

DAVID ST-ONGE

**MODÉLISATION ET COMMANDE D'UN ROBOT
VOLANT ROBUSTE**

Mémoire présenté
à la Faculté des études supérieures et postdoctorales de l'Université Laval
dans le cadre du programme de maîtrise en génie mécanique
pour l'obtention du grade de maître ès sciences (M.Sc.)

FACULTÉ DES SCIENCES ET DE GÉNIE
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

2011

Abstract

The Tryphons and their predecessors from the [VOILES | SAILS] project are large cubic indoor blimps used autonomously or in remote control mode. Each of these aerobot is equipped with a main micro-computer on-board, a variety of sensors and a wireless communication interface.

From a mechanical engineering point of view, the unique shape of these robots and the constraint of their original application field makes them the subject of a novel development path in the study of the dynamics and the flight control.

Among the issues that this study had to deal with the focus was put on circuits, wires and connectors reliability, batteries manipulation and fixation while hovering above people, complex manual equilibration of the yaw and pitch moments, complex calibration of the controller's parameters before each performance.

The research performed during this Master's degree focused on three main objectives:

1. To develop a numerical dynamic model of the robots in order to determine the critical aspects of the design and how to enhance their robustness.
2. To analyze the electromechanical components of the robots and to modify their design to allow long-lasting and repetitive public performances.
3. To select the appropriate optimal method of positioning in an indoor theater environment for robustness and maximum autonomy.

This study demonstrates that the mechanical robustness of these aerobots can be achieved by a new design of the circuits and of the wiring, which integrates them to

the structure, and by new custom battery fixations. For the control robustness, a modular approach led to multiple user-selectable controllers. The user can choose a controller and adapt its parameters to find the best fit for each specific situation. A new controller was also developed, which ensures a complete control of the six degrees of freedom by dead reckoning. This was achieved through the use of accelerometers, 3 axis magnetometer, an altimeter and a camera.

Résumé

Les Tryphons, tout comme leurs prédécesseurs du projet [VOILES | SAILS], sont des aérostats intérieurs de forme cubique, autonomes ou pilotés. Ils sont tous équipés d'un micro-ordinateur de bord, de différents capteurs et d'une interface de communication sans fil.

D'un point de vue mécanique, la géométrie unique et le domaine d'application original des Tryphons en font un sujet de recherche nouveau pour l'étude de la dynamique du vol et de son contrôle.

Parmi les problèmes concernés par cette étude, l'emphase a été portée sur la fiabilité des circuits, câbles et connecteurs, la manipulation et la fixation des batteries pour des vols au-dessus d'une foule, l'équilibrage manuel complexe des moments d'assiette longitudinale et de gîte, la calibration complexe des nombreux paramètres du contrôleur à chaque performance.

Dans le cadre de cette maîtrise les objectifs de recherche et le contenu de cette thèse couvrent :

1. Le développement d'un modèle dynamique virtuel des robots permettant de cerner les aspects critiques de la fiabilité et de la robustesse de leurs systèmes. Ce modèle est d'abord développé de manière théorique, en se basant sur la littérature pertinente, principalement du domaine des aérostats extérieurs. Ce modèle, comprenant une approximation des effets aérodynamiques, est optimisé au moyen de tests sur le robot. Grâce au modèle optimisé, différents facteurs, comme le positionnement d'équipement en différents endroits sur la structure et le rapprochement du centre de masse et du centroïde, sont étudiés numériquement.

2. L'analyse de la robustesse électro-mécanique des robots pour des interactions prolongées et répétitives. Cette étude se base principalement sur l'expertise empirique des divers intervenants ayant utilisé ces robots dans les dernières performances publiques. Les éléments critiques du design électro-mécanique sont identifiés puis leur conception est revue afin d'en augmenter la robustesse.
3. L'analyse de la méthode de positionnement absolue en salle de spectacle la plus robuste qui conserve un maximum d'autonomie du robot. En se référant à la littérature pertinente, et tout en considérant le temps limité de cette recherche, le système de positionnement complètement embarqué le plus prometteur a été sélectionné et développé. Les résultats de tests sur une partie du système sont présentés.

Il est démontré dans cette étude que la robustesse mécanique, dans le contexte de ce projet, est atteinte en concevant des circuits et leur filage solidaires à la structure et des supports de batteries sur mesure. La robustesse au niveau du contrôle est quant à elle améliorée en permettant aisément à l'utilisateur de passer d'un mode de contrôle à un autre afin de rapidement ajuster les paramètres et de trouver le mode le mieux adapté à chaque situation. En terme de contrôle une nouvelle approche a permis de positionner les éléments nécessaires à un contrôle complet des six degrés de liberté en navigation à l'estime. Un ensemble de capteurs comprenant un accéléromètre, un magnétomètre 3 axes, un altimètre et une caméra permet d'obtenir suffisamment de données pour accomplir cette tâche.

Table des matières

Abstract	iii
Résumé	v
Table des matières	vii
Liste des tableaux	xi
Table des figures	xiii
Introduction	1
1 Contexte et travaux reliés	5
1.1 Modélisation et dynamique	6
1.1.1 Historique	6
1.1.2 Hydrodynamique	7
1.1.3 Dynamique des dirigeables	9
1.1.4 Nouvelles géométries	12
1.1.5 Modélisation numérique	13
1.2 Art robotique	14
1.2.1 Historique	14
1.2.2 Modèle de collaboration	16
1.3 Perception et contrôle	18
1.3.1 Centrales inertielles	18
1.3.2 Sonars	19
1.3.3 Systèmes de vision	20
1.3.4 Stratégies de contrôle	22

2	Modélisation dynamique du robot	25
2.1	Modèle théorique	26
2.1.1	Matrice des masses et des inerties	28
2.1.2	Torseur dynamique	30
2.1.3	Torseur aérodynamique	31
2.1.4	Torseur du poids et de la poussée d'Archimède	33
2.1.5	Torseur de propulsion	34
2.2	Modèle numérique	35
2.2.1	Script Matlab	35
2.2.1.1	Programme principal	36
2.2.1.2	Modèle géométrique	36
2.2.1.3	Équation différentielles	36
2.2.1.4	Réactions aux moteurs	37
2.2.2	Modèle Simulink	37
2.3	Validation du modèle numérique et optimisation	37
2.3.0.1	Tests manuels	38
2.4	Simulations	43
2.4.1	Conception d'une configuration à 6 DDL	44
2.4.2	Effets de la distribution des équipements	45
3	Robustesse électro-mécanique	49
3.1	Survol de la structure	50
3.2	Turbines	51
3.3	Électronique	53
3.3.1	Câbles	54
3.3.2	Concentrateurs I2C	56
3.3.3	Contrôleurs de vitesse électronique	57
3.4	Batteries	59
4	Perception et commande	63
4.1	Sélection des capteurs	64
4.1.1	Sonars	65
4.1.2	Boussole	66
4.1.3	Altimètre	67
4.1.4	Accéléromètre	68
4.1.5	Caméra	75
4.2	Commande	80

4.2.1	Filtre de Kalman	80
4.2.2	PIDs spécialisés	82
5	Applications	85
5.1	Technologie des aérostats	85
5.2	Interaction Humain-Robot	87
5.2.1	Domaine artistique	88
5.3	Assemblage et collaboration	90
	Conclusion	93
	Bibliographie	99
A	ANNEXE A : SCHÉMAS DES CIRCUITS	105
A.1	Concentrateur	105
A.1.1	Régulation distribuée	105
A.1.2	Régulation centralisée	108
A.2	Alimentation	111
A.3	Altimètre	114

Liste des tableaux

2.1	Sommaire des erreurs quadratiques moyennes sur les 4 tests	42
3.1	Comparaison des matériaux étudiés pour les tubulures en polymère transparent	52
4.1	Gains théoriques du PID distribué	83

Table des figures

1	a- La ville volante de Krutikov [1], b- Le prototype de la rivière Pedicodiac (1999).	2
1.1	Aérostat de Henri Giffard - tiré de Louis Figuier, Les aérostats, Jouvett & Cie, Paris, 1887	6
1.2	Référenciel local - tiré de Li et Nahon[2].	9
1.3	Le poids et la poussée d'Archimède - Lozano[3].	10
1.4	a- Zeppelin NT, b- Sentinel 5000, tiré de [4]	11
1.5	a- "Blimp" sphérique (Sharf[5]), b- "Blimp" cylindrique (Kawamura[6])	13
1.6	Caption for LOF	15
1.7	16
1.8	Caption for LOF	16
1.9	Système de positionnement du robot Rimho - tiré de [7].	19
2.1	Repères inertiel et local	27
2.2	Calcul du volume d'hélium	34
2.3	Modèle Simulink du Tryphon	38
2.4	a- Impression de l'écran de visualisation animée des trajectoires, b- Tests manuels et prise de données	39
2.5	Comparaison du modèle sans ajustement et des tests réels (points)	40
2.6	a- Comparaison des itérations du modèle (moteurs à 25%) et des tests réels, b- Comparaison des itérations du modèle (moteurs à 50%) et des tests réels	41

2.7	a- Comparaison des itérations du modèle (moteurs à 75%) et des tests réels, b- Comparaison des itérations du modèle (moteurs à 100%) et des tests réels	41
2.8	Comparaison du modèle ajusté ($k = 3.8$) et des tests réels (points) . . .	43
2.9	Réactions (moments autour de l'axe x en bleu et y en rouge) simulées pour différentes configurations d'équipement	46
3.1	a- Joints en SLS et assemblage des membrures, b- Coin de la structure	51
3.2	a- Turbine ALFA et fixation en prototypage rapide (SLS), b- Nouveau concept de fixation utilisant un fil tendu	52
3.3	a- Modèle de l'attache de fixation des tubulures (en SLS), b- Fixation allégée	53
3.4	a- Câblage de logique, b- Câblage de puissance.	54
3.5	Différents modèles de câbles TaperWire TM (connecteurs à titre indicatif seulement)	55
3.6	a- Ancien circuit - flottant, b- Nouveau circuit solidaire à la structure. .	57
3.7	Architecture du programme de gestion distribuée des moteurs (ESC) .	59
3.8	a- Batterie LiPo avec connecteurs originaux, b- Batterie avec connecteurs modifiés	60
3.9	a- Batterie modifiée dans son boîtier, b- Boîtier de batterie installé dans un coin du cube	61
4.1	a- Équipement embarqué - configuration de base, b- Répartition des capteurs selon l'information fournie	64
4.2	a- Modèle SRF08, b- Nouveau modèle d'attache en SLS	65
4.3	Exemple d'erreur de lecture due à l'orientation des capteurs (réflexion du signal sur un mur).	65
4.4	a- Boussole 1DDL CMPS03, b- Boussole 3DDL HMC6343	66
4.5	Modèle SCP1000.	67
4.6	Lecture de l'altimètre et résultat d'un filtre Gaussien.	68
4.7	a- Modèle LIS3L, b- Modèle SCA3000	69
4.8	Position et orientation de l'accéléromètre.	70
4.9	Bruit de l'accéléromètre : a- Brut, b- Domaine fréquentiel	71
4.10	Boucle de correction de l'intégration	72
4.11	Intégration des accélérations	73
4.12	Filtre de Kalman comparé aux autres résultats.	74
4.13	Damier de calibration.	75

