2 mm d'épaisseur. Ensuite, les disques ont été séchés et découpés sous forme elliptique à l'aide d'un moule FR4, fabriqué à l'aide d'une machine CNC LPKF. Enfin, ils ont été nettoyés à l'aide d'une solution de chloroforme et de méthanol (rapport volumique 50:50) et desséchés sous une hotte pendant deux heures et conservés dans un sac en plastique pour utilisation ultérieure.

3.2.2 Filtre en fibre de verre (FFV)

Ce filtre est fait de fibre de verre en borosilicate pur. Il peut être trouvé pour convenir à une large gamme de débits. Ce type d'absorbant peut être fourni sous différentes formes, normalement sous la forme d'un disque, et il s'agit d'un adsorbant bien connu dans les domaines de la biologie et de l'environnement.

Cet adsorbant a été sélectionné, puis acheté, testé et découpé sous la forme et la taille souhaitées par notre collaboratrice du département de biologie (Manon Sorais) pour être installé et testé à l'intérieur du PAS parallèlement à l'autre type d'adsorbants. (<http://www.sterlitech.com/filters/membrane-disc-filters/glass-fiber-filter.html>).

3.2.3 Polydimethylsiloxane (PDMS)

Le PDMS est un type de polymère communément appelé silicone (European Centre for Toxicology of, 1983). Il est bien connu pour ses caractéristiques flexibles et hydrophobes. Il est utilisé largement dans la technologie microfluidique. Il est transparent, non toxique et ininflammable. Ses caractéristiques en font un matériau polyvalent pour différentes applications. Il a été présenté par le passé dans certaines études (Park et al., 2014) que le PDMS peut capturer certains composés à la fois dans la phase gazeuse et dans la phase particulaire. Pour cette raison, une couche de PDMS d'une épaisseur de 1 mm a été préparée en utilisant la recette suivante.

Un moule a été fabriqué à partir d'un panneau revêtu de cuivre de 1,6 épaisseur en utilisant la technique de fraisage LPKF 2,5D (figure 3.4). Le moule a été fabriqué à partir d'une plaque de cuivre de 14 x 14 mm et la zone active a été usinée à partir de celui-ci avec une valeur réelle égale à 12 x 12 x 1 mm. La profondeur de 1 mm correspond à l'épaisseur du PDMS et peut varier en fonction des exigences de l'application.

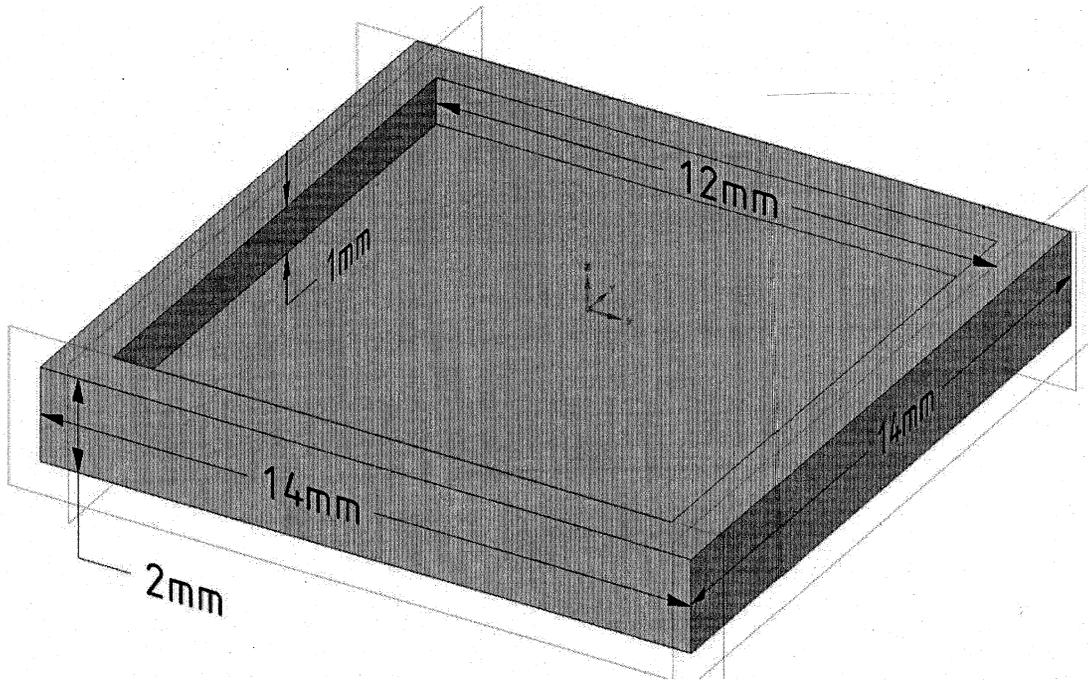


Figure 3.4: Moule PDMS pour former le PDMS non durci à l'épaisseur de la couche de 1 mm

On a préparé du PDMS (densité 1,12-1,16 g.cm⁻³, Specialty Silicone Products, Ballton Spa, NY, USA) en mélangeant le durcisseur Sylgard 184 et Sylgard 184 avec un rapport de 10: 1 m / m. Les matériaux mélangés ont été tenus sous aspiration pendant 10 minutes afin d'éliminer toutes les bulles d'air. Le moule a été placé dans le récipient en plastique plat et les PDMS ont été coulés lentement jusqu'à ce que le PDMS remplisse le moule d'une profondeur de 1 mm. Le récipient a été maintenu dans le four pendant 10 minutes à une température de 80 ° C. Après le durcissement, le PDMS a été décollé manuellement du moule et découpé en une pièce de forme elliptique pour l'utilisation.

3.2.4 Oxyde de graphène

L'oxyde de graphène est un composé de trois éléments qui sont le carbone, l'oxygène et l'hydrogène. Il s'obtient en traitant le graphite avec des oxydants (Hummers Jr et Offeman, 1958). C'est comme une sorte de feuillet mono-moléculaire qui peut servir à préparer un matériau avec des liens comme une sorte de papier (Dreyer et al., 2010). La forme et la structure de sa composition dépendent de la solution de traitement utilisée pour le former. La Dr. Sujitra Poorahong a utilisé le traitement suivant pour le mettre sous la forme d'une mousse qui peut servir en tant qu'adsorbant. Pour remédier à cela, une couche épaisse de PDMS a été utilisée comme un moule qui a la même taille que l'endroit occupé par l'adsorbant PAS. Puisque le PDMS est flexible, il serait plus facile de faire ressortir la mousse d'oxyde de graphène après séchage. Pour le traitement de l'oxyde de graphène, la dispersion aqueuse de GO a été préparée par une méthode modifiée de Hummers (Marcano et al., 2010) en utilisant le graphite en flocons naturels. Ensuite, il a été soniqué pendant 60 min avant utilisation. Pour préparer la mousse de GO, 5 mL de dispersion de GO ($1,76 \text{ mg ml}^{-1}$) ont été mélangés à 200 mg de polyéthylèneimine (PEI). Ensuite, le mélange a été soniqué pendant environ 1 minute. Le précurseur de gel a été stocké dans le bain d'huile à 60°C pendant 24 h pour obtenir l'hydrogel GO-PEI. Ensuite, l'hydrogel a été transféré dans le moule et a été congelé à -80°C pendant 4 heures. Finalement, le matériau dans le moule a été placé dans un instrument de lyophilisation pour éliminer l'eau et obtenir la mousse GO.

3.3 PAS tests sur site

L'étude a été poursuivie en montant le PAS qui a été fait par impression 3D sur des goélands à bec cerclé (*Larus delawarensis*). La zone de montage en surface des goélands s'étend le long du corps des oiseaux et non le long des ailes et ce pour minimiser l'effet sur l'aérodynamisme de l'oiseau du PAS monté sur le corps. Afin d'éviter de compromettre le

vol de l'oiseau (Vandenabeele et al., 2014), un harnais personnalisé a été fabriqué à partir d'un patch protecteur en néoprène et de ruban Teflon® (Bally Ribbon Mills, Bally, PA, USA). La méthode d'échantillonnage est décrite ailleurs (Sorais et al., in prep).

6-120 nids ont été sélectionnés qui présentaient 2 œufs pondus, afin de pouvoir estimer l'induction de l'incubation. Les nids sélectionnés ont été répartis uniformément sur les 3 sections de l'île. 28 oiseaux sur 28 nids présélectionnés ont été capturés lorsqu'ils ont présenté 3 œufs dans le nid. Ceci a été fait afin d'assurer le lien entre l'oiseau et son nid (juste pour être sûr que les oiseaux reviendront).

Les oiseaux ont été piégés avec une épuisette ou un piège déclenché par une télécommande. Les plumes étaient colorées à l'arrière de la tête en bleu pour pouvoir les reconnaître à distance. 28 PAS ont été déployés sur les oiseaux pendant une, deux et trois semaines et à la fin seulement 24 PAS ont été récupérés. Deux types d'adsorbants ont été testés dans cette étude: un disque PUF couplé à un FFV et le PDMS. Parmi ces 24 oiseaux, 12 portaient un PAS avec PUF couplé au FFV et 12 portaient un PAS avec du PDMS. Parmi les oiseaux porteurs du PUF-FFV PAS, 3 ont été déployés pendant une semaine, 5 pendant deux semaines et 4 pendant trois semaines. Pour le PDMS PAS, 3 oiseaux ont été déployés pendant une semaine, 6 pendant deux semaines et 3 pendant trois semaines. D'autres types d'adsorbants, qui ont été préparés à partir d'oxyde de graphène, ont également été testés afin d'évaluer la polyvalence du PAS (les résultats numériques ne sont pas présentés dans ce travail). Le boîtier et les adsorbants du PAS (PDMS, FFV et PUF) ont été nettoyés avant les opérations en utilisant une solution de méthanol et de chloroforme avec un rapport en volume égal à 50:50. Ensuite, les solvants ont été évaporés et les pièces séchées sous une hotte pendant deux heures. Après avoir équipé le PAS d'absorbants, les parties supérieure et inférieure ont été collées ensemble à l'aide d'une colle sans HFR (RapidFix, Norton Shores, Michigan, USA), puis conservées dans un endroit sombre à -20 ° C jusqu'au déploiement.

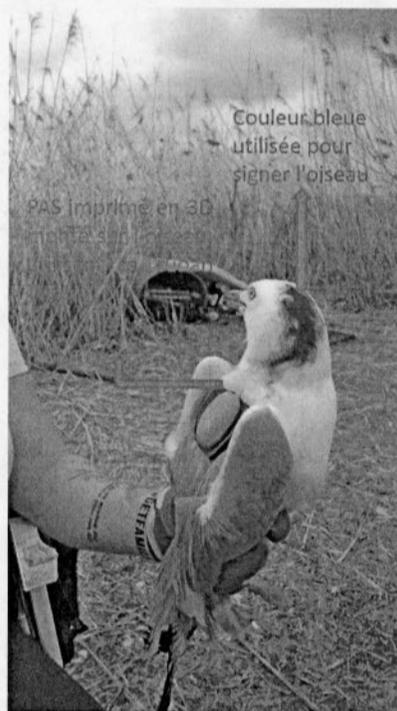


Figure 3.5: PAS monté sur un oiseau, en utilisant le ruban de téflon dans la colonie d'oiseaux

24 échantillons ont été ramenés puis analysés au département de biologie. Les résultats suivants (Figure 3.6) ont été obtenus :

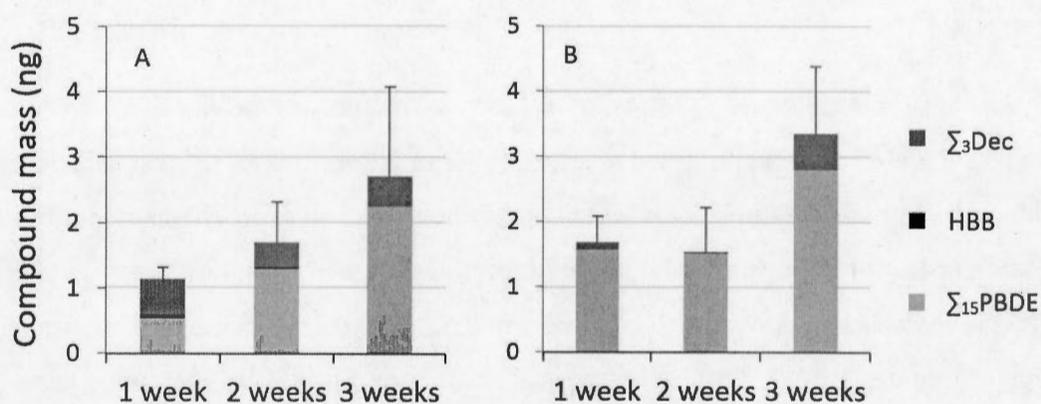


Figure 3.6: Masse totale moyenne (ng) de $\Sigma_{15}\text{PBDE}$, HBB et $\Sigma_3\text{Dec}$ (somme de syn- et anti-DP, et Dec-604 CB) déterminées en A) PUF-FFV PAS et B) PDMS PAS portés par des goélands à bec cerclé à Montréal (QC, Canada) pendant une, deux et trois semaines. La barre d'erreur représente le SEM de $\Sigma_{19}\text{HFR}$.

Ces résultats montrent la fonctionnalité du PAS. Cela indique que pendant une certaine période de temps, trois types différents de retardateurs de flammes ont été détectés. Les composés détectés sont de trois types de Dechlorane ($\Sigma 3\text{DEC}$), du Hexabromodenzene (HBB) et quinze types de PBDE ($\Sigma 15\text{PBDE}$). Ceux-ci indiquent que notre échantillonneur d'air passif miniaturisé est capable de transporter différents types d'adsorbants, ce qui présente l'avantage d'échantillonner tous les types de composés. Ceci a été réalisé en utilisant le PUF et le FFV pour collecter la phase gazeuse et particulaire des composés et du PDMS pour des composés plus volatils. En tant que premiers résultats pour un PAS miniaturisé pouvant être transporté par des oiseaux afin de collecter des HFF (retardateurs de flamme halogénés), ces résultats sont déjà très satisfaisants. Cependant, certaines améliorations peuvent être apportées à l'avenir, comme certaines modifications sur la précision, qui seront discutées dans la prochaine section. Des résultats plus détaillés sont disponibles dans l'article intitulé «Un échantillonneur d'air passif Bird-borné miniature pour la surveillance des retardateurs de flamme halogénés» de Manon Sorais et al. (En préparation).

3.4 Résumé

De nos jours, la fabrication des prototypes rapides et même des productions de masse devient plus rapide et plus facile grâce à la technologie d'impression 3D, car elle fournit une variété de méthodes d'impression et de matériaux avec une précision d'impression élevée. Basé sur les limitations de fabrication de PAS telles que la résolution, le poids et la norme de processus de nettoyage, beaucoup de PAS ont été fabriqués en utilisant la technologie d'impression 3D. Différents types d'absorbants ont été utilisés pour tester le PAS en les montant sur des oiseaux signés. Basé sur le plan d'étude du projet, ils ont été déployés sur des oiseaux à certains moments de l'année et ensuite ils ont été envoyés pour

analyse. Heureusement, les composés cibles ont été absorbés puis identifiés et enregistrés pour être comparés aux résultats qui seront obtenus à l'avenir.

CHAPITRE IV

CIRCUIT EMBARQUÉ

Ce chapitre est divisé en cinq sections afin de présenter la procédure de construction de l'échantillonneur d'air passif miniaturisé avec quelques capteurs électroniques. Ces capteurs ne changent pas le rôle de l'échantillonneur d'air passif sur l'échantillonneur d'air actif. Ils fourniront simplement des données complémentaires afin d'aider les biologistes à mieux évaluer les résultats de l'analyse des adsorbants. Nous commencerons par une description des capteurs, et plus de détails par l'utilisation du capteur de pression pour le calcul de la vitesse. Ensuite, nous décrirons le circuit électronique (schémas et PCB) qui est responsable du contrôle des capteurs. Dans la troisième section seront présentées toutes les modifications apportées au PAS approuvé, afin de l'équiper de pièces électroniques. Suite à cela, les résultats de la simulation CFD pour PAS modifié seront présentés pour une meilleure comparaison avec les conceptions précédentes. Dans la dernière section, les résultats des capteurs actifs intégrés dans le PAS seront présentés et comparés aux résultats d'un anémomètre pour montrer sa fiabilité

4.1 Les capteurs et leur utilisation

Comme expliqué au chapitre 1, la vitesse de l'air autour et à l'intérieur du PAS peut affecter les résultats de la fréquence d'échantillonnage (May et al., 2011, Thomas et al., 2006, Tuduri et al., 2006) où le PAS est installé dans un environnement d'espace libre contenant une vitesse de vent variable. Ce serait plus important lorsque le PAS est monté sur un objet mobile comme un oiseau ou un véhicule puisque le PAS et l'air d'échantillonnage peuvent avoir leur propre vitesse et selon la direction de vol du vent et de l'oiseau et la vitesse de vol

de l'oiseau aurait des valeurs de variété. Dans ce cas, afin d'avoir une meilleure analyse du taux d'échantillonnage des absorbeurs et une meilleure comparaison avec d'autres études, le PAS était équipé d'un minuscule circuit électronique numérique pour mesurer la vitesse de l'air d'échantillonnage autour du PAS en mesurant les valeurs de principe nécessaires au calcul de la vitesse.

Afin d'équiper le PAS conçu avec des capteurs de vitesse active, il était nécessaire de considérer plusieurs conditions. Tout d'abord, la combinaison de tous les composants électroniques, y compris les capteurs actifs, le processeur et la carte PCB, doit être suffisamment petite pour être montée à l'intérieur du PAS miniaturisé, sans nécessiter de grandes modifications dans les dimensions du PAS. Deuxièmement, l'alimentation maximale devrait être de 3,3 volts, générée par une petite batterie, et la carte complète doit avoir une consommation d'énergie minimale pour une mesure à long terme. Enfin, le poids total de tous les dispositifs qui seront montés sur les oiseaux ne doit pas dépasser les 3% du poids total de l'oiseau. Ensuite, les composants électroniques sélectionnés, les processeurs et les capteurs doivent être aussi légers que possible tout en ayant une précision suffisante pour les mesures requises.

Les anémomètres typiques utilisent une structure simple pour mesurer la vitesse. Ils utilisent de petites hélices ou un ventilateur pour alimenter leurs générateurs. Lorsque le vent souffle, il fait tourner les pales du ventilateur et un petit générateur auquel elles sont attachées. Le générateur est connecté à un circuit électronique qui donne une lecture instantanée de la vitesse du vent sur un affichage numérique basé sur la tension générée mais, ceci n'est pas une solution appropriée pour un PAS miniaturisé puisqu'il a besoin de plus d'espace.

L'autre solution pour mesurer la vitesse est celle utilisée dans l'aviation qui appelle le système Pitot-static (Figure 4.1) (Elmajdub et Bharadwaj). Dans ce système, la vitesse du fluide peut être déterminée en mesurant la pression associée (Pitot, 1732). Il se compose d'un tube de Pitot génère la pression de Pitot et le tube statique qui génère une pression

statique. La pression de Pitot, également appelée pression totale, est une mesure de la pression de l'air dynamique (la pression d'air créée par les objets en mouvement) et peut être mesurée en plaçant le tube de Pitot directement dans le flux de fluide. Habituellement, les tubes Pitot sont installés sous les ailes ou à l'avant du fuselage de l'avion, vers l'avant tandis que ses canaux de pression sont exposés au vent de face (Elmajdub et Bharadwaj). Le positionnement des tubes de Pitot sur les emplacements mentionnés nous conduira à une mesure précise car moins de vortex et d'air dévié seront générés en raison de la forme du fuselage de l'avion ou de la puissance des moteurs.

La pression statique peut être mesurée à travers le canal du tube statique. Habituellement, elle est installée au même endroit que le tube de pression totale où le débit est moins distribué, ce qui permet une mesure précise (Elmajdub et Bharadwaj). Un tube Pitot-static est un tube mixte dont le tube de pression total est situé au milieu (face au flux de fluide) et la pression statique est située autour de celui-ci mais de telle manière que le flux d'air direct ne peut pas le traverser. Dans ce cas, l'altitude plus élevée avec diminuer la pression statique.

La pression dynamique est la différence entre la pression totale et la pression statique. La pression dynamique est alors déterminée pour utiliser un diaphragme situé à l'intérieur des capteurs de pression. Le capteur de pression différentielle doit avoir une partie interne. Le côté statique et le côté total. Dans ce cas, la variation du diaphragme nous donnera la pression dynamique (Nelson, 1998).

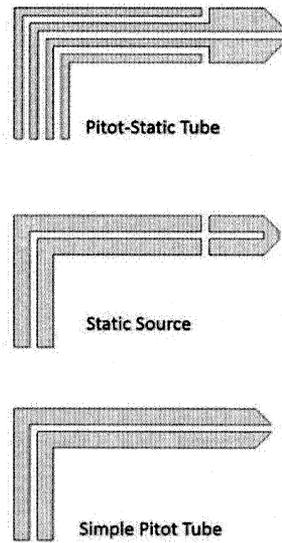


Figure 4.1: Diagramme de tube pitot, statique et Pitot-Statique

By having the dynamic pressure, airspeed can be calculated using Bernoulli's equation (Klopfenstein Jr, 1998):

$$V = \sqrt{(2 \times \Delta P) / \rho}$$

Où:

- V représente la vitesse de l'air in m/s;
- ΔP est le gradient de pression;
- ρ est la densité de fluide in kg / m^3 ;

ΔP est le gradient de pression, qui est égal à la différence entre la pression totale et la pression statique:

$$\Delta P = P_t - P_s$$

La valeur de la densité de fluide ρ (en kg/m^3) peut être calculée par l'équation suivante:

$$\rho = \frac{P \times M}{R \times T}$$

Où:

- P est la pression du fluide en Pascal;
- M est la masse molaire;
- R est la constant universelle;
- T est la température absolue en K;

Comme le PAS miniaturisé sera monté sur un oiseau et que ces oiseaux peuvent voler à des altitudes différentes avec des températures de l'air différentes. Comme ils volent principalement près du niveau de la mer (pas à très haute altitude), les trois premières variables peuvent être fixées à la condition du niveau de la mer. Dans ce cas, la pression de l'air au niveau de la mer peut être fixée à 101,325 kilo pascals. Dans l'équation présentée, la masse molaire de l'air est égale à 28,9645 g.mol⁻¹ et la constante d'air universelle est de 8,3144 j.mol⁻¹k⁻¹. Cependant, la dernière variable qui est la température absolue devrait mesurer avec précision afin d'avoir la densité d'air exacte et ensuite un meilleur calcul de la vitesse car il y a beaucoup de variation de la température ambiante dans la région de Montréal.