4.14 a- Un seul canal, b- Moyenne des sous-pixels	76
4.15 Flux optique - Translation (sim)	77
4.16 Flux optique - Rotation (sim)	78
4.17 Flux optique - Translation (réelle)	79
4.18 Ordinateur sur plaquette (Gumstix™) et sa caméra	79
4.19 Modèle Simulink avec filtres et PID distribués	84
5.1 Installation interactive "Fish-birds" de M.Velonaki [8]	88
5.2 Simulation d'une chorégraphie humains-robots	89
5.3 Interface SAILS●Ji en mode expert	96

Introduction

L'ingénierie peut être décrite comme l'art et la profession consistant à utiliser la connaissance scientifique afin de développer de nouvelles technologies dans la perspective d'améliorer notre qualité de vie. Afin de progresser, les ingénieurs doivent être au fait des développements dans tous les domaines reliés au leur. La technologie peut en quelque sorte être perçue comme un médium permettant de rapprocher le monde scientifique de la société. Cependant, dans les dernières décennies, l'ingénierie est devenue de plus en plus spécialisée et conséquemment la recherche académique évolue souvent en silo. Dans ces conditions la technologie échoue généralement à remplir son rôle de médium [9].

Depuis 2001, la communauté en Ingénierie Expérimentale Logicielle s'est penchée sur ce problème. Les participants ont observé que l'apprentissage lors d'interactions avec des spécialistes d'autres disciplines, fonctionnant selon d'autres schémas et des méthodologies différentes, peut être adapté à leur domaine et leur inspirer de nouvelles approches [10].

Le projet initié par le professeur, artiste et architecte canadien Nicolas Reeves, porte le nom de [VOILES | SAILS]. Il se distingue par la vocation et la géométrie de ses aérobots. Basées sur l'idée de créer des objets volants dont la géométrie serait en forte contradiction avec l'idée même du vol, ces structures deviennent un manifeste architectural en elles-mêmes. Elles matérialisent l'ancien et mythique rêve d'une archi-

tecture libérée des lois de la gravité (FIG. 1(a)). La première concrétisation de cette idée a eu lieu à Moncton, au Canada en 1999. Une structure cubique, faite de polystyrène expansé et couverte de minces membranes de plastique, était gonflée à l'hélium et suspendue au-dessus de la rivière Peticodiac (FIG. 1(b)). Le projet a progressivement évolué suivant les installations et les performances d'année en année.

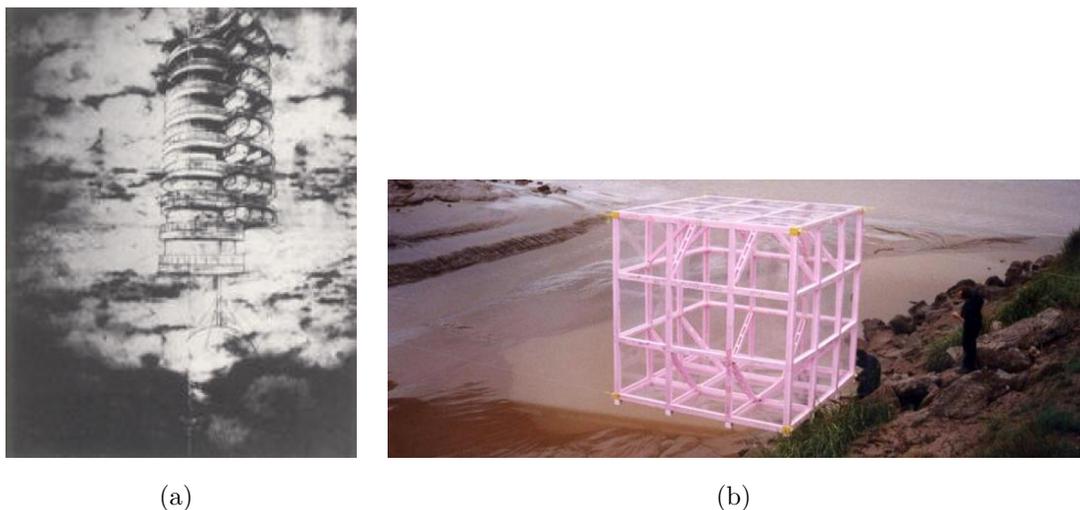


FIGURE 1 – a- La ville volante de Krutikov [1], b- Le prototype de la rivière Peticodiac (1999).

De manière plus générale, les aérostats, ou aérostats robotisés autonomes, déclassent les appareils à ailes ou à hélices dans des opérations à basse altitude et à basse vitesse. Ces applications peuvent être très variées : la photographie aérienne, les systèmes de sécurité individuels, l'observation de catastrophes naturelles, la surveillance de chantiers en hauteur, les systèmes de télécommunication par station de relais, etc. L'étude des aérostats fonctionnant à l'intérieur, en plus d'être une base expérimentale pour des modèles extérieurs, peut servir à la recherche sur les algorithmes de contrôle ou la mise en place de nouveaux capteurs. Un survol de l'ensemble des applications potentielles du projet est présenté à la section 5.

La version robotisée du projet existe depuis 2006 et sept différents prototypes ont été créés jusqu'à maintenant. Le potentiel artistique et scientifique du projet a été annoncé dès ses débuts lors de conférences internationales : [11, 12]. Ses phases préliminaires ont été réalisées dans un cadre financier et méthodologique entièrement artistique, jusqu'à ce que, suite à une nouvelle collaboration avec le professeur Alcherio Martinoli de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), l'étudiante Paola Bernasconi de cette

même école en fasse son projet de maîtrise en ingénierie électrique afin de créer une première version asservie des robots [13]. Par la suite, David St-Onge en a fait son projet de fin d'étude au baccalauréat en ingénierie mécanique, en concevant une nouvelle structure en fibres de carbone pour l'exosquelette des aérobots [14]. Malgré les nombreux développements des dernières années, les robots sont encore très sensibles au transport, à la calibration en salle, au type de performance souhaité et aux collisions. Cette étude vise donc à en faire un système dont la mécanique et le logiciel soient suffisamment robustes pour permettre des explorations artistiques et des expérimentations scientifiques.

Ces robots cubiques permettent la projection sur leur faces d'images non distordues, et offrent un potentiel d'assemblage. Par contre, cette géométrie augmente leur force de traînée. Afin de permettre des mouvements rapides et précis, une grande quantité d'énergie doit être embarquée sous forme de batteries et de moteurs, qui ont une masse relativement importante. Cette charge nécessite plus de portance, donc plus d'hélium, et a conduit à la réalisation des robots actuels, les Tryphons, de 2.25 mètres d'arête. Ils sont actuellement les seuls aérobots d'intérieur présentant cette géométrie, et ils seront bientôt les premiers à être utilisés comme protagonistes d'une présentation théâtrale. L'interaction de l'un d'entre eux avec une performeuse est prévu en 2011. Un projet pour quatre acteurs et quatre aérobots est aussi en cours d'élaboration. Les comédiens interagiront via les différents capteurs présents ou à venir sur les robots (sonores, lumineux, vidéo, etc). Arriver à reproduire un scénario complet d'une représentation à l'autre avec ces robots autonomes demande que leur systèmes soient améliorés afin de devenir fiables et robustes.

Ce projet est en partie financé par le laboratoire de Design NXI Gestatio, affilié au Centre Inter-universitaire de recherche-crédation en art médiatique HexagramCIAM, qui vise à cultiver une méthodologie de travail multidisciplinaire efficiente.

Chapitre 1

Contexte et travaux reliés

Le projet [VOILES| SAILS] et son développement dans le cadre de cette maîtrise sont fortement multidisciplinaires en raison de leur contexte en robotique appliquée jumelé à la vocation artistique du projet. Des travaux et des projets de divers domaines contribuent à la préparation et à la mise en contexte des développements requis pour l'atteinte des objectifs de cette recherche. Au cours de ce chapitre, les références pertinentes au projet seront présentées selon qu'elles aient servi à la compréhension de la dynamique des aérobots, à leur modélisation, à la sélection des stratégies de perception et de contrôle, à la mise en évidence des applications potentielles du système ou la détermination de la structure de travail dans ce contexte de particulier de recherche.

1.1 Modélisation et dynamique

1.1.1 Historique

La dynamique des Tryphons en tant qu'objets volants plus léger que l'air est apparentée à celle des dirigeables. Ces machines volantes ont commencé à être étudiées dès 1783 par Jean-Batiste Marie Meusnier de La Place qui tente alors de résoudre les problèmes de stabilité d'un ballon plus léger que l'air en allongeant sa forme et crée pour celui-ci un système de propulsion et de direction théorique. Même s'il ne fut jamais réalisé par manque de moyens techniques à cette époque ces études ont ouvert la porte à la réalisation, 70 ans plus tard du premier aérostat "dirigeable" par Henri Giffard. Le dirigeable a été propulsé pendant les 27km de son vol par un moteur à vapeur de 3ch [15].

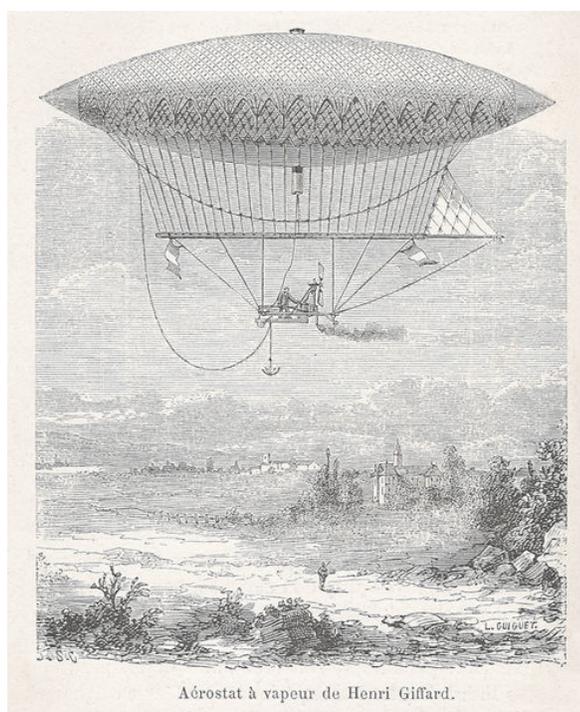


FIGURE 1.1 – Aérostat de Henri Giffard - tiré de Louis Figuiet, Les aérostats, Jouvot & Cie, Paris, 1887

La Première Guerre Mondiale accélère le développement des dirigeables, et ensuite la période de l'entre-guerre connaît l'apogée et la dévalorisation de ces engins volants

majestueux. La compagnie allemande Zeppelin construira près de 100 aérostats, dont la coque en aluminium est alors remplie d'hydrogène. Après la réalisation de plusieurs dizaines de dirigeables mesurant jusqu'à 230 mètres de long utilisés pour le transport (européen et même transatlantique), l'accumulation d'accidents tragiques a mis fin à leur utilisation commerciale.