Sur la base des limitations de PAS (poids, taille et consommation électrique), un capteur de pression différentielle a été trouvé par la société ALL Sensors. Il a certains avantages qui correspondent aux exigences du projet. Il a une petite dimension de 15,75 × 12,70 × 7,17 mm, ce qui est assez petit pour être placé à l'intérieur du PAS. La chose la plus importante est ses données de sortie numériques. Grâce à son circuit numérique interne, il est possible de communiquer avec les interfaces capteur I2C ou SPI. Dans ce cas, aucun composant

électronique supplémentaire ne sera nécessaire pour convertir la sortie analogique en valeur numérique comme le font la plupart des capteurs de pression. Il fonctionne avec une tension d'alimentation de 3,3 V et consomme au maximum 0,9 mA en mode faible consommation et 5,0 μ A en mode veille, de sorte que la consommation totale d'énergie peut être gérée en utilisant son mode opérationnel différent (Figure 4.2). La valeur de sortie est la pression différentielle (dynamique) et il peut directement utiliser avec l'équation de la vitesse sans avoir besoin du calcul supplémentaire et il peut mesurer de 0 à 60 inH₂O dépend des modèles sélectionnés.

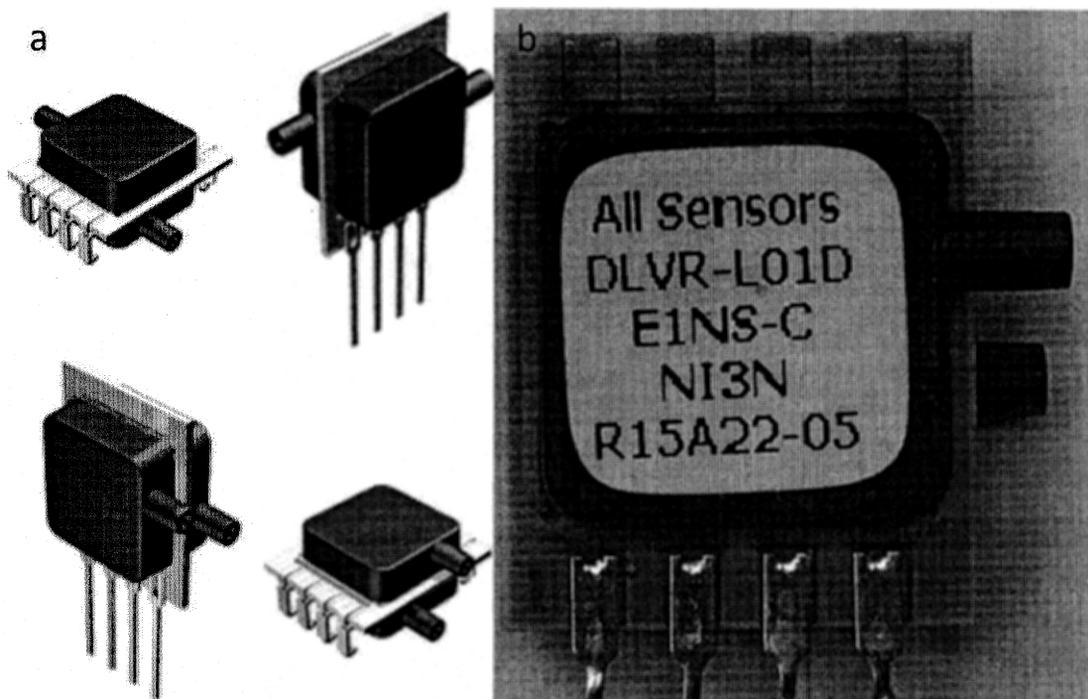


Figure 4.2: Capteur de pression différentielle. (a) Different packages and tube direction(issu de <http://www.allsensors.com>), (b) pressure sensor model number used to implement in PAS

De plus, un minuscule capteur précis de température et d'humidité a été acheté de la société SENSIRION avec une dimension de $3 \times 3 \times 1,1$ mm afin de mesurer la température absolue pour le calcul de la densité de l'air. Comme le capteur d'humidité était déjà inclus dans ce capteur, il a également été essayé de fournir les résultats d'humidité connexes pour les biologistes en tant que données complémentaires, ce qui n'est pas absolument nécessaire pour ce projet. Il fonctionne avec une tension d'alimentation comprise entre 2,1 et 3,6 V et le courant maximum serait de $330 \mu\text{A}$ en mode de mesure et de $0,4 \mu\text{A}$ en mode veille. De la même manière, le protocole I2C peut être utilisé pour communiquer avec le capteur afin de lire ses données de sortie numériques (Figure 4.3).

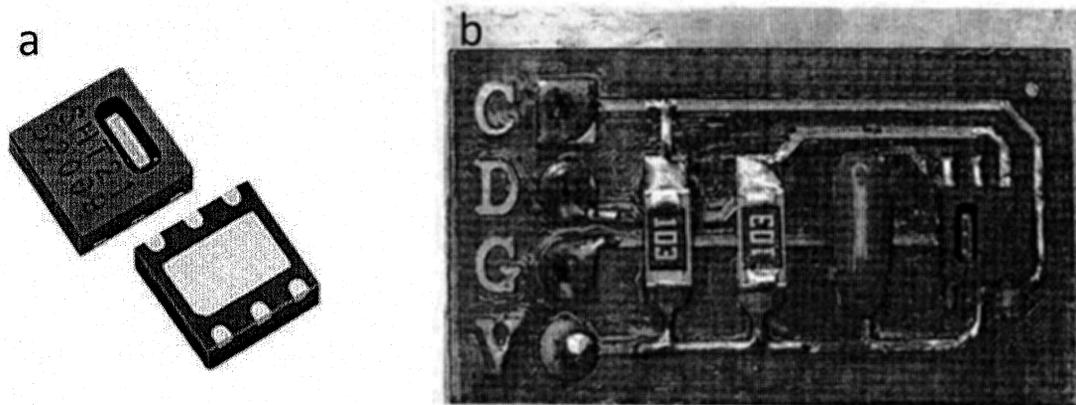


Figure 4.3: Capteur de température et humide. (a) Vue de dessus et dessous de paquet de capteur (Issud de <http://www.chipdip.ru/product/sht21/>) (b) soldered sensor behind the 10k pullup resistor with 1206 package

4.2 Circuit électronique de mesure de vitesse anémométrique

Afin de mesurer la vitesse en fonction des capteurs présentés, un processeur est nécessaire pour obtenir toutes les données des capteurs et calculer la vitesse en fonction de l'équation présentée. Dans ce cas, le microcontrôleur Atmega81 de la société Atmel a été utilisé sur la base du schéma schématique de la figure 4.4 pour résoudre ce problème.

Le capteur de pression différentielle et les capteurs de température humide étaient connectés au port de communication I2C du microcontrôleur. Deux résistances de 4,7 k Ω ont été considérées comme des pullup de bus I2C. La puce de mémoire, At45DB161, a été utilisée pour l'enregistrement de données basé sur le protocole de communication SPI. Le microcontrôleur a lu la température et la valeur d'humidité du capteur associé, puis il a lu la valeur de pression du capteur différentiel et, après un certain calcul, il enregistre la vitesse, la température et l'humidité sur la mémoire. Après chaque mesure, le microcontrôleur passe le mode actif des capteurs en mode veille pour réduire la consommation d'énergie et attend jusqu'au point temporel de mesure suivant. Le moment de la mesure peut être déterminé par les exigences du projet et est basé sur le taux d'échantillonnage du projet (le nombre de fois que cette vitesse devrait être mesurée en heures). La vitesse peut être mesurée sur chaque milliseconde heures utiles et enfin, lorsque les mesures effectuées et PAS seront ramenés au laboratoire, les données enregistrées peuvent être transférées à un ordinateur en utilisant le

fabrication de circuits imprimés. Après la fabrication, les composants électroniques (tableau 4.1) ont été soudés sur la carte fabriquée pour être prêts à être testés.

Comme il a été expliqué, l'un des principaux objectifs du projet global était le suivi de la source des retardateurs de flamme. Le PAS miniaturisé est responsable de la capture des composés dans les phases gaz-particules. Afin de suivre la trajectoire de vol de l'oiseau, un petit GPS comprenant une petite batterie a été utilisé (le GPS et la batterie ont été achetés, testés et montés d'oiseaux par nos collègues du département de biologie). Cette batterie (3.2V-250 mA) a été utilisée comme source d'alimentation pour le circuit électronique présenté. Depuis que le GPS a été programmé pour enregistrer les coordonnées toutes les 10 minutes, le circuit électronique présenté a été programmé pour faire toutes ses tâches en même temps que le GPS. Afin d'économiser plus d'énergie, tous les composants ont été programmés pour être en mode veille. Toutes les 10 minutes, seulement pour une durée de 10 millisecondes, le microcontrôleur change les statues des composants en mode actif, démarre toutes les mesures, enregistre les données et change les statues des composants en mode veille. La consommation d'énergie totale du circuit proposé est de 0,00008 Wh. En utilisant la batterie mentionnée comme source d'énergie, sans connecter d'autres circuits (GPS, accéléromètre, etc.) à la batterie, le circuit proposé peut être utilisé pendant une durée d'environ 400 jours.

Table 4.1: Liste des principaux composants électroniques

Référence	Fournisseur	Description	QTé	Boitier
DLVR-L01D-E1NS	All Sensors	Capteur de pression différentielle Dimension: 15.75 × 12.70 × 7.17 mm Protocole de Communication: I2C ou SPI Tension d'alimentation: 3.3V Courant de consommation: 0.9mA basse puissance, 5.0 µA passif Gamme: 0 – 60 inH2O Précision: 1%	1	Dip
SHT21	SENSIRION	Capteur de température et d'humidité Dimension: 3 × 3 × 1.1 mm Protocole de Communication: I2C Tension d'alimentation: 2.1 - 3.3V Courant de consommation: 330 µA actif, 0.4 µA passif Range: 0 – 100 % RH, -40 – 125 °C Précision: ± 2 % humidité (20% - 80%) Précision: ± 0.3 % Temp (0 – 60 °C)	1	DFN
AT45DB161D	Atmel	Flash memory Dimension: 6 × 5 × 0.55 mm Protocole de Communication: SPI - 66MHZ Tension d'alimentation: 2.5 - 3.6V Courant de consommation: 11mA actif, 3 µA passif Taille mémoire: 16 Mégabit	1	MLF
Atmega328	Atmel	Micro-contrôleur Dimension: 5 × 5 × 0.9 mm Protocole de Communication: I2C, SPI, Serial, Parallèle protocole Tension d'alimentation: 1.8 - 5.5 V Fréquence de clock: 0 - 20 MHz (dépend de la tension d'alimentation) Courant de consommation: 3,6mA actif, 0.5 µA passif	1	VFQFN

4.3 Modèle de conception PAS (modifié pour le capteur embarqué)

Afin d'équiper le dernier PAS miniaturisé d'un nouveau circuit électronique actif, plusieurs modifications doivent être apportées. La hauteur de la partie inférieure doit augmenter pour laisser suffisamment d'espace pour les composants électroniques et les capteurs, en particulier pour un capteur de pression qui est le composant le plus épais parmi tous. La partie inférieure doit être divisée en deux parties pour insérer les composants électroniques dans le PAS, tandis que la partie supérieure conserve sa première conception (Figure 4.7). Après l'installation des composants, la troisième partie (Figure 4.8) recouvrira la carte électronique et pourra être collée sur la partie médiane. Afin d'obtenir les changements optimaux dans les dimensions de la partie inférieure, le capteur de pression et la carte électronique, y compris tous les composants avec leur taille exacte, ont été conçus comme un module 3D (Figure 4.9). L'utilisation de ces modules 3D pourrait aider à une meilleure imagination pendant les modifications de la partie inférieure du PAS.

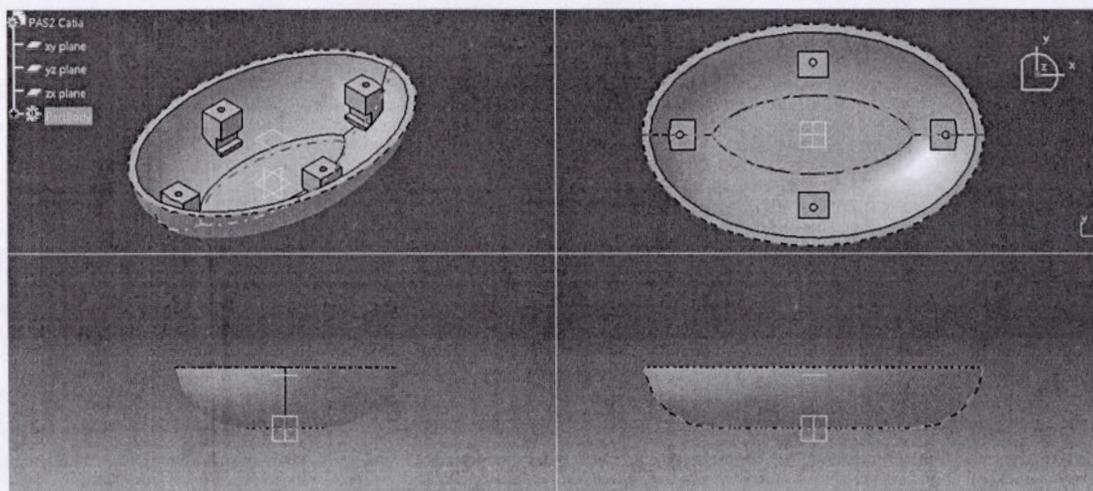


Figure 4.7: Modèle de PAS (4 vues de côté)

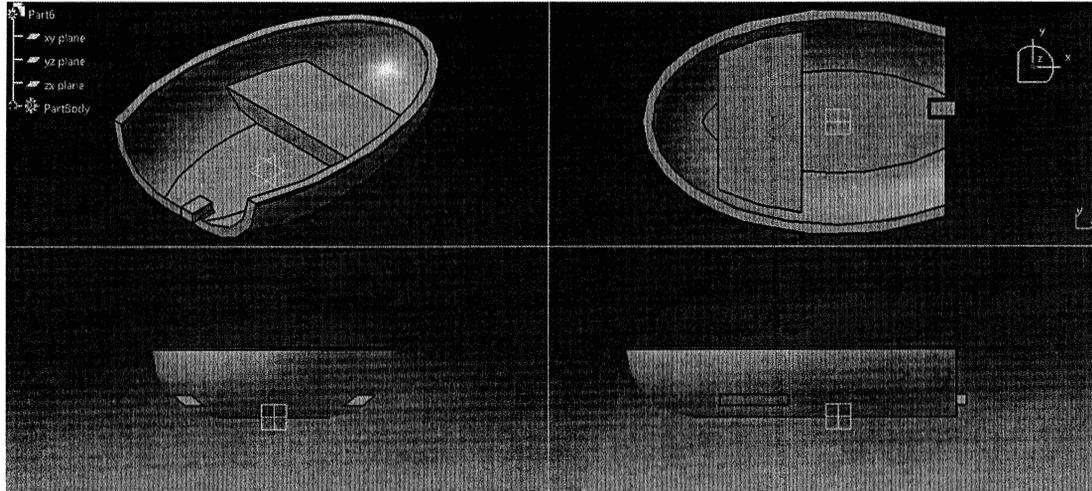


Figure 4.8: Modèle modifié de PAS (vue modifiée de la 3^{ème} partie)

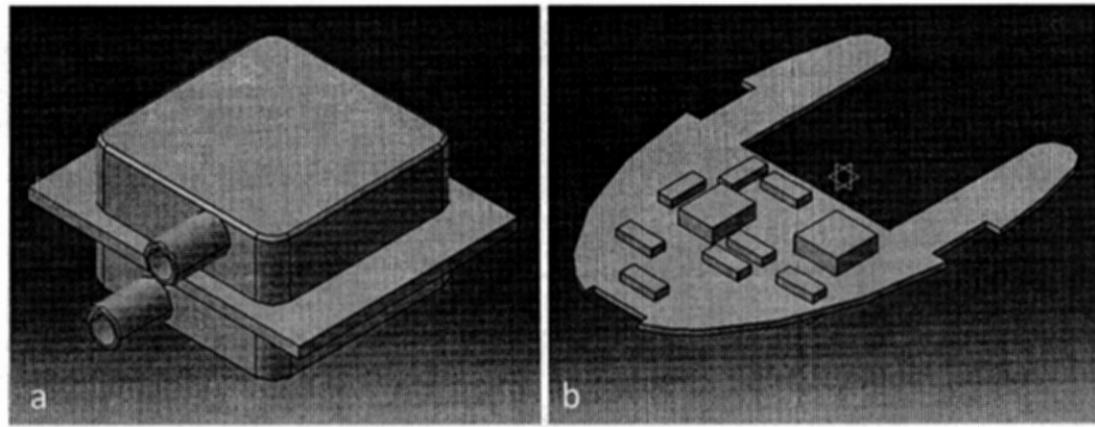


Figure 4.9: Représentation 3D du diagramme des composants électroniques. a) Capteur de pression différentiel. (b) Circuit PCB avec les composants

Deux tubes de pression séparés (Pitot et statique) ont été considérés sur le côté avant de la partie centrale du PAS (Figure 4.10), pointant directement vers l'écoulement du fluide. Pour une meilleure mesure de la température et de l'humidité, un trou carré a été ajouté à la partie centrale du PAS, près des porte-broches de l'absorbeur, tandis qu'un petit filtre couvre le trou pour empêcher l'eau de pénétrer dans le capteur et le reste des composants électroniques.

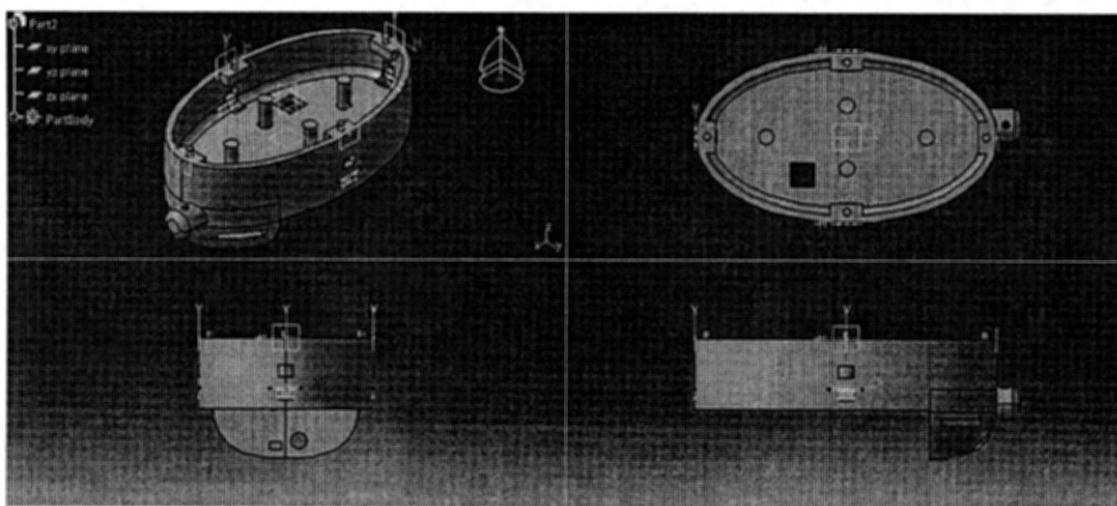


Figure 4.10: Modèle PAS modifié (vue de profile de la partie 4)

La Figure 4.11 montre les séquences d'installation de toutes les parties du PAS, y compris les cartes électroniques, et la Figure 80 montre le PAS final après l'installation et l'assemblage.

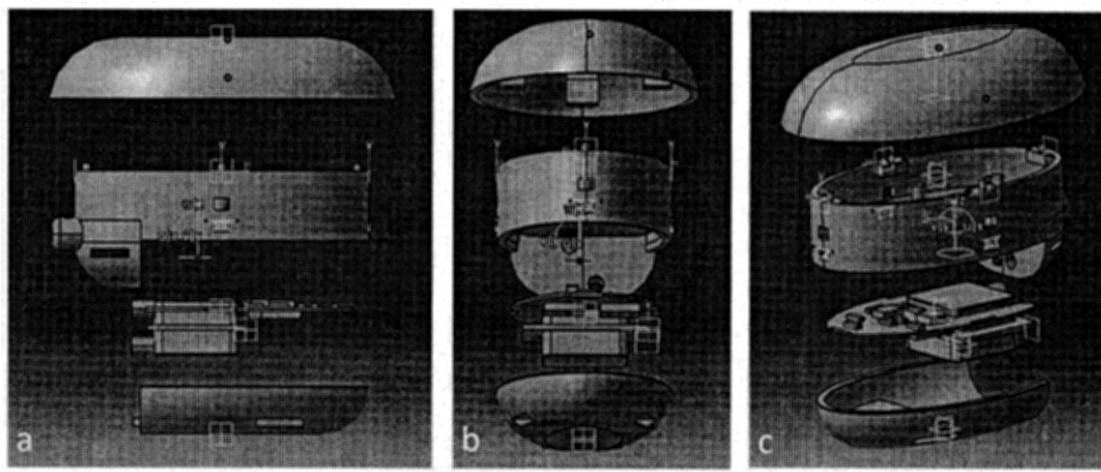


Figure 4.11: Représentation du PAS modifié. (a) Vue de profil. (b) Vue de derrière avec les trous de pression. (c) Vue 3D

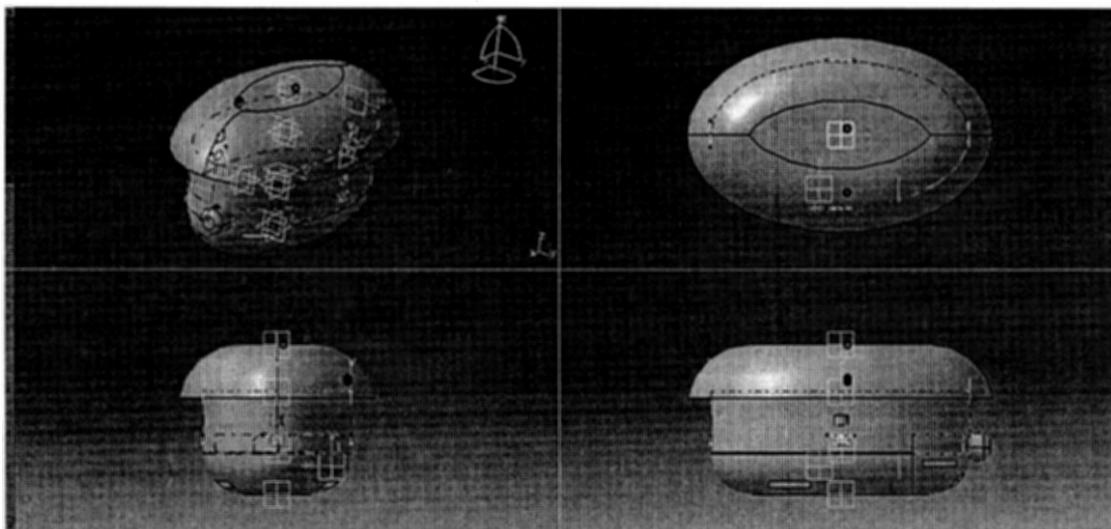


Figure 4.12: Représentation complète du PAS avec les 4 parties et les composants électroniques

La figure 4.13 montre une coupe transversale de PAS complet comprenant tous les composants électroniques. Les tubes de pression sont correctement ajustés à leurs tubes et le capteur de température humide est placé exactement sous son trou d'échantillonnage. L'espace intérieur est bien optimisé pour réduire le poids de l'appareil.