Au cours de la dernière décennie les aérostats ont connu un regain de popularité, entre autre attribuable à la hausse du prix des produits pétroliers et à leur grande autonomie de vol. Certains événements promotionnels aident aussi à améliorer l'image des aérostats, comme la traversée de la Manche en dirigeable à pédales par Stéphane Rousson en 2008¹. Les différentes applications envisagées de nos jours seront couvertes à la section 5.

1.1.2 Hydrodynamique

Il est important de noter que la majorité des études en aérodynamique se basent sur des principes théoriques empruntés au domaine de l'hydrodynamique. Les concepts liés à l'énergie de frottement visqueux ainsi que celui de masse ajoutée ont été définis, étudiés théoriquement et validés empiriquement pour une grande variété de géométries immergées. La forme de l'équation d'un corps immergé à 6 degrés de liberté est généralement utilisée sous la forme [16]² :

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau} \quad (1.1)$$

où :

\mathbf{M} est la matrice des masses (incluant les masses ajoutées)

\mathbf{v} est le vecteur des vitesses dans le référentiel du corps rigide

$\mathbf{C}(\mathbf{v})$ est la matrice des effets de Coriolis et centrifuges (incluant les masses ajoutées)

$\mathbf{D}(\mathbf{v})$ est la matrice d'amortissement

$\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$ est le vecteur des forces et moments gravitationnels

$\boldsymbol{\eta}$ est le vecteur de position dans le référentiel inertiel

$\boldsymbol{\tau}$ est le vecteur de commande

1. <http://www.endlessflyers.com/Stephanerousson.html>

2. Cette équation sera adaptée pour les besoins de ce projet à la section 2.1

Les équations d'un corps immergé sont développées par Lamb[17] dès le 19ème siècle grâce entre autre à l'utilisation des équations du mouvement de Kirchhoff. Tel que décrit par Fossen[16], les masses ajoutées peuvent être expliquées par les forces et les moments induits dans le fluide entourant le corps rigide, à cause de la pression qu'il exerce en accélérant. Fossen dérive aussi la matrice des masses ajoutées/majorées, ayant 6×6 éléments, et tire certaines propriétés de ses expérimentations, ce qui lui permet de confronter l'hypothèse de fluide parfait pour un corps complètement immergé [16] :

1. Pour un corps rigide au repos (ou se déplaçant très lentement), sans courant ni vagues, la matrice des masses est définie positive et donc : $\mathbf{M} = \mathbf{M}^T$.
2. Pour les véhicules sous-marins (ou corps complètement immergés) l'indépendance des symétries et des fréquences sont des hypothèses raisonnables.
3. Dans la majorité des applications, les véhicules sous-marins sont seulement autorisés à se déplacer à basses vitesses. La contribution des éléments hors de la diagonale peut alors être négligée.

L'une des méthodes employées afin de déterminer les coefficients A_{ij} de la matrice pour différentes géométries, la théorie des bandes, consiste à diviser le corps solide en bandes (2D), permettant d'en simplifier le calcul. En estimant le comportement du fluide sur une bande de la surface par une fonction $a_{ij}(y, z)$ (2D), son intégrale sur la longueur L dans la troisième dimension permet d'obtenir le coefficient souhaité :

$$A_{ij} = \int_{-L/2}^{L/2} a_{ij}(y, z) dx \quad (1.2)$$

Des géométries de bases comme le cercle, l'ellipse et le carré ont été étudiées de manière théorique. Par exemple, dans le cas d'une section carrée, tout les coefficients de la diagonale sont égaux, $a_{ij} = 4.75\rho a^2, \forall i = j$, pour une longueur de côté $2a$ et une densité de fluide ρ [16]. D'autres approches théoriques comparables, tel que la décomposition des surfaces du solide en éléments finis, arrivent à des résultats légèrement différents ($A_{ij} = 0.7\rho a^3, \forall i = j$) [18].

L'effet de cette masse ajoutée apparaîtra donc dans la matrice des masses générale, mais aussi dans la matrice des effets de Coriolis et des forces centrifuges, obtenue de la dérivation des équations du système.

1.1.3 Dynamique des dirigeables

Avec ce regain d'intérêt, plusieurs groupes de recherche ont étudiés récemment le comportement dynamique de dirigeables et autres aérostats au moyen d'outil de modélisation et d'expérimentation plus précis qu'au début du dernier siècle.

Les conventions utilisées dans la modélisation de dirigeables sont très proches de celles des systèmes volants ailés. Ce sont en effet des corps en mouvement ayant 6 degrés de libertés : les trois translations, ainsi que l'azimut, l'assiette longitudinale et le gîte[3]. Ces trois rotations sont respectivement représentées par r , p et q dans la FIG.1.2.

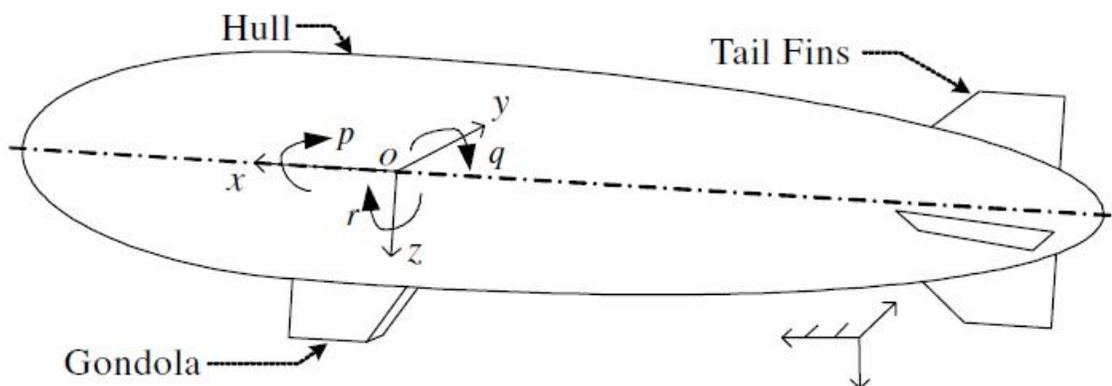


FIGURE 1.2 – Référenciel local - tiré de Li et Nahon[2].

Les dirigeables sont des aérostats, des moyens de transport capables d'évoluer dans l'atmosphère terrestre et plus légers que l'air, qui ont en plus le potentiel d'être dirigés. Les aérostats peuvent être de conceptions diverses, qui sont regroupées en quatre catégories [19] :

1. Les aérostats à enveloppe souple, connu en anglais sous l'appellation "blimp". Ces ballons doivent être gonflés avec une pression suffisamment supérieure à la pression ambiante pour compenser la tension de la membrane et l'étirement local causé par les charges à lever. Ce type d'aérostat, lorsque utilisé à l'extérieur, doit être muni de ballonnets internes contenant de l'air, qui leur permettent de maintenir leur forme à différentes altitudes. Ces ballonnets se vident à l'ascension et se remplissent à la descente pour compenser l'expansion et la compression du gaz de l'enveloppe.

2. Les aérostats à enveloppe semi-rigide, dont l'enveloppe est semblable à celle des précédents mais qui comprennent une structure (généralement sous le ballon) assurant une meilleure répartition de la charge à soulever. Les Tryphons peuvent être positionnés dans cette catégorie.
3. Les aérostats à enveloppe rigide, tels que le fameux Zeppelin. La structure de leur enveloppe maintient sa forme en permanence et plusieurs sous-enveloppes peuvent être remplies sans devoir être pressurisées.
4. Les aérostats thermiques, utilisant le réchauffement du gaz pour augmenter leur poussée d'Archimède. Ils sont similaires dans leur fonctionnement aux montgolfières, mais dans leur forme et leur utilisation, ils s'apparentent aux aérostats.

Tous les types d'aérostats sont d'abord basés sur le principe de la poussée d'Archimède. En utilisant un gaz plus léger que l'air, la différence entre le poids de l'air qui occuperait le volume du ballon et celui du gaz à l'intérieur de ce dernier permet d'obtenir une force de levée (ou poussée en milieu sous-marin). Tel que présenté dans la figure 1.3, la poussée d'Archimède s'applique au centre de volume alors que le poids s'applique au centre de masse. Si la poussée d'Archimède doit en général compenser les effets de la gravité, la distance entre le centre de volume et le centre de gravité induit quant à elle des moments. Ces effets seront discutés plus abondamment dans la section 2.1.4.

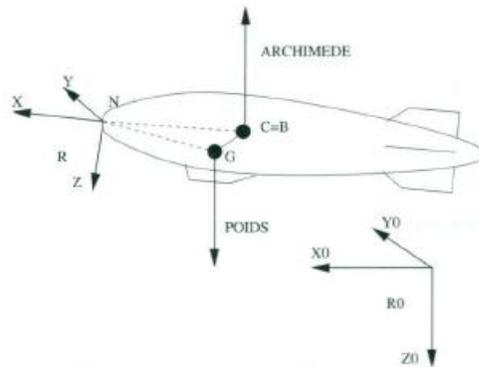


FIGURE 1.3 – Le poids et la poussée d'Archimède - Lozano[3].

Si l'équilibre des forces statiques est similaire et bien documenté pour chacun des aérostats, il en est autrement de leur dynamique. La forme, le type d'actionneur (propulseur) et le système de direction modifient grandement leur comportement dynamique.

L'aérostat le plus documenté est celui à enveloppe rigide, à cause de sa popular-

ité lors de la Première Guerre, mais également et surtout grâce à la robustesse de sa conception. Sûrement le plus connu, le modèle Hindenburg de Zeppelin, possédait généralement 4 propulseurs sur ses côtés et 4 ailerons gouvernables à l'arrière. Le modèle contemporain Sentinel 5000 (FIG. 1.4(a)) est du même type. Toutefois, la configuration de propulseur la plus courante dans les dernières années est celle dite vectorielle. Ces propulseurs peuvent être orientés dynamiquement, permettant de réduire leur nombre tout en augmentant les possibilités de manœuvres. Le dernier Zeppelin NT (New Technology) possède ainsi trois propulseurs vectoriels (un à l'arrière et un sur chaque côté) pouvant pivoter sur 120 degrés [19, 4].