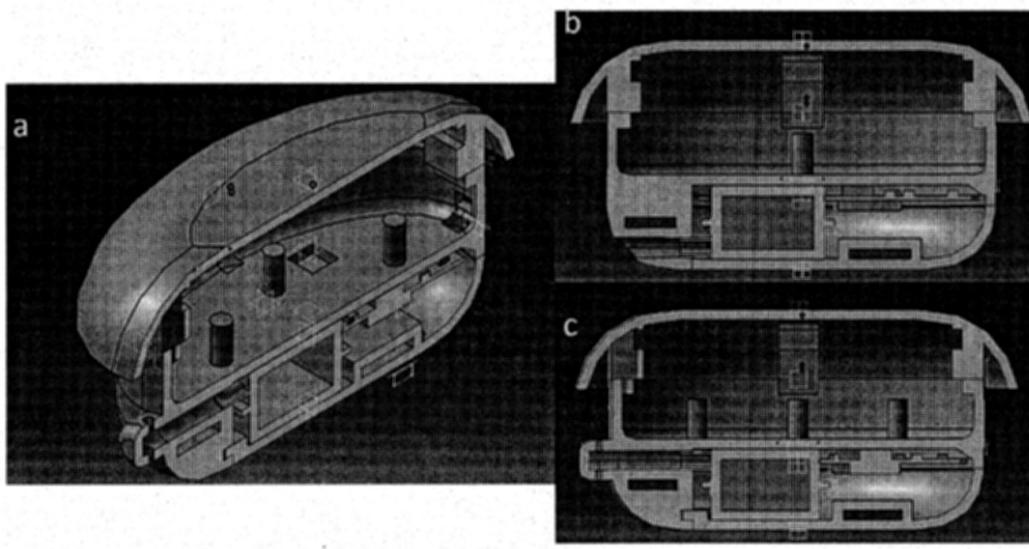


Figure 4.13: Coupes transversales complètes et finales du PAS, y compris tous les composants électroniques. (a) Vue 3D. (b) Vue latérale - Vue du tube de Pitot. (c) Vue latérale - Vue du tube statique

4.4 Simulation

Une simulation CFD a été réalisée sur un PAS modifié afin d'étudier la circulation de l'air à l'intérieur et à l'extérieur du PAS, notamment à l'intérieur du tube de pression statique et de la chambre du composant électronique.

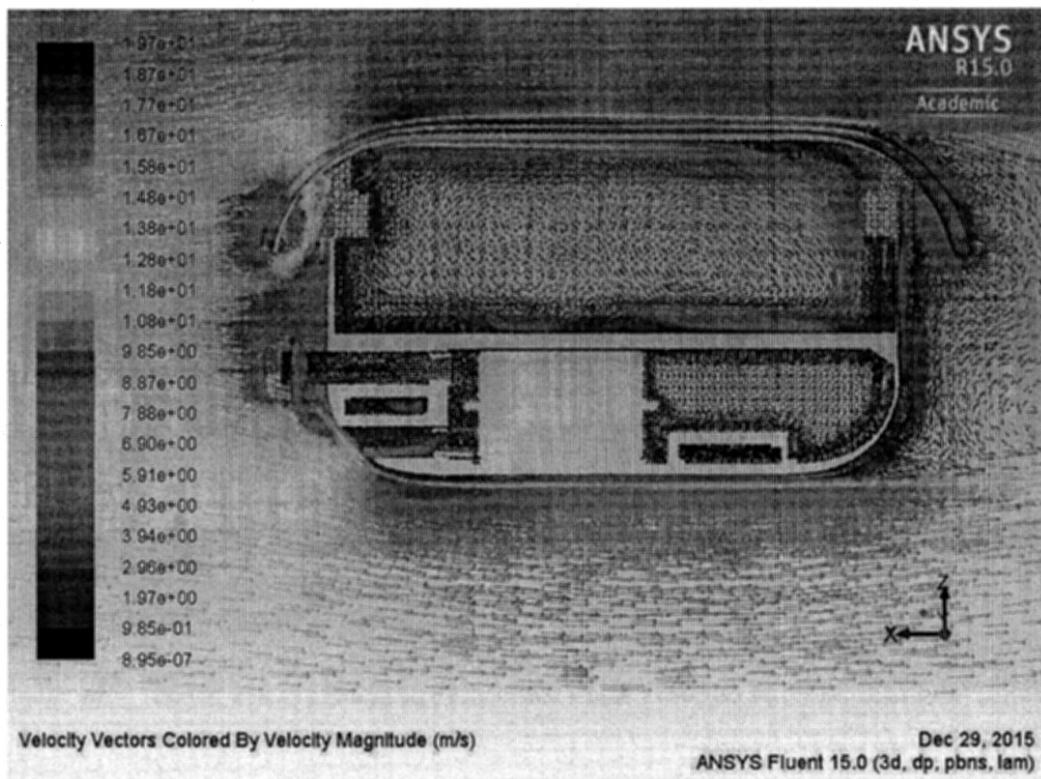


Figure 4.14: Simulation CFD sur PAS complet, résultats sur plan Y, statique et tube de Pitot inclus

Comme le montre la figure 4.14, l'échantillonnage de la circulation de l'air autour (au-dessus et en dessous) du PAS a à peu près les mêmes effets que le PAS sans capteurs. La vitesse du fluide à l'intérieur de la partie supérieure où le fluide a pénétré pour la première fois dans le PAS a une valeur d'environ 10 m / s. Par rapport au PAS sans capteurs, la vitesse du fluide dans cette zone augmente de 4m / s mais elle affecte seulement une très fine couche de fluide qui est proche de la partie supérieure et après déviation avec courbe intérieure, située dans la partie supérieure, elle diminue à environ 4-6 m / s, ce qui est égal au dernier PAS. Après distraction, l'air d'échantillonnage effectue une bonne circulation à l'intérieur de la partie inférieure sous et au-dessus de la position du milieu d'échantillonnage.

La simulation CFD montre également que l'air d'échantillonnage pénètre dans les trous du tube statique sans circulation importante à l'intérieur du tube. Cela signifie qu'il est parfaitement fermé les trous statiques et maintient la pression à l'intérieur du tube comme la même pression que l'environnement tandis que le fluide enfonce complètement le tube de Pitot (Figure 4.14, 4.17) et en raison du bon alignement pour la troisième partie couvre cette chambre électronique) il n'y a pas de circulation de fluide à l'intérieur et la valeur du vecteur vitesse est d'environ 1 m / s.

De plus, la Figure 4.15 et la Figure 4.16 montrent que les deux parties se chevauchent bien et que même en augmentant de 4 mm la partie inférieure, l'air d'échantillonnage avec une vitesse égale à 15 m / s ne peut pas entrer dans le PAS et et la partie inférieure, elle dévie autour du PAS sans trop augmenter sa vitesse.

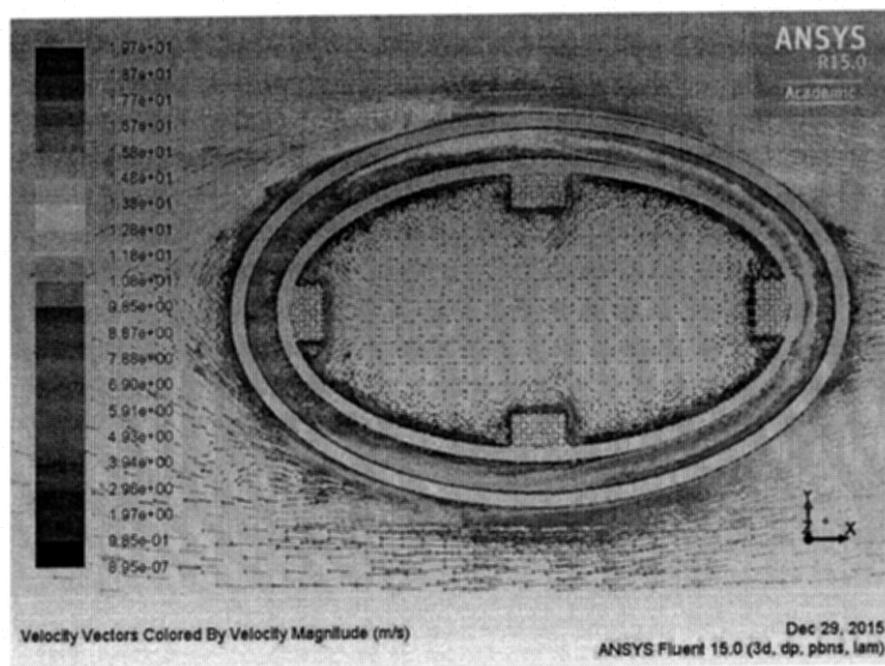


Figure 4.15: Simulation CFD sur PAS modifié, résultats sur plan Z et près de la zone de chevauchement des parties supérieure et inférieure

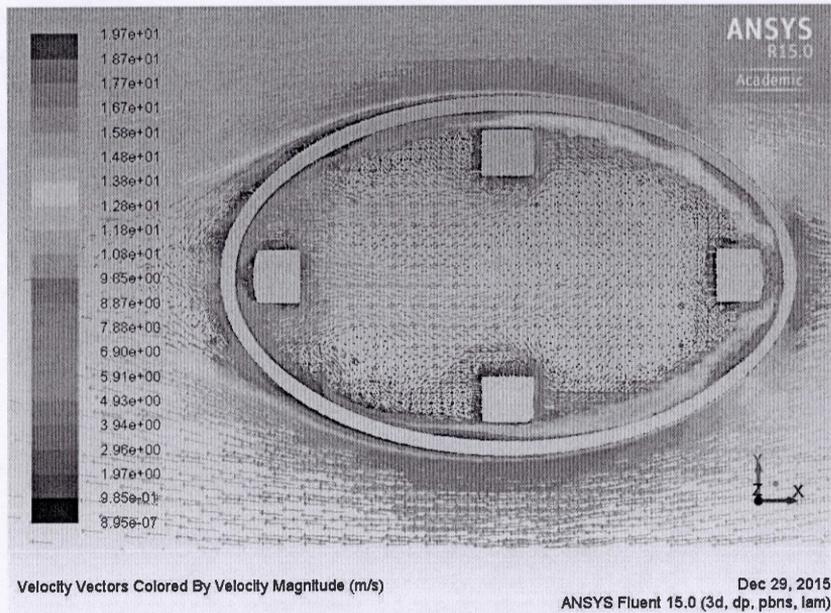


Figure 4.16: Simulation CFD sur PAS modifié, résultats sur plan Z et près de la partie haute à proximité de l'aire d'échantillonnage

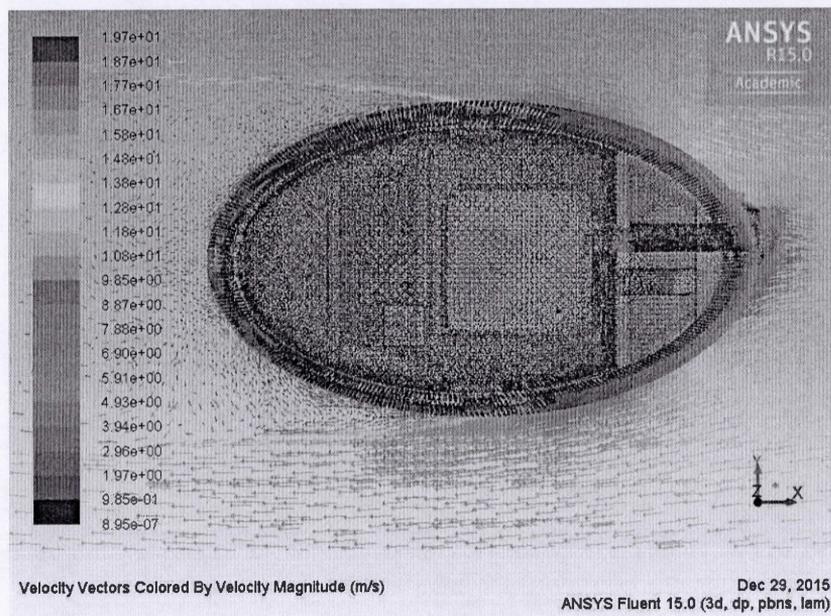


Figure 4.17: Simulation CFD sur PAS modifié, résultats sur la vue de dessus du plan Z, toutes les pièces, les tubes de force et les composants électroniques inclus

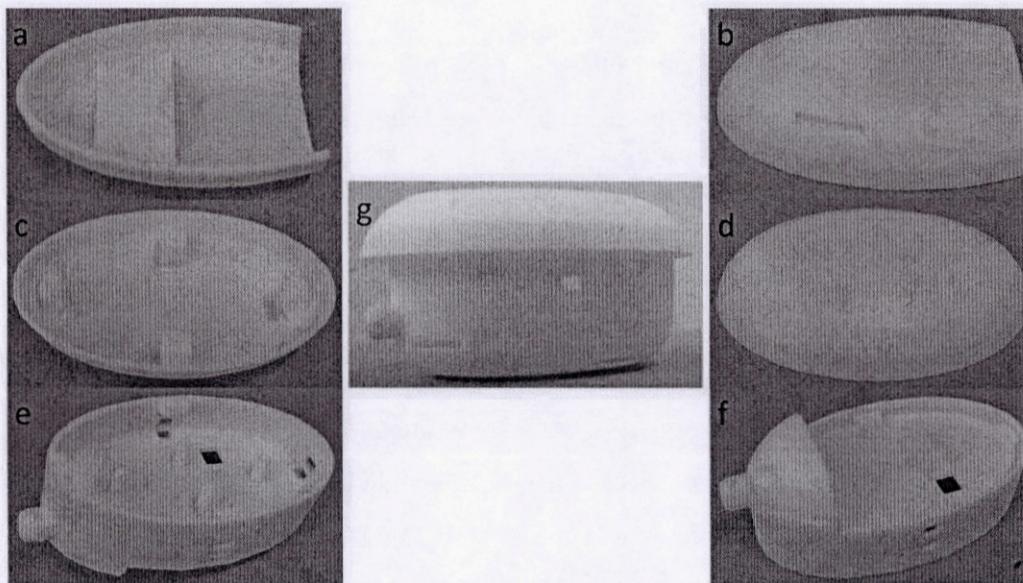


Figure 4.20: PAS modifié pour intégrer les capteurs actifs, fabriqués avec la technologie d'impression 3D. (a) Troisième partie à l'intérieur. (b) Troisième partie à l'extérieur. (c) Partie supérieure à l'intérieur. (d) Partie supérieure à l'extérieur. (e) Vue de dessus de la partie médiane. (f) Vue de dessous de la partie médiane. (g) PAScomplet et assemblé

Table 4.2 : Conception 7 calcul de la force de traînée

Numéro de conception	Surface frontale (mm ²)	Coefficient de traînée	Valeur de force de traînée (Newton)
Conception 7 (capteur embarqué)	755.5	0.040412487	0.00406647

4.5 Validation et étalonnage du capteur

Afin d'utiliser les données du capteur, elles doivent être comparées et validées à l'aide d'un anémomètre qui est généralement utilisé comme outil de mesure dans le département de l'environnement et de la biologie. L'anémomètre universel PASCO 850 (Figure 4.21) a été utilisé pour la validation et l'étalonnage des capteurs. Il contient un logiciel qui pourrait être installé sur un PC, une interface qui sera connectée à tous les outils de mesure et à l'ordinateur et aux outils de mesure. L'outil de mesure est constitué d'une température, d'un capteur humide et d'un ventilateur. Lorsque l'outil de mesure est contre le flux de fluide, le fluide traverse la chambre des capteurs et le ventilateur du générateur de tension. Le ventilateur tourne avec une vitesse spécifique qui dépend de la vitesse du fluide. Ensuite, il va générer une tension qui sera mesurée et convertie à la vitesse du fluide.

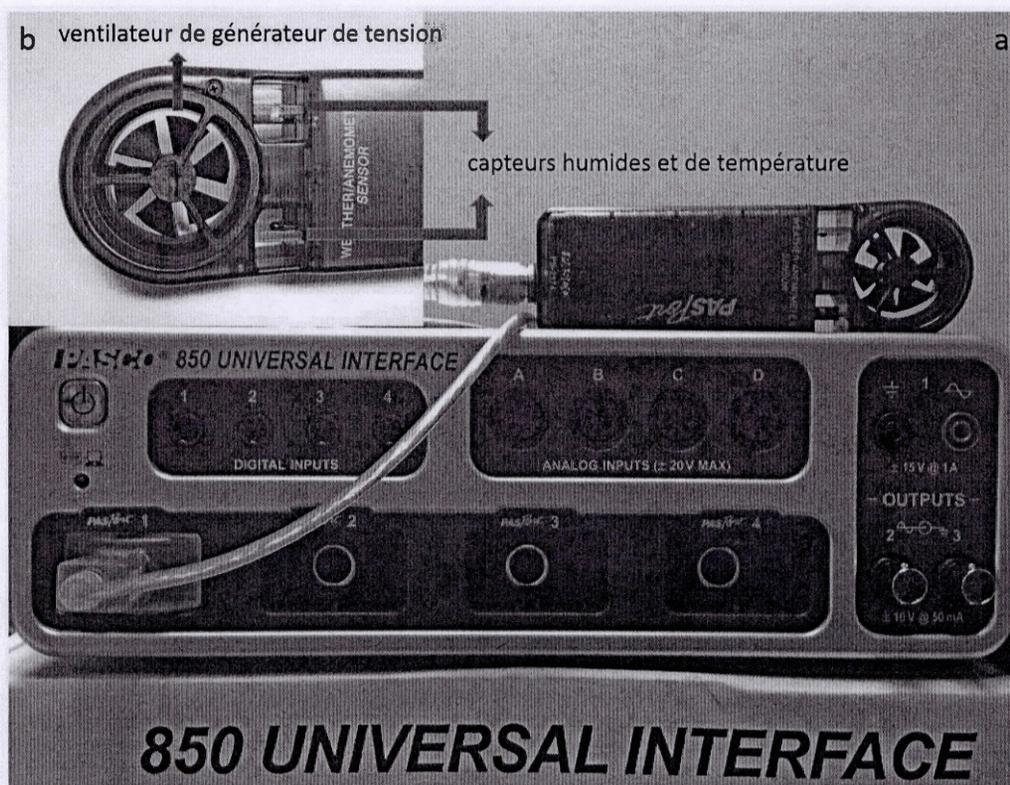


Figure 4.21: Anémomètre universel PASCO 850. (a) Interface périphérique et outils de mesure. (b) Outil de mesure qui utilise des capteurs d'humidité et de température séparés et un ventilateur comme générateur de tension.

Afin de valider la sortie des capteurs et de les comparer avec la valeur des sorties anémométriques, la configuration suivante a été utilisée (Figure 4.22). Une pompe a été utilisée pour faire circuler l'air dans l'anémomètre et les capteurs. La vitesse du flux d'air a été contrôlée avec une vanne manuelle afin de réaliser plusieurs tests avec différentes vitesses de fluide. L'air a été pompé dans un tube qui a été connecté à un connecteur de type U afin de diviser l'air circulant dans deux tubes indépendants. Chaque tube était relié à une buse pour accélérer la vitesse de l'air. Un outil de mesure anémométrique et des capteurs PAS ont été fixés devant chaque buse avec une distance de 10 cm et cette configuration a été utilisée pour tous les tests.

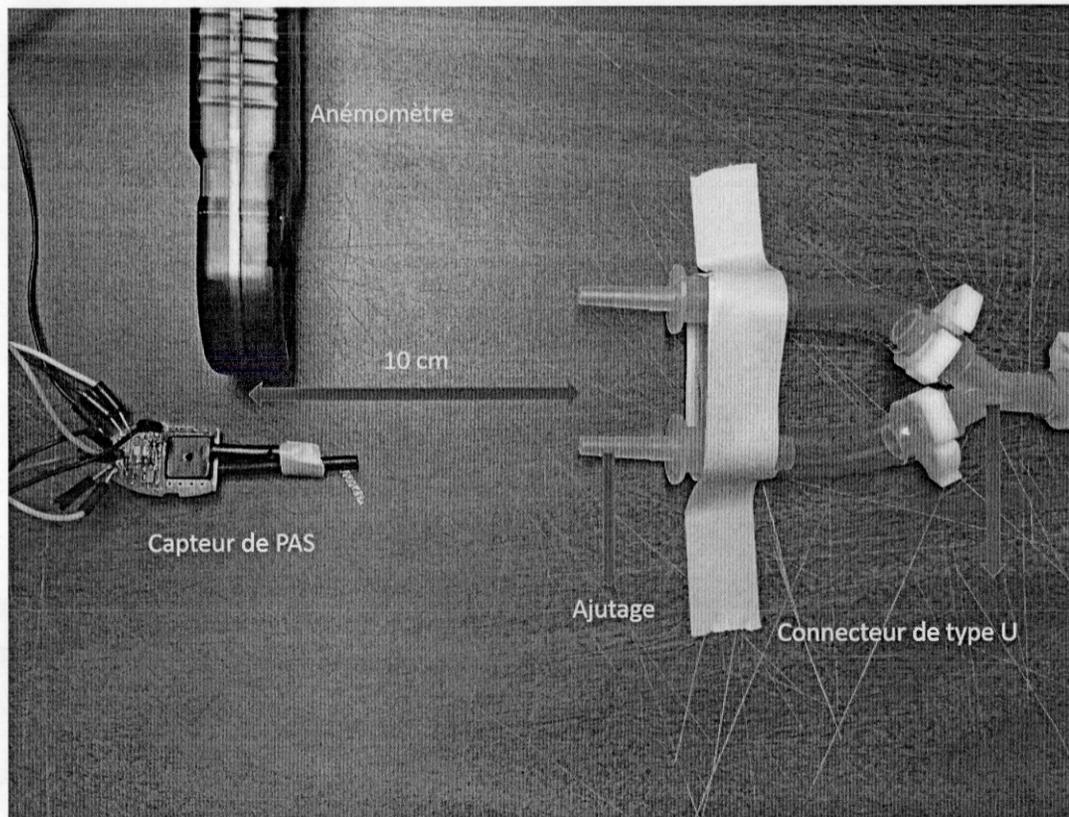


Figure 4.22: Prise en compte de la configuration pour la validation et l'étalonnage des capteurs PAS avec un anémomètre

On a essayé d'avoir la même fréquence d'échantillonnage qu'un anémomètre qui était de 1 échantillon par 0,2 seconde. Chaque test a été fait pendant deux minutes et il a été répété six fois avec six vitesses différentes (2, 4, 8, 10, 15, 20 m / s). Comme il ressort des figures 4.23 et 4.24, les essais préliminaires ont montré que les sorties des capteurs de vitesse ont plus de variation par rapport aux sorties des anémomètres. Afin de résoudre le problème de variation, la fréquence d'échantillonnage a été augmentée à vingt fois pendant 0,2 seconde et la moyenne de tous ces vingt échantillons a été considérée comme valeur de sortie pour le capteur de vitesse anémométrique PAS.