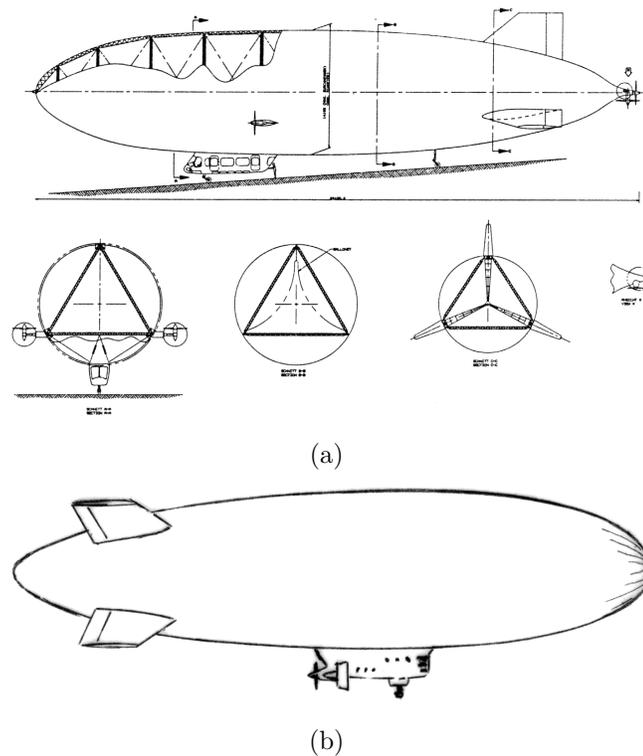


FIGURE 1.4 – a- Zeppelin NT, b- Sentinel 5000, tiré de [4]

Karma, parmi d'autres dirigeables destinés la recherche universitaire utilise aussi une propulsion vectorisée. Son actionneur, positionné à la gondole, jumelé à des gouvernails, pour les angles de gîte et d'assiette longitudinale, contrôlent ses 6 degrés de liberté. Il est aussi muni d'un propulseur à l'arrière pour contrôler ces mêmes angles à basse vitesse (LAAS-CNRS)[20].

La majorité des aérostats utilisent un gouvernail ou des ailerons pour se stabiliser. Tel que présenté par Li et Nahon [2] la géométrie de ces éléments mécaniques doit

alors être incluse dans le calcul des forces et moments aérodynamiques. Même avec des ailerons, seuls quatre degrés de liberté sur les six sont contrôlés (le propulseur principal, son angle vectoriel, les ailerons et les ascenseurs). Dans ce cas, des contraintes de sous-actionnement doivent être incluses au modèle [21].

Tel que présenté par Lozano[3], les représentations d'Euler, par quaternions ou de Lagrange peuvent toutes être utilisées, et présentent seulement de légères différences. La représentation d'Euler, généralement plus intuitive que celle des quaternions, a le désavantage de présenter des singularités sur les rotations. Pour la majorité des aérostats, l'étendue de ces valeurs pour le gîte et l'assiette longitudinale est restreinte, ce qui permet d'utiliser cette représentation sans risquer de rencontrer des singularités. Il est important de sélectionner le référentiel adéquat pour cela ; cette question sera discutée dans la section 2.1.

Plusieurs études se sont basées sur les connaissances développées grâce aux précédents modèles rigides afin d'étendre la compréhension des aérostats à ceux qui utilisent des enveloppes souples. Posant d'abord l'hypothèse que les effets de l'enveloppe ont un impact négligeable sur la dynamique de l'ensemble du système, certains projets ont su montrer une précision suffisante pour un vol contrôlé sans considérer les effets aéro-élastiques [2, 22, 23, 21].

Certains chercheurs ont par la suite raffiné le contrôle de ces "blimps" en incluant différents paramètres prenant en compte le comportement de l'enveloppe souple. C'est notamment le cas au sein des travaux de l'équipe du professeur Nayon[24, 25], et d'autres projets [3].

1.1.4 Nouvelles géométries

Certains projets récents se sont aussi penchés sur l'étude de nouvelles géométries de "blimps".

L'équipe du professeur Sharf à l'Université McGill a développé un ballon sphérique pour la simulation de manipulations dans l'espace (FIG. 1.5(a)). Le prototype, de 5 pieds de diamètre, est équipé de six petits ventilateurs et est presque parfaitement

équilibré (centre de masse très près du centroïde). Un contrôle externe, basé sur un système de capture de mouvement, a été utilisé avec succès. L'équipe a tenté dernièrement plusieurs avenues de contrôle embarqué, mais sans succès [26].

L'équipe du professeur Kawamura à l'Université Hokkaido au Japon a quant à elle développé un "blimp" cylindrique imposant ainsi des contraintes non holonomes à son comportement dynamique (FIG. 1.5(b)). Bien que les mouvements latéraux soient plus complexes à réaliser, la géométrie cylindrique permet de diminuer le frottement de l'air.



(a)



(b)

FIGURE 1.5 – a- "Blimp" sphérique (Sharf[5]), b- "Blimp" cylindrique (Kawamura[6])

1.1.5 Modélisation numérique

La modélisation numérique de la dynamique d'un robot peut être réalisée de diverses manières. Une modélisation Simulink ou un script Matlab offrent généralement un rendement adéquat et permettent une validation des calculs théoriques.

Si la puissance des ordinateurs de travail assure aisément une modélisation complète de la dynamique d'un aérostat en résolvant directement les équations différentielles du mouvement, il n'est pour le moment pas possible d'utiliser une telle modélisation pour un calcul sur le matériel embarqué. C'est pourquoi les équations sont généralement

linéarisées, $\dot{X} = F(X, U)$ où X est le vecteur d'état du robot et U la commande [2, 3, 23].

Certains logiciels permettent aussi de faciliter la modélisation de robots³. En terme de robots volant leur performances restent à prouver, car ceux-ci sont généralement conçus pour des plateformes au sol ou des manipulateurs fixes. Les équations d'aérodynamique doivent alors être développées dans un module séparé [27].

La stratégie ayant donné les meilleurs résultats en terme de modélisation consiste à optimiser un modèle dynamique numérique au moyen de données empiriques. Ces données sont généralement obtenues lors d'expérimentations en soufflerie. L'équipe de Gomes à l'Institut CTI en Belgique a cumulé plus de 600 heures de test dans ce type d'installation pour réaliser son modèle [28].

1.2 Art robotique

1.2.1 Historique

Les débuts de la robotique sont intimement liés au monde artistique. Sans en faire un exposé exhaustif, il est pertinent dans ce type de projet d'en rappeler certains éléments historiques permettant de mieux comprendre la pertinence d'une telle collaboration.

La création mythique d'un être artificiel exécutant des tâches difficiles ou ennuyeuses au profit de son créateur hante l'esprit des hommes depuis de siècles. L'un des premiers exemples de ce mythe est le Golem de la Kabbale, créé selon la légende par le rabbin Loew de Prague au XVIe siècle, à partir de glaise (FIG. 1.6(a)). Ce golem, évidemment un puissant symbole religieux ne peut être créé, selon les écrits de la kabbale, que par un expert des langues et des formes soit, un sculpteur très érudit.

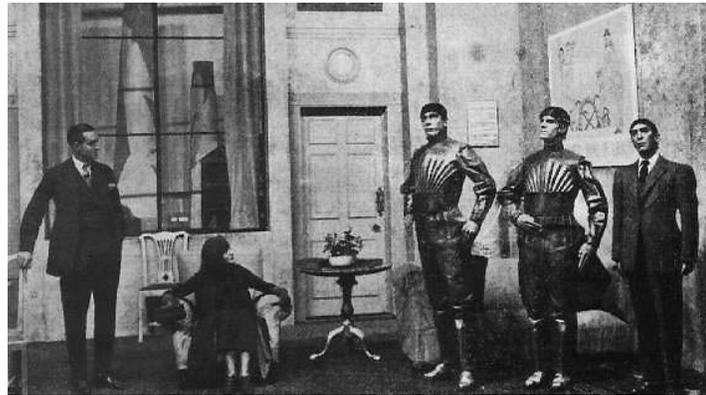
Il est aussi pertinent de noter que le mot 'robot' provient lui-même directement du monde artistique. Inventé au début du 20^e siècle par Karel Capek et sa compagnie de théâtre R.U.R., il devait alors représenter de nombreux automates utilisés pour tout

3. Par exemple Webots (cyberbotics.com) et V-REP (v-rep.eu)

travail et pour la guerre (FIG. 1.6(b)); il provient d'ailleurs du terme *travailleur* en Tchèque. L'histoire des frères Capek veut qu'initialement le *robot* soit féminin, expliquant ainsi son « caractère imprévisible ».



(a)



(b)

FIGURE 1.6 – a- Rabbin Loew et le Golem ^a, b- Les *robots* de R.U.R. ^b

^a. gravure de Mikolas Ales, 1899

^b. <http://www.umich.edu/engb415/literature/pontee/RUR/RURsmry.html>, visité le 06/2011

Là où les robots sont souvent considérés comme des systèmes purement mécaniques, uniquement dédiés à l'exécution de tâches fastidieuses, difficiles et répétitives, et incapables de communiquer une émotion, des artistes comme Norman White ("Facing Out Laying Low", 1977, FIG. 1.7(a)), Gilles Roussi ("Bons" robots), Stelarc ("The Third Hand", FIG. 1.7(b)) et plusieurs autres ont utilisé les robots depuis plus de 30 ans dans un objectif très différent : plutôt que de se concentrer sur les applications pratiques, ils les utilisent afin de poser de nouvelles questions et d'ouvrir de nouvelles avenues de recherche sur les technologies [29]. Par exemple, dans le domaine de l'ingénierie de la cybernétique, plusieurs œuvres ont été créées pour explorer l'intelligence artificielle et le comportement humain lors d'interactions avec des robots. Alors que les ingénieurs cherchent à développer les habiletés des robots qui lui permettront d'interagir avec les humains, les artistes explorent des concepts tels que l'identité, l'ontologie, les émotions artificielles et les métaphores sociales [30]. Cette exploration s'est révélée être

extrêmement efficace pour la mise en évidence de nouveaux processus d'interaction humain-robot.

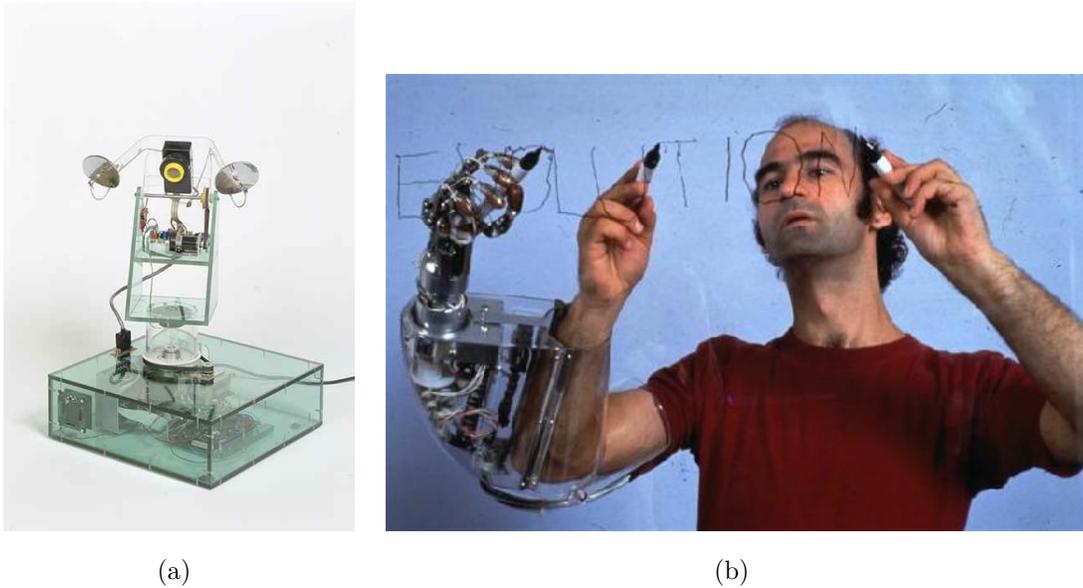


FIGURE 1.7 –

FIGURE 1.8 – a- Facing Out the Laying Low (White)^a, b- The Third Hand (Stelarc)^b

a. Digital Art Museum (dam.org)

b. stelarc.net, visité le 06/2011

L'art robotique, ou la création d'œuvres artistiques centrée sur l'utilisation de machines robotisées, est une discipline des arts technologiques, qui comme ces derniers, existe depuis plusieurs décennies.

1.2.2 Modèle de collaboration

Une plateforme de recherche multidisciplinaire présente plusieurs défis d'organisation et de gestion et requiert donc un cadre approprié de collaboration. Un protocole de communication clair et la disponibilité d'outils permettant d'améliorer l'apprentissage interdisciplinaire sont les clés du succès (Fruchter et Emery [31]). Au moyen de stage d'étudiants, de travail d'équipes dans le même espace et de rencontres régulières, la plateforme de recherche [VOILES | SAILS] a confirmé le potentiel de telles collaborations multidisciplinaires. Une étude de cas sur les trois principaux modèles de col-

laboration au sein de projet d'arts robotiques a été publiée à la suite de la conférence ICRA2011 [32].

D'un côté l'artiste a la responsabilité de la majeure partie du travail de communication initial. Il doit recueillir l'information concernant l'état des connaissances scientifiques reliées à son projet et entrer en contact avec un ingénieur tôt dans son processus de design afin de connaître les recherches en cours les plus pertinentes. À partir de ce moment, il peut tenter de trouver des ingénieurs intéressés à s'associer avec lui pour la réalisation de l'œuvre.

Cependant, ces domaines académiques sont en général assez fermés l'un à l'autre. Des événements ou des conditions particulières peuvent alors être mis en place afin de créer des passerelles et de promouvoir les contacts. Par exemple, le Programme pour la Culture et la Créativité, EPSRC (UK)⁴ ainsi que le centre d'artistes Laboratoria à Moscou⁵ permettent à des scientifiques de travailler en résidence dans des studios d'artistes. Cette approche facilite l'apprentissage de la culture scientifique par l'artiste, mais n'a pas pour le moment un effet appréciable sur les scientifiques.

Créer un contact entre les cultures (scientifiques et artistiques) requiert un processus d'adaptation de tous les protagonistes. Victoria Vesna, artiste américaine en Nouveaux Médias citée par Leach [9], explique qu'une transformation majeure se produit dans la méthode de travail de l'artiste qui œuvre dans ces territoires :

Because our work and tools are in constant flux, we are forced to articulate the reasoning and meaning informing the art produced, which has traditionally been the role of art critics and historians.

Le modèle encouragé par le Centre Inter-universitaire Hexagram|CIAM est celui de l'association science-art. Ce modèle repose sur deux individus ou deux groupes d'individus ayant une compréhension similaire du potentiel et de l'originalité des projets art-science. Même si chacun a ses propres objectifs professionnels, tous s'entendent sur la direction que le développement doit prendre. Ils travaillent ensembles sur tous les aspects du projet : le financement, les performances, les publications, et l'atteinte de objectifs de recherche.

Projet exemplaire du modèle associatif, [VOILES | SAILS] amène chacun de ses

4. <http://www.epsrc.ac.uk>, visité le 06/2011

5. <http://newlaboratoria.ru>, visité le 06/2011

prototypes dans une performance artistique immédiatement après leur réalisation. Le critère de conception inhérent et prépondérant à chaque étape de développement est donc la robustesse de la structure et de l'électronique. Même avec l'évolution rapide des prototypes du projet, toutes les étapes peuvent être présentées publiquement (et le sont généralement) à mesure qu'elles sont complétées. Cette méthode de travail, largement utilisée en art, est nouvelle pour le milieu de la robotique et modifie la méthodologie traditionnelle. La recherche en cours de 2009 à 2011 sur le projet [VOILES| SAILS] repose sur une équipe de quatre ingénieurs, une chorégraphe, une danseuse-chanteuse, une compagnie de théâtre et un directeur artistique. Au moyen deux fois l'an, des résidences de deux semaines sont tenues dans une salle d'expérimentation, soit à Hexagram-UQAM soit à l'Université Laval, de sorte que tout les intervenants du projet puissent travailler conjointement dans un même lieu physique et de manière intensive.

1.3 Perception et contrôle

1.3.1 Centrales inertielles

L'utilisation de centrales inertielles, permettant grâce à un amalgame d'accéléromètres et de gyroscopes de donner de l'information sur les six degrés de liberté, est très répandue dans le domaine du vol autonome ou semi-autonome extérieur. Ces centrales sont majoritairement utilisées pour interpoler la position entre deux lectures d'un GPS [23] ou d'un odomètre [33].

L'un des principaux capteurs constituant une centrale inertielle, l'accéléromètre, est généralement très bruité lorsqu'utilisé dans des applications à basse vitesse. Qui plus est, dans une application où la position est généralement la valeur contrôlée, la boucle de commande doit passer par une double intégration de ces accélérations, ce qui peut faire rapidement dériver la position estimée. Malgré cela plusieurs études ont montré la faisabilité de cette approche [34, 35, 36].

En utilisant seulement un filtre gaussien sur les données de l'accéléromètre, et un modèle basé sur l'erreur empirique, il est possible d'obtenir une correspondance satisfaisante pendant un court délai (1 seconde). Au delà de cet intervalle, l'erreur accumulée

devient trop grande pour la majorité des accéléromètres communs sur le marché [35].

Les résultats les plus prometteurs ont été obtenus en traitant les données de l'accéléromètre avec un filtre de Kalman conçu adéquatement. Les résultats montrent une erreur de moins de 5mm lors d'oscillations de 40 cm pendant presque une seconde, ceci seulement pour des accélérations des 8m/s^2 et plus. Pour de faible accélérations le biais aléatoire de dérivation devient trop important et doit être ajusté manuellement [36].

Les centrales inertielles sont donc généralement trop bruitées pour être utilisées seules afin de déterminer la position. Elles deviennent très utiles lorsque couplées à d'autres types de systèmes perceptifs, par exemple au moyen d'un filtre de Kalman.

1.3.2 Sonars

Puisque les capteurs majoritairement utilisés au début de cette étude sur les aérobots du projet [VOILES| SAILS] sont des sonars, les limites de ce type de système perceptif doivent être étudiées en détail.

Plusieurs études portant sur le positionnement d'objets et les applications de balayage à ultrasons ont permis de développer des outils précis et utiles pour déterminer la pose de robots mobiles [7].

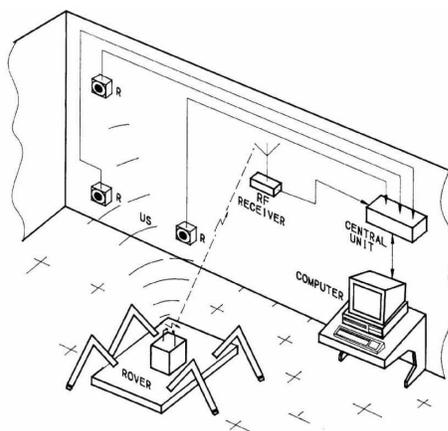


FIGURE 1.9 – Système de positionnement du robot Rimho - tiré de [7].

En se basant sur l'utilisation de balises fixes, des robots comme le Rimho obtien-

nent un positionnement très précis en calculant le temps de vol (ToF) de ces balises à la manière des récepteurs GPS (FIG. 1.9). Le positionnement et la détermination de pose pour des robots mobiles utilisant des technologies de balises ultrasons sont très précis. Par exemple, avec un contrôle adaptatif de logique floue une erreur sur le positionnement statique de moins de 5 cm a été réalisée, ainsi qu'une convergence rapide en mode dynamique [37]. HagisonicTM produit un système ayant des performances comparables, mais basé sur un émetteur-récepteur infrarouge embarqué détectant des cibles passives au plafond ou au sol⁶. Dans le même ordre d'idée il est possible d'utiliser un émetteur infrarouge sur le robot et des récepteurs balayant l'espace et calculant sa position par triangulation [38]. Même si cette dernière est indépendante de la calibration, toutes ces méthodes impliquent l'utilisation de bornes ou balises (actives ou passives) dans l'espace, et quelque fois des calculs délégués à un poste fixe au sol.

Les projets mettant en œuvre des détecteurs de distance à ultrasons sans station fixe ni balise sont rares, car ces détecteurs sont aussi très bruités et d'un bruit difficile à modéliser puisqu'il dépend de la géométrie de la pièce où évolue le robot. Un groupe de l'Université de Freiburg, en Allemagne, a réussi à déterminer le positionnement 2D d'un "blimp" uniquement grâce au balayage de leurs sonars embarqués. À des fins de comparaison, des marqueurs au sol ont été détectés par un système de vision embarqué également, et une centrale inertielle assurant le contrôle de la pose. La réussite de cette recherche repose sur une utilisation adaptée du positionnement de Monte-Carlo dans une carte donnée à l'avance et sur une nouvelle modélisation des capteurs ultrasons. Lors d'un vol piloté de près de 25 minutes, l'équipe a démontré que le système pouvait, de manière plus robuste que les modèles communs, déterminer la position du robot [39]. Ce problème a la particularité d'être du type la « poule-ou-l'œuf », si l'on connaît la position et la pose du robot, on peut créer une carte de l'environnement ; et si l'on connaît cette carte, l'on peut déterminer la position et la pose du robot. Mais si aucun des deux n'est connu au départ, une méthode d'apprentissage est nécessaire [40].