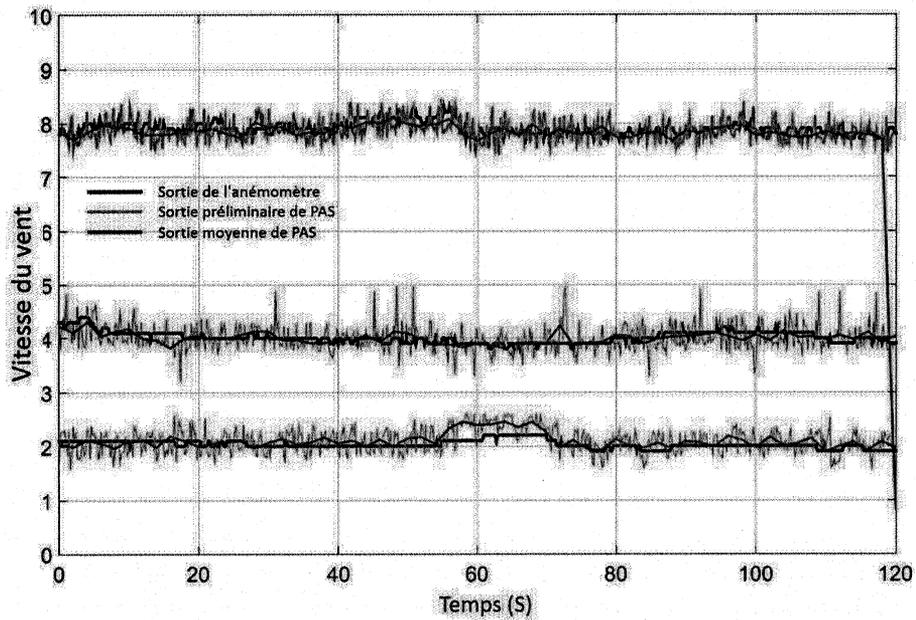


Figure 4.23: Résultats de sortie préliminaires et calibrés du PAS comparés aux résultats de sortie de l'anémomètre (mesurés pour des vitesses de 2, 4 et 8 m / s)

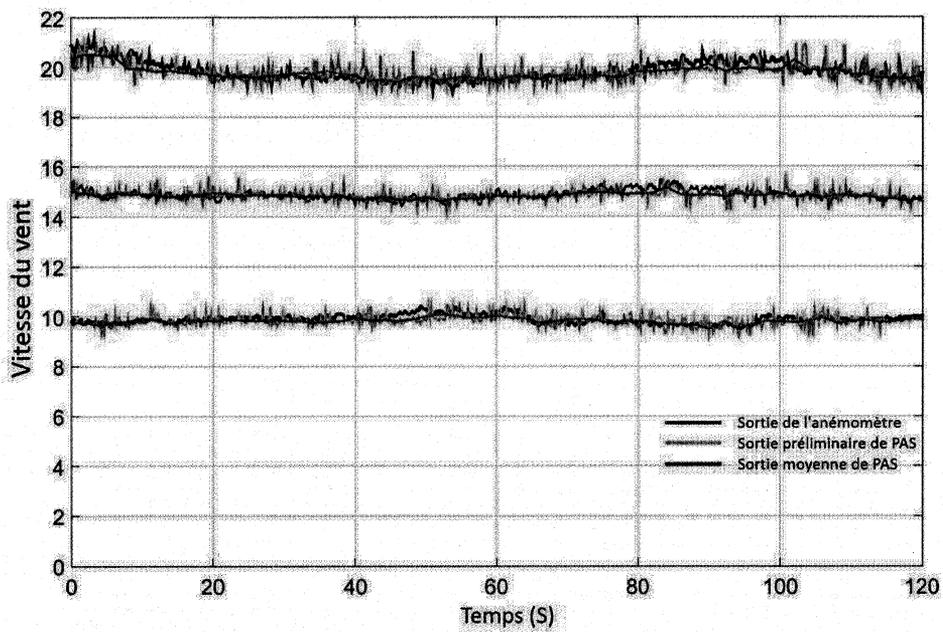


Figure 4.24: Résultats de sortie préliminaires et calibrés du PAS comparés aux résultats de sortie de l'anémomètre (mesurés pour des vitesses de 10, 15 et 20 m / s)

Pour les capteurs de température et d'humidité, les sorties du PAS étaient à peu près les mêmes que les sorties de l'anémomètre et il n'était pas nécessaire de procéder à un autre étalonnage pour ces deux types de mesure (Figure 4.25, 4.26).

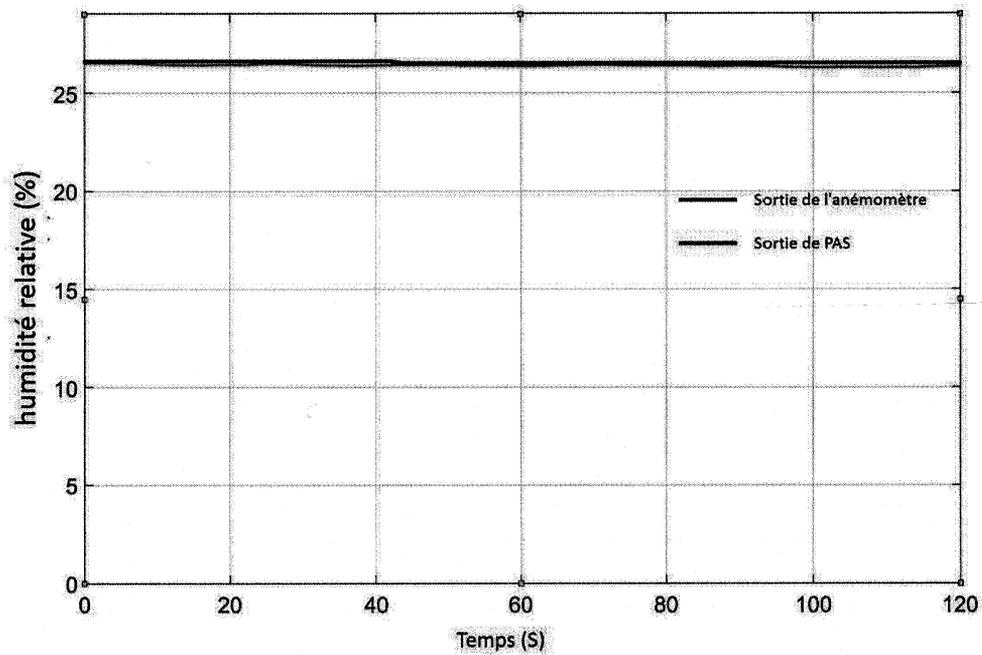


Figure 4.25: Graphique de comparaison de température

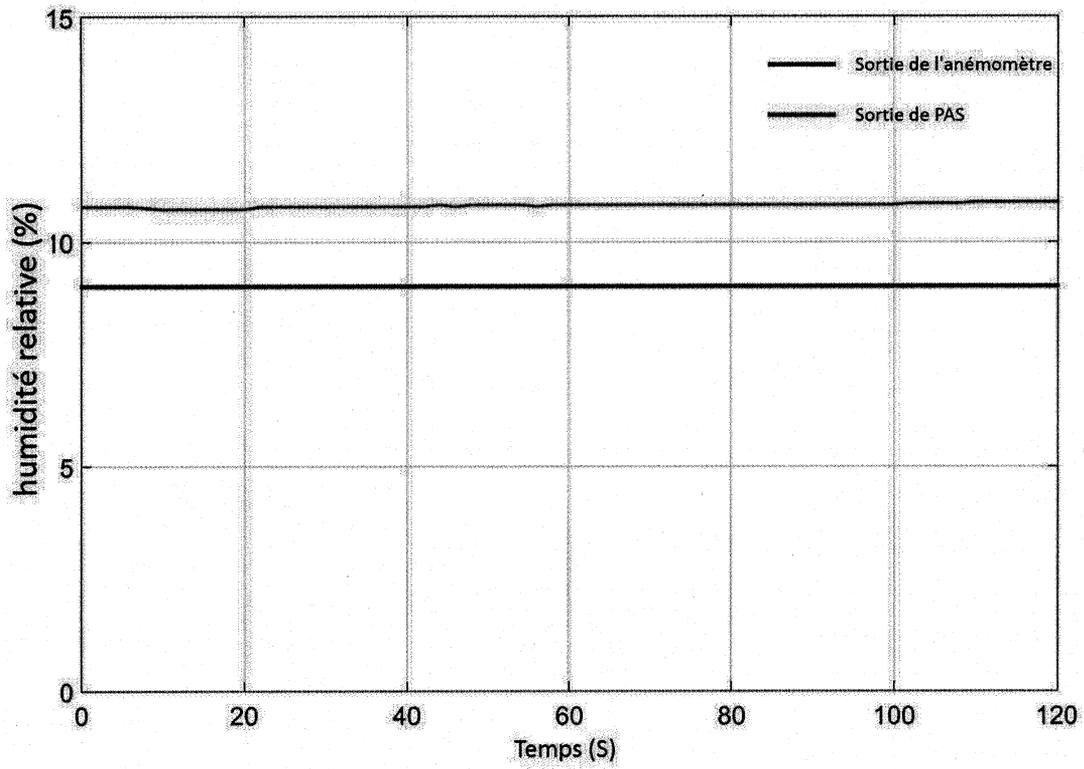


Figure 4.26: Graphique de comparaison d'humidité relative

RÉSUMÉ ET DISCUSSION

Au cours des dernières années, l'augmentation spectaculaire du nombre de produits chimiques nocifs déversés dans l'écosystème pose des problèmes importants. Ces produits chimiques sont constamment rejetés dans les écosystèmes et peuvent se bioaccumuler dans diverses espèces. Dans ce travail, dans le cadre d'un projet en collaboration avec le département de biologie qui étudie la contamination des oiseaux, un échantillonneur d'air passif traditionnel a été miniaturisé. Afin de capturer les composés souhaités, un échantillonneur d'air passif habituel conçu et miniaturisé dans certaines conditions. Ces conditions dépendent de la physiologie et de l'environnement de l'oiseau, puisque ces PAS doivent être montés sur les oiseaux pour les transporter partout où ils volent afin de trouver la source de ces contaminations.

Pour résoudre ce problème, plusieurs concepts ayant des caractéristiques différentes ont été présentés et simulés avec le logiciel de simulation ANSYS-Fluent en tant qu'échantillonneur d'air passif miniaturisé. La simulation CFD (dynamique des fluides computationnelle) a été réalisée sur tous les concepts afin de trouver: 1- le flux d'air à l'intérieur et à l'extérieur du PAS, 2- la façon dont l'air s'expose à la surface des absorbeurs 3- le coefficient de traînée (CD) pour quantifier la traînée ou la résistance des conceptions dans un environnement fluide (air). Basé sur un processus continuellement modifié par la conception, le design 6 a été approuvé par le département de biologie car il couvre les limites du projet. Il peut inhaler l'air d'échantillonnage dans toutes les directions tout en diminuant la vitesse de l'air d'échantillonnage en chevauchant la partie supérieure et la partie inférieure. Il est imprimé à partir de matière plastique non-transparente (Polyamide modèle PA2200) pour protéger les médiums d'échantillonnage à l'intérieur de la lumière du soleil. Ce matériau est également persistant contre les solvants organiques utilisés pour nettoyer le PAS avant utilisation et il est assez léger pour apporter l'avantage de 2,875gr de

poids par PAS complet (partie supérieure et inférieure). Le PAS miniaturisé peut être équipé de supports d'échantillonnage multicouches dans trois couches différentes, ce qui augmente la surface active du support d'échantillonnage.