1.3.3 Systèmes de vision

Si les GPS, centrales inertielles, sonars et systèmes à infrarouge ont amené des solutions viables et souvent très performantes dans les dernières décennies pour le

6. <http://www.hagisonic.com>, visité le 06/2011

contrôle d'aérostats, le domaine de la vision embarquée est depuis quelques années plus prometteur.

Des résultats étonnants ont été atteints par le Laboratoire de Systèmes Intelligents de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, au moyen de capteurs de flux optique maison [27]. Le flux optique est le mouvement apparent à partir d'un point de vue de référence d'objets dans l'espace faisant face à ce point (caméra). La théorie du flux optique permet de déterminer quel type de mouvement la caméra effectue, ainsi que la géométrie de l'espace devant cette caméra, selon les informations disponibles et des hypothèses sur l'espace et le mouvement du robot. Différents types de champs de vitesse sont connus pour des mouvements spécifiques de caméra. Un champ de vitesse quelconque est donc généralement une combinaison de ces champs de base, auxquels peut s'ajouter le mouvement d'objets dans l'image [41].

Les premières expérimentations de l'EPFL se déroulaient dans une salle aux murs peints de manière structurée et sans obstacle [27]. Parmi les plus récents développements, l'équipe a pu diriger un vol complètement autonome à l'extérieur basé sur l'évaluation du temps d'impact provenant d'un rang de capteurs de flux optique positionné sur le nez de l'appareil⁷. Le temps d'impact τ a l'avantage de pouvoir être calculé sans connaître la taille réelle de l'objet ni sa vitesse [41] :

$$\tau = \frac{l(t)}{l'(t)}$$

où $l(t) = f \frac{L}{D}$ est la taille apparente de l'objet observé (L sa taille, D sa position et f la distance focale de la caméra sur l'automate volant) et $l'(t) = \frac{dl(t)}{dt} = f \frac{LV}{D^2}$ est sa dérivée.

La reconnaissance de marqueurs fixes peut aussi se faire en environnement non-structuré. Cependant, dans ce cas, la comparaison avec la référence enregistrée peut aisément être biaisée par l'éclairage ambiant. Une solution consiste à coupler cette détection à un algorithme de flux optique [42].

Le type de capteurs développés par l'EPFL, généralement appelés « détecteurs de mouvements élémentaires (EMD) » ou « détecteur Reichardt », s'inspire du système de vision présent chez certains insectes, notamment les abeilles. D'autres groupes de recherche [43] et même quelques compagnies⁸ ont développé des capteurs similaires.

7. <http://www.youtube.com/user/jzuffere>, visité le 10/2010

8. <http://centeye.com>

Grâce à quatre capteurs de ce type et à deux algorithmes bio-inspirés, la stabilisation de trajectoire et l'odomètre visuel, l'équipe de Fumiya à Zurich a obtenu d'excellents résultats lors de la navigation contrôlée par objectifs d'un "blimp" sur une distance de plus de 7 mètres [44].

Un autre apport fondamental du milieu de la vision pour la commande d'aérostats est une approche sans connaissance approfondie de la dynamique du robot. En effet, en posant seulement l'hypothèse qu'une fonction de Lagrange existe pour décrire la dynamique du robot, il est possible de déterminer les paramètres des équations dynamiques directement par observation et analyse de la sortie d'une caméra embarquée [45].

1.3.4 Stratégies de contrôle

Les types de contrôle que l'on peut trouver dans la littérature sont encore plus nombreux que les modes de perception. Une tendance marquée dans le contrôle d'aérostats consiste généralement à asservir une action spécifique de manière individuelle. C'est en juxtaposant plusieurs actions que l'on obtient le plein potentiel de l'aérostat.

En décomposant le mouvement libre en différentes étapes, telles que l'atterrissage, le décollage, l'approche de la cible puis la stabilisation, le problème de contrôle est simplifié [6]. Le mouvement d'atterrissage, permettant de rejoindre précisément une station de chargement, est critique et complexe. Il a été asservi en différentes étapes suivant les données d'une caméra et les PID respectifs dans [46]. La même équipe a aussi approché le problème en ajoutant un niveau d'apprentissage de base qui améliore légèrement les performances d'arrimage [47]. Ce type de mouvement a été largement étudié avec différents types de senseurs pour des plateformes mobiles au sol, par exemple avec des balises infrarouges [48]. Cette précision est impossible à reproduire avec les mêmes moyens pour des aérostats, car elle ne s'applique qu'à des mouvements en deux dimensions et utilise souvent des données odométriques.

Une méthode de contrôle très répandue en l'absence de balises externes (GPS, infrarouge ou ultrasons) et de marqueurs visuels est la navigation à l'estime (dead reckoning). Son algorithme repose sur l'estimation de la pose et du positionnement actuel

à partir des dernières positions connues en extrapolant grâce à sa vitesse ou à son accélération [49]. Si les positionnements de Monte-Carlo [50] et de Markov [51] sont devenus plus populaires dans les dernières années, la navigation à l'estime est encore l'algorithme de base le plus utilisé pour l'interprétation des données de centrales inertielles.

Le filtre de Kalman peut être considéré comme un algorithme de navigation à l'estime amélioré, lorsqu'il est utilisé pour le contrôle de robots mobiles. Pour ce type de filtre aussi, on remarque que la gestion séparée des différents mouvements est préférable [34].

Une bonne approche consiste donc en un modèle d'état ou un planificateur de vol [23] de haut niveau discute avec des contrôleurs répartis selon le type de mouvement à effectuer. Ce modèle peut aussi inclure un générateur de trajectoire, basé sur les différentes contraintes physiques de l'aérobot, afin d'optimiser l'atteinte d'objectifs en termes de pose [21].

Dans le domaine de l'apprentissage, il est également envisageable d'omettre la description dynamique du robot et de faire apprendre directement à celui-ci la relation entre la commande et le résultat physique [52].

Ce premier chapitre a permis un survol des projets et de la littérature pertinents à cette recherche autant dans le domaine de la modélisation du vol que de son contrôle, qui doit se baser sur certains capteurs sélectionnés. Le contexte spécifique des arts robotiques dans lequel se déroule ce projet a aussi été remis en perspective au moyen de quelques exemples contemporains. Le prochain chapitre est destiné au développement des équations dynamiques des Tryphons.

Chapitre 2

Modélisation dynamique du robot

Afin de construire un modèle virtuel représentatif, les équations du mouvement du robot doivent être développées de façon rigoureuse. Tel que discuté dans le chapitre précédent, plusieurs recherches similaires ont été faites sur des modèles variés de dirigeables. Dans chacune de ces recherches, la position des moteurs, la masse et le volume n'ont rien à voir avec la configuration des Tryphons de cette étude, et la modélisation doit être reprise complètement. Suite au développement des équations du mouvement un modèle numérique dans l'environnement `MatLab` sera décrit et commenté. Afin d'assurer la justesse du modèle, une optimisation a ensuite été effectuée au moyen de données issues de tests sur le robot réel. Ces tests et leurs résultats sont un élément clé de la modélisation et seront discutés en détail. Une fois le modèle suffisamment fiable, différentes simulations ont été tentées afin de déterminer les paramètres les plus sensibles affectant la dynamique du robot. Une discussion en décrira les résultats.

Une partie des résultats de ce chapitre a fait l'objet d'une publication lors de la conférence de ASME IDETC en août 2010[53].

2.1 Modèle théorique

Le robot mobile Tryphon possède 6 degrés de liberté. Dans un référentiel inertiel, les 6 coordonnées généralisées servant à définir sa position et son orientation en tout temps sont : $x, y, z, \phi, \theta, \psi$. Les trois dernières décrivent l'orientation et sont nommés angles d'Euler. Une convention souvent utilisée en modélisation de dirigeables consiste à choisir ces angles de sorte que ψ représentent l'azimut (roll), θ l'assiette longitudinale (pitch) et ϕ la gîte (yaw) [3]. Ils sont donc sélectionnés de sorte que la transformation du repère local au repère inertiel soit de la forme :

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Cette sélection a de plus l'avantage de minimiser les impacts des singularités dans la matrice de transformation des vitesses angulaires. Elle ne sera singulière qu'aux angles d'assiette longitudinale $\theta = \pi/2 \pm n\pi$, où n est un entier.

Les équations dynamiques découlant du choix de ces coordonnées généralisées et représentées sous forme matricielle sont dites d'Euler-Newton.

$$\mathbf{f} = m\mathbf{a} \text{ avec } \mathbf{a} = \mathbf{a}_{CM} + \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{r}_{m/0} + \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_{m/0})$$

$$\mathbf{t} = \mathbf{I}\dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{I}\boldsymbol{\omega}$$

où :

\mathbf{a}_{CM} est l'accélération du centre de masse du solide,

$\mathbf{r}_{m/0}$ est la position du centre de masse du solide par rapport à l'origine,

\mathbf{I} est la matrice des inerties du solide,

\mathbf{f} et \mathbf{t} sont respectivement les forces et moments agissant sur le solide.

$\boldsymbol{\omega}$ et $\dot{\boldsymbol{\omega}}$ sont respectivement l'orientation du solide et sa dérivée.

Les différents termes de ces équations sont ici regroupés afin de respecter les formulations discutées par Lozano[3] et Meyer[2], toutes deux inspirées de Fossen[16]. Les équations dynamiques du système complet sous la forme vectorielle sont :

$$\mathbf{M}_d \dot{\mathbf{v}} = \boldsymbol{\tau}_d(\mathbf{v}) + \boldsymbol{\tau}_a(\mathbf{v}) + \boldsymbol{\tau}_g + \boldsymbol{\tau}_p \quad (2.2)$$

où :

\mathbf{M}_d est la matrice des masses et inerties augmentée (sous-section 2.1.1)

Pour appliquer ces équations, elles doivent être élaborées dans un référentiel inertiel R_0 fixé au sol afin de respecter le contexte de la formulation de Newton. Par contre il est plus pratique pour la commande de considérer les vitesses et les positions dans un référentiel local attaché au robot R_V . L'origine de ce référentiel est à la discrétion des utilisateurs, sans perte de généralité [2]. Pour le Tryphon, on l'établit au centre volumique, puisque celui-ci est juxtaposé au centre géométrique du robot et supposé fixe dans le temps. En effet le volume du ballon ne change pas de façon appréciable au fil du temps, car les légères fuites d'hélium sont compensées naturellement par une entrée d'air pour équilibrer la pression de part et d'autre des parois. De plus la structure externe maintient la géométrie du robot (tel que décrite à la section 3.1). Par contre, le centre de masse du robot peut varier selon le choix et la disposition des équipements embarqués. L'impact de ces variations sera étudié à la section 2.4.2.

Le passage d'un repère à l'autre peut se calculer par les trois rotations précédemment décrites (Équ. 2.1). Les variations de position et d'orientation du robot définies dans ce repère inertiel R_O sont $\boldsymbol{\eta}_1 = \{\dot{X}_0 \ \dot{Y}_0 \ \dot{Z}_0\}^T$ et $\boldsymbol{\eta}_2 = \{\dot{\phi} \ \dot{\theta} \ \dot{\psi}\}^T$ et les matrices de passage d'un repère à l'autre sont définies de façon à ce que :

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{R}_1 \boldsymbol{\eta}_1$$

$$\boldsymbol{R}_1 = \begin{bmatrix} c\theta c\psi & -c\phi s\psi + s\phi s\theta c\phi & s\phi s\psi + c\phi s\theta c\psi \\ c\theta s\psi & c\phi c\psi + s\phi s\theta s\phi & -s\phi c\psi + c\phi s\theta s\psi \\ -s\theta & s\phi c\theta & c\phi c\theta \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$\boldsymbol{\omega} = \boldsymbol{R}_2 \boldsymbol{\eta}_2$$

$$\boldsymbol{R}_2 = \begin{bmatrix} 1 & s\phi t\theta & c\phi t\theta \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & \frac{s\phi}{c\theta} & \frac{c\phi}{c\theta} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Les deux derniers termes de la matrice de l'équation 2.5 confirment que les positions singulières surviendront lorsque $\cos(\theta) = 0$ ($\theta = \pi/2 \pm n\pi$, où n est un entier).

2.1.1 Matrice des masses et des inerties

La matrice des masses et des inerties est d'abord déterminée en considérant l'inertie d'un cube plein ayant comme masse (m) la somme de celle de l'hélium, de la structure

(sans les tubulures) et de la membrane du ballon.

$$\mathbf{I}_C = \begin{bmatrix} \frac{ml^2}{6} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{ml^2}{6} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{ml^2}{6} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Par la suite, tous les composants non symétriquement répartis selon les trois axes sur le cube (électronique, moteurs, batteries, capteurs, tubulures, etc) sont répertoriés. Leurs inerties et leurs produits d'inertie sont ajoutés à la matrice de l'équation 2.6 pour former la matrice des inerties du robot \mathbf{I}_N . Enfin la matrice 6×6 \mathbf{M}_d doit tenir compte des bras de levier créés par la différence entre l'origine du référentiel local et le centre de masse.

$$\mathbf{M}_d = \begin{bmatrix} m\mathbf{I}_{3 \times 3} & -m[\tilde{\mathbf{r}}_g] \\ m[\tilde{\mathbf{r}}_g] & \mathbf{I}_N \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

où :

$[\tilde{\mathbf{r}}_g]$ est la matrice de pré-produit vectoriel associée au vecteur entre l'origine du repère R_V et le centre de masse exprimé dans R_V .

$\mathbf{I}_{3 \times 3}$ est une matrice identité 3×3 .

Dans le domaine de recherche sur la dynamique des aérostats, plusieurs études [3, 2, 16] démontrent qu'à la matrice des masses il est nécessaire d'ajouter la masse de l'air déplacé par le ballon dans ses mouvements. En effet, cette masse augmente l'inertie du système. Les termes correspondants ($\mathbf{M}_{11}, \mathbf{M}_{22}$) seront discutés dans la section portant sur les effets aérodynamiques (section 2.1.3), mais s'intégreront dans la matrice des masses et inerties finale de la façon suivante :

$$\mathbf{M}_a = \begin{bmatrix} m\mathbf{I}_{3 \times 3} + \mathbf{M}_{11} & -m[\tilde{\mathbf{r}}_g] \\ m[\tilde{\mathbf{r}}_g] & \mathbf{I}_N + \mathbf{M}_{22} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Ainsi, la matrice des masses et des inerties obtenue pour une configuration des équipements telle que le centre de masse soit le plus près possible du centroïde (12

moteurs pour 6 DDL, tel que discuté à la section 2.4.1) est :

$$m = 11.78kg \quad (2.9)$$

$$\mathbf{I}_C = \begin{bmatrix} 4,53 & 0 & 0 \\ 0 & 4,53 & 0 \\ 0 & 0 & 4,53 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$\mathbf{I}_N = \begin{bmatrix} 15,06 & -0,07 & 0 \\ -0,07 & 15,19 & 0,03 \\ 0 & 0,03 & 15,04 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$\mathbf{M}_d = \begin{bmatrix} 11,78 & 0 & 0 & 0 & 0,33 & 0 \\ 0 & 11,78 & 0 & -0,33 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 11,78 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0,33 & 0 & 15,06 & -0,07 & 0 \\ 0,33 & 0 & 0 & -0,07 & 15,19 & 0,03 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,03 & 15,04 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

puis avec \mathbf{M}_{11} et \mathbf{M}_{22} , développés à la section 2.1.3 :

$$\mathbf{M}_a = \begin{bmatrix} 51,07 & 0 & 0 & 0 & 0,33 & 0 \\ 0 & 51,07 & 0 & -0,33 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 51,07 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0,33 & 0 & 42,58 & -0,07 & 0 \\ 0,33 & 0 & 0 & -0,07 & 42,71 & 0,03 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,03 & 42,55 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

2.1.2 Torseur dynamique

Le torseur dynamique englobe des effets assimilables aux forces de Coriolis et centrifuges. Il est aussi quelquefois nommé torseur d'inertie :

$$\boldsymbol{\tau}_d = \begin{bmatrix} -m\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v} + m\boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{r}_g \times \boldsymbol{\omega}) \\ -m\mathbf{r}_g \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}) + \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I}_N \boldsymbol{\omega}) \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Ces termes découlent directement des équations du mouvement déterminées par les relations d'Euler-Newton et en utilisant le théorème de Koenig (moment cinétique).

2.1.3 Torseur aérodynamique

Les effets visqueux de l'air agissent généralement comme amortisseur proportionnellement à la vitesse et/ou à une puissance de celle-ci. Pour les estimer, il faut tout d'abord connaître le régime dynamique dans lequel évolue le Tryphon, qui est représenté par le nombre de Reynolds [54] :

$$1,5E^4 < Re = \frac{UL}{\nu} < 1,5E^5$$

où L est la longueur du cube $2,25m$,

ν la viscosité de l'air à 20° Celcius, $1,50E^{-5}$

et U la vitesse de l'objet immergé.

L'étendue des vitesses U a été observée expérimentalement dans l'intervalle $[0, 1]$ m/s, le minimum permettant un mouvement du robot et le maximum approximatif pouvant être atteint selon les limites théoriques du système de motorisation.

Puisque $10^3 < Re < 10^6$ et en omettant les perturbations à la surface du volume, le robot évolue toujours en régime laminaire [54]. Le fluide dans lequel le cube est immergé peut ainsi être considéré comme un fluide parfait. Cette propriété provient principalement de la faible viscosité de l'air, jumelée à la faible vitesse du robot. Le torseur aérodynamique peut alors être développé en considérant l'écoulement potentiel des équations de Kirchhoff [3, 2, 18]. Cette approche permet de représenter l'énergie du fluide entourant l'objet sous forme d'une masse ajoutée au système. Cette masse est déterminée en résolvant l'intégrale sur la surface :

$$M_k = \oint \int_S \phi \frac{\partial \phi}{\partial n} ds = -\frac{\rho_A}{U_B^2} \int_S \frac{\partial \phi}{\partial n} ds \quad (2.16)$$

où U_B est la vitesse de l'objet, ϕ la fonction de flot potentiel respectant la condition $\nabla^2 \phi = 0$ partout, n le vecteur normal à S , la surface de l'objet et ρ_A , la densité de l'air. Posant l'hypothèse qu'il n'y ait aucun effet de vagues (interface entre différents milieux) ni de courant (poussée du fluide beaucoup plus grande que celle du solide et uniforme dans l'ensemble du fluide entourant celui-ci), alors dans toutes les directions [18] :

$$M_k = km_a \quad (2.17)$$

dans toutes les orientations :

$$M_k = k \frac{m_a l^2}{6} \quad (2.18)$$

où $m_a = \rho_A l^3$ et k est un facteur géométrique.

Étant donné que le référentiel local du robot est positionné au centre volumique, les termes \mathbf{M}_{12} et \mathbf{M}_{21} sont nuls [2]. De plus pour un cube parfait (i.e. dimensions égales) les nombreuses symétries ont pour conséquence que la flambée, le balancement et le soulèvement sont identiques. Les trois facteurs k_i sont donc égaux et obtenus analytiquement [18] : $k_{1,2,3} = 0,7$. Tel que discuté à la section 1.1.1, d'autres approches théoriques existent. Elles mènent à des résultats légèrement différents, mais dans cette étude la valeur ne sert qu'à initialiser la modélisation avant l'optimisation discutée à la section 2.3.