En continu, le PAS approuvé est modifié de manière à pouvoir être équipé de quelques capteurs électroniques actifs tout en respectant toutes les conditions précédentes. Une humidité précise - Des capteurs de température et de pression différentielle ont été ajoutés au PAS afin d'enregistrer la vitesse de l'air et sa valeur d'humidité et de température. Les capteurs ont été étalonnés avec un anémomètre avec une vitesse d'air différente. Tous les composants électroniques ont été choisis parmi les composants à très basse consommation (consommation électrique totale de tous les composants = 0,00008 Wh) afin de réduire la consommation électrique de l'appareil ce qui prolongera la période d'échantillonnage.

Le PAS miniaturisé approuvé a été imprimé et installé sur le dos des oiseaux, équipé de différents types d'absorbants. La mousse de polyuréthane a été utilisée comme absorbeur bien connu accompagné d'un filtre en fibres de verre tandis que le polydiméthylsiloxane et l'oxyde de graphène ont également été utilisés pour étudier leur fonctionnalité. Les PAS ont été déployés à l'arrière des oiseaux pendant 1, 2 et 3 semaines, puis ramenés au laboratoire pour analyse. L'analyse sur les adsorbants montre que différents types de retardateurs de flammes, y compris trois types de DDT, 15 types de PBDE et également hexabromodécalène ont été capturés. Les résultats des PAS munis de milieux d'échantillonnage PUF-FFV montrent que la masse totale des composés mentionnés était égale à 1 ng pour ceux étudiés pour une durée d'une semaine, moins de 2 ng pour une durée de 2 semaines et moins de 3 ng pour une durée de 3 semaines. De plus, la même analyse sur les PAS qui étaient équipés de PDMS montre la masse totale des composés mentionnés autour de moins de 2 ng pour une durée de 1 à 2 semaines et de moins de 4 ng pour une durée de 3 semaines. Les résultats indiquent que Montréal est clairement un point névralgique pour différents types d'ignifugeants halogénés dans les phases gazeuse et particulaire.

Ce projet comportait plusieurs limites qui doivent être prises en compte en raison de la réglementation éthique. Le premier et le plus important concernait le poids de l'équipement. Le poids total du PAS, y compris les adsorbants et le harnais sur mesure, ne doit pas dépasser 3% du poids des oiseaux. Le PAS devrait représenter la durée de l'étude par temps rigoureux. La couleur du PAS devrait être en quelque sorte identique à celle de la plume d'oiseau afin d'être camouflée par les autres oiseaux. Il devrait également rester pendant la procédure de nettoyage avec des solvants organiques. La forme aérodynamique de la conception était une autre chose importante qui a été considérée dans ce travail. Le PAS devrait être conçu de manière à éviter de compromettre le vol des oiseaux. En outre, il convient de considérer que tous les matériaux, y compris le PAS, les adsorbants, le harnais ou les colles, doivent être exempts de HFR afin d'avoir une meilleure évaluation de l'analyse.

CONCLUSION

Dans ce travail, un échantillonneur d'air passif miniaturisé pouvant être monté et porté par un oiseau de taille moyenne est présenté. Une simulation CFD a été réalisée sur la conception afin d'étudier le flux d'air à l'intérieur et à l'extérieur de la conception et également autour de la position des adsorbants.

La technologie d'impression 3D a été utilisée pour fabriquer le dispositif final. Divers types de matériaux avec différents poids, couleurs et résistance physique peuvent être utilisés par cette technologie. Le dispositif fabriqué était équipé de différents types d'adsorbants et monté sur des oiseaux pour l'étude. Par la suite, le PAS a été modifié de telle sorte qu'il pourrait être équipé de quelques capteurs afin de mesurer la vitesse, la température et l'humidité de l'air d'échantillonnage en tant que données complémentaires pour une meilleure analyse des adsorbants. Selon nos connaissances, il s'agit du premier échantillonneur d'air passif miniaturisé pouvant être transporté par un oiseau. De plus, l'analyse des adsorbants montre qu'en équipant ce dispositif de différents types d'adsorbants, on peut capturer à la fois la phase gazeuse et la phase particulaire des composés ignifugeants, ce qui est un grand avantage pour suivre la source des pollutions.

Il y a quelques points dans cette thèse qui pourraient être développés et il y a plusieurs lignes de recherche découlant de ce travail qui devraient être poursuivies. Tout d'abord, il serait intéressant de tester le PAS avec d'autres types d'adsorbants spécialement l'oxyde de graphène afin de connaître sa fonctionnalité et son efficacité. Il est recommandé d'ajouter un autre type de capteur qui pourrait aider le biologiste à mieux évaluer ses résultats. Dans la prochaine étape, le PAS peut être équipé d'un capteur actif spécialement conçu pour ce type de gaz ou de composés. Il peut ensuite être intégré à l'intérieur du dispositif microfluidique de manière à respecter toutes les caractéristiques du PAS. La forme PAS

comme points de précision et aérodynamique peut être améliorée afin d'être adaptée aux oiseaux volants à grande vitesse. En outre, il est recommandé de tester le PAS modifié, équipé de capteurs électroniques présentés sur le champ, car en raison de la période limitée du projet, il n'y avait aucune chance de les tester sur le terrain.

Références

- Abdallah, M.A.-E. et Harrad, S. (2010). Modification and calibration of a passive air sampler for monitoring vapor and particulate phase brominated flame retardants in indoor air: application to car interiors. *Environmental science & technology*, 44(8), 3059-3065.
- Barclift, M.W., Williams, C.B.. (2012). *Examining variability in the mechanical properties of parts manufactured via polyjet direct 3d printing*. International Solid Freeform Fabrication Symposium, August.
- Bayer, O. (1947). Das Di-Isocyanat-Polyadditionsverfahren (Polyurethane). *Angewandte Chemie*, 59(9), 257-272.
- Bohlin, P., Jones, K.C., Levin, J.-O., Lindahl, R. et Strandberg, B. (2010). Field evaluation of a passive personal air sampler for screening of PAH exposure in workplaces. [10.1039/C0EM00018C]. *Journal of Environmental Monitoring*, 12(7), 1437-1444.
- Bulbul, A., Hao-Chieh, H., Hanseup, K.. (2014, 26-30 Jan. 2014). *Microfluidic bubble-based gas sensor*. Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2014 IEEE 27th International Conference on.
- Chua, C.K. et Leong, K.F. (2003). *Rapid prototyping: principles and applications*. (Vol. 1) : World Scientific.
- Dreyer, D.R., Park, S., Bielawski, C.W. et Ruoff, R.S. (2010). The chemistry of graphene oxide. *Chemical Society Reviews*, 39(1), 228-240.
- Elmajdub, E.N.F.A. et Bharadwaj, A. Important Pitot Static System in Aircraft Control System.

- European Centre for, E. et Toxicology of, C. (1983). Joint assessment of commodity chemicals. *Joint assessment of commodity chemicals*. /z-wcorg/.
- Hazrati, S. et Harrad, S. (2007). Calibration of polyurethane foam (PUF) disk passive air samplers for quantitative measurement of polychlorinated biphenyls (PCBs) and polybrominated diphenyl ethers (PBDEs): Factors influencing sampling rates. *Chemosphere*, 67(3), 448-455.
- Hoerner, S.F. (1965). *Fluid-dynamic drag: practical information on aerodynamic drag and hydrodynamic resistance*. : Hoerner Fluid Dynamics.
- Hull, C.W. (1986). *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography* : Google Patents.
- Hummers Jr, W.S. et Offeman, R.E. (1958). Preparation of graphitic oxide. *Journal of the American Chemical Society*, 80(6), 1339-1339.
- Khaing, M., Fuh, J. et Lu, L. (2001). Direct metal laser sintering for rapid tooling: processing and characterisation of EOS parts. *Journal of Materials Processing Technology*, 113(1), 269-272.
- Klopfenstein Jr, R. (1998). Air velocity and flow measurement using a Pitot tube. *ISA transactions*, 37(4), 257-263.
- Kumar, S. (2003). Selective laser sintering: a qualitative and objective approach. *Jom*, 55(10), 43-47.
- Li, S., Day, J.C., Park, J.J., Cadou, C.P. et Ghodssi, R. (2007). A fast-response microfluidic gas concentrating device for environmental sensing. *Sensors and Actuators A: Physical*, 136(1), 69-79.
- Marcano, D.C., Kosynkin, D.V., Berlin, J.M., Sinitskii, A., Sun, Z., Slesarev, A., Alemany, L.B., Lu, W. et Tour, J.M. (2010). Improved Synthesis of Graphene Oxide. *ACS Nano*, 4(8), 4806-4814.

- Martini, V., Bernardini, S., Bendahan, M., Aguir, K., Perrier, P. et Graur, I. (2012). Microfluidic gas sensor with integrated pumping system. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 170(0), 45-50.
- May, A.A., Ashman, P., Huang, J., Dhaniyala, S. et Holsen, T.M. (2011). Evaluation of the polyurethane foam (PUF) disk passive air sampler: Computational modeling and experimental measurements. *Atmospheric Environment*, 45(26), 4354-4359.
- Mu, X., Ward, N., Li, L., Li, W., Mason, A.J., Covington, E., Serrano, G., Kurdak, C., Zellers, E. (2012, 20-23 May 2012). *CMOS monolithic chemiresistor array with microfluidic channel for micro gas chromatograph*. Circuits and Systems (ISCAS), 2012 IEEE International Symposium on.
- Nelson, R.C. (1998). *Flight stability and automatic control*. (Vol. 2) : WCB/McGraw Hill.
- Park, E.J., Cho, Y.K., Kim, D.H., Jeong, M.-G., Kim, Y.H. et Kim, Y.D. (2014). Hydrophobic Polydimethylsiloxane (PDMS) Coating of Mesoporous Silica and Its Use as a Preconcentrating Agent of Gas Analytes. *Langmuir*, 30(34), 10256-10262.
- Pitot, H. (1732). Description d'une machine pour mesurer la vitesse des eaux courantes et le sillage des vaisseaux. *Mémoires de L'Académie*.
- Prisacariu, C. (2011). Chemistry of polyurethane elastomers. Dans *Polyurethane Elastomers* (p. 1-22) : Springer.
- Qin, D., Xia, Y. et Whitesides, G.M. (2010). Soft lithography for micro- and nanoscale patterning. [10.1038/nprot.2009.234]. *Nat. Protocols*, 5(3), 491-502.
- Seymour, R.B. et Kauffman, G.B. (1992). Polyurethanes: A class of modern versatile materials. *J. Chem. Educ*, 69(11), 909.
- Thomas, J., Holsen, T.M. et Dhaniyala, S. (2006). Computational fluid dynamic modeling of two passive samplers. *Environmental Pollution*, 144(2), 384-392.
- Tuduri, L., Harner, T. et Hung, H. (2006). Polyurethane foam (PUF) disks passive air samplers: Wind effect on sampling rates. *Environmental Pollution*, 144(2), 377-383.

- Vandenabeele, S.P., Grundy, E., Friswell, M.I., Grogan, A., Votier, S.C. et Wilson, R.P. (2014). Excess baggage for birds: inappropriate placement of tags on gannets changes flight patterns. *PloS one*, 9(3), e92657.
- Ward, N., Mu, X., Serrano, G., Covington, E., Kurdak, C., Zellers, E.T., Mason, A.J. et Li, W. (2012). Microfluidic-packaged CMOS chemiresistor detector for micro-scale gas chromatograph. *Micro & Nano Letters, IET*, 7(8), 721-724.
- Xiao, H., Hung, H., Harner, T., Lei, Y.D., Johnston, G.W. et Wania, F. (2007). A flow-through sampler for semivolatile organic compounds in air. *Environmental science & technology*, 41(1), 250-256.