Il est maintenant possible de déterminer les valeurs dans les équations dynamiques du torseur de force aérodynamique :

$$\mathbf{K}_a = - \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{11} & \mathbf{M}_{12} \\ \mathbf{M}_{21} & \mathbf{M}_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{v}} \\ \dot{\boldsymbol{\omega}} \end{Bmatrix} \quad (2.19)$$

$$- \begin{bmatrix} \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{M}_{11}\mathbf{v} + \mathbf{M}_{12}\boldsymbol{\omega}) \\ \mathbf{v} \times (\mathbf{M}_{11}\mathbf{v} + \mathbf{M}_{12}\boldsymbol{\omega}) + \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{M}_{21}\mathbf{v} + \mathbf{M}_{22}\boldsymbol{\omega}) \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

où les différentes matrices 3x3 \mathbf{M}_{ij} sont obtenues par intégration du gradient de potentiel de la vitesse sur la surface. Le premier terme de l'équation 2.19 est généralement ajouté à la matrice des masses et inerties (2.7), d'où son appellation de matrice des masses et inerties ajoutées/majorées.

$$\mathbf{M}_{11} = \begin{bmatrix} 0,7m_a & 0 & 0 \\ 0 & 0,7m_a & 0 \\ 0 & 0 & 0,7m_a \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

$$\mathbf{M}_{12} = \mathbf{M}_{21} = 0 \quad (2.22)$$

$$\mathbf{M}_{22} = \begin{bmatrix} \frac{0,7m_a l^2}{6} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{0,7m_a l^2}{6} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{0,7m_a l^2}{6} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

où m_a est la masse d'air déplacée par le robot, ce qui donne $0,7m_a = 7,24$ kg et $\frac{0,7m_a l^2}{6} = 5,07$ kg.m². Le torseur ne comporte que le deuxième terme de l'équation 2.20 et après simplification des termes nuls, il devient :

$$\boldsymbol{\tau}_a = - \begin{Bmatrix} \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{M}_{11}\mathbf{v} \\ \mathbf{v} \times \mathbf{M}_{11}\mathbf{v} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{M}_{22}\boldsymbol{\omega} \end{Bmatrix} \quad (2.24)$$

2.1.4 Torseur du poids et de la poussée d'Archimède

La force de gravité s'appliquant au centre de masse, si celui-ci est différent de l'origine, elle engendrera un moment. Par contre, l'origine étant par définition au centre volumique du robot, la poussée d'Archimède, elle, ne causera aucun moment. Lors des manipulations, le ballon des robots est gonflé avec tout le poids embarqué et le volume d'hélium utilisé est tout juste suffisant pour annuler la force gravitationnelle. On obtient un torseur des poids et des poussées composé uniquement des termes de moments liés au bras de levier de la force gravitationnelle.

$$\boldsymbol{\tau}_g = \left\{ \begin{array}{c} \mathbf{0} \\ \mathbf{r}_g \times \mathbf{f}_g \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ mg(y c \theta c \phi - z c \theta s \phi) \\ -mg(x c \theta c \phi + z s \theta) \\ mg(x c \theta s \phi + y s \theta) \end{array} \right\} \quad (2.25)$$

La distance entre le centre de masse du robot (centroïde) et le repère R_V (centre volumique) n'a en général qu'une composante qu'une composante en z , les masses sur les couronnes basses et hautes du cube étant suffisamment bien réparties. Tous les termes sont néanmoins conservés pour étudier ultérieurement l'impact d'une mauvaise répartition de l'équipement. Puisque le poids est entièrement équilibré par la poussée d'Archimède, la quantité d'équipement qu'il est possible d'embarquer sur l'aérobot dépend du maximum de levée que le ballon peut fournir. Une approximation consisterait à supposer un cube de 2.25 mètres plein (13.66 kg), mais ce serait sans prendre en compte le comportement de la paroi qui est légèrement différent d'un cube parfait. En effet, à cause de la pression de l'hélium cinq des six faces sont convexes tandis que celle du dessous est concave (FIG. 2.2), ce qui donne approximativement un volume de 9.85 m³ et une capacité de 11.83 kg ou 116 N. Considérant la masse totale de la structure, $m_S=1.27$ kg, et celle du ballon (valve et hélium inclus), $m_B=4.94$ kg, il reste $m_C=5.62$ kg de disponible pour les moteurs et la mécatronique.

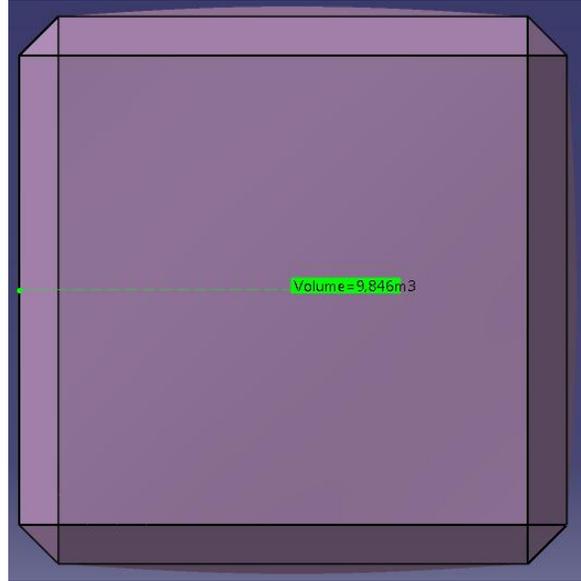


FIGURE 2.2 – Calcul du volume d'hélium

2.1.5 Torseur de propulsion

La disposition des moteurs permet d'agir sur les 6 degrés de liberté du Tryphon de sorte que le torseur de propulsion, $\boldsymbol{\tau}_p = \{F_X \ F_Y \ F_Z \ M_X \ M_Y \ M_Z\}^T$, découle directement du positionnement des moteurs. Les robots préalables à cette étude comprenaient huit moteurs. La couronne supérieure en était dépourvue afin de permettre une plus grande charge utile disponible tout en procurant une stabilisation passive des angles de gîte et d'assiette longitudinale et en abaissant le centre de masse. Avec cette configuration la matrice de passage des forces aux moteurs aux forces généralisées devient :

$$\boldsymbol{\tau}_p = \mathbf{L}\mathbf{f}_M \text{ avec } \mathbf{f}_M = \{F_0 \ F_2 \ F_4 \ F_6 \ F_8 \ F_A \ F_C \ F_E\}^T \text{ }^1$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & b_z & b_z & -b_y & -b_y & b_y & b_y \\ b_z & b_z & 0 & 0 & -b_x & b_{x+} & b_{x+} & -b_x \\ b_{y+} & -b_y & b_x & -b_x & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

1. Les indices des forces correspondent à la numérotation hexadécimale des moteurs dans le programme principal de contrôle.

où :

$$b_x = \frac{l}{2} - x, b_y = \frac{l}{2} - y, b_z = \frac{l}{2} - z, b_{x+} = \frac{l}{2} + x, b_{y+} = \frac{l}{2} + y$$

$\frac{l}{2}$ est la distance d'un moteur au centre volumique selon un des axes,
 x, y, z est la position du centre de masse par rapport au centre volumique.

C'est sur ce vecteur que le contrôleur des robots vient agir pour répondre à la commande. Étant donné que les moteurs agissant sur les axes x et y sont sur la couronne inférieure du cube, leur poussée induit des moments sur le solide en fonction du bras de levier par rapport au centre de masse. De la même façon les moteurs en z , lorsque actionnés séparément, induisent des rotations autour de x et y . Jusqu'à la présente étude ce phénomène engendrait quelquefois des oscillations (balancier) se stabilisant tranquillement et passivement.

2.2 Modèle numérique

Le modèle numérique est développé au moyen du logiciel MatLab. Cet environnement convient parfaitement au développement d'un modèle matriciel tel que celui des Tryphons discuté précédemment, entre autres car il permet aussi la résolution rapide et aisée des ODEs.

2.2.1 Script Matlab

Le premier modèle développé consiste en un script de code-m. Ce format permet une grande flexibilité et un rapprochement syntaxique avec le code-C utilisé pour le programme embarqué. L'architecture du code est composée de trois fichiers principaux :

- `simulation.m` : Programme principal (sous-section 2.2.1.1)
- `masse.m` : Création du modèle géométrique (sous-section 2.2.1.2)
- `tryphonequ.m` : Équations différentielles du mouvement (sous-section 2.2.1.3)
- `moteurs.m` : Réaction aux moteurs et contrôle (sous-section 2.2.1.4)

2.2.1.1 Programme principal

Le fichier `simulation.m` lance d'abord la création du modèle (sous-section 2.1.2) puis une boucle de résolution des équations du mouvements (sous-section 2.1.3) au moyen du solveur `ode45`. La position est réévaluée à chaque itération et un appel à la fonction `PIDcontrolleur` permet de déterminer les forces de réaction. C'est dans ce programme que sont données les condition initiales du système (vitesses et positions) ainsi que la position désirée (commande).

Une autre version de ce fichier permet de comparer automatiquement la trajectoire obtenue (entre la consigne et l'objectif, sans gestion de la trajectoire) avec une trajectoire réelle enregistrée afin d'optimiser la valeur du facteur géométrique k , tel qu'élaboré à la section 2.3.

2.2.1.2 Modèle géométrique

La fonction `masse.m` calcule les masses et les inerties du robot selon les paramètres géométriques fixes (volume d'hélium, masse de la structure), ainsi qu'en interprétant un fichier `.csv` listant tout l'équipement embarqué sur le robot (positions selon le référentiel local et poids mesurés au gramme). Le facteur géométrique k servant au calcul de la proportion du volume d'air déplacé à ajouter à la matrice des masses et inerties y est défini par défaut à $k = 0.7$ à moins qu'il ne soit spécifié en entrée. Le script renvoie la matrice des masses et inerties majorée et la distance du centre de masse par rapport à l'origine.

2.2.1.3 Équation différentielles

La fonction `tryphonequ.m` est utilisée en entrée du solveur `ode45` et décrit numériquement à chaque itération l'équation 2.2 à résoudre. Tel qu'il a été mentionné à la section 1.1.5, il est difficile de transposer ce calcul sur un micro-processeur afin d'embarquer une prédiction de la dynamique du robot : il faudrait linéariser cette équation. L'emphase de cette étude est mise sur la détermination des éléments critiques et la simulation de contrôleurs. Il n'est donc pas nécessaire de simplifier cette équation.

2.2.1.4 Réactions aux moteurs

La fonction `moteurs.m` est appelée par `tryphonequ.m` afin de calculer les commandes à envoyer aux moteurs et leur impact sur les 6 degrés de liberté du robot. La sortie est directement le torseur de propulsion dans le référentiel local. C'est aussi dans ce script que les limites réelles des moteurs sont imposées afin de respecter la réalité. Selon le fabricant les moteurs peuvent au maximum soulever 190 grammes, ce qui revient à une poussée $F_{MAX} = 1.86N$.

2.2.2 Modèle Simulink

Se basant sur les résultats du modèle précédent et l'exemple `Simulink 6 DOF body`, un modèle à l'interface plus synthétisée et plus intuitive a été développé dans l'environnement `Simulink` de `MatLab`. Il permettra entre autres de tester différents contrôleurs plus rapidement grâce aux bibliothèques `Simulink` disponibles. Un élément du modèle précédent a été conservé tel quel, le fichier `masses.m`, qui doit être lancé avant une simulation du modèle afin de créer les variables nécessaires dans l'espace de travail. Il permet de conserver la structure flexible de fichiers `.csv` pour les configurations d'équipement embarqué.

2.3 Validation du modèle numérique et optimisation

Le modèle a d'abord été analysé qualitativement d'après l'observation des trajectoires de la représentation visuelle du cube. Il a été observé que la dynamique du robot modélisé réagissait naturellement. Par exemple, des effets de balancement sont nettement visibles lors d'une propulsion trop forte des moteurs en x ou en y .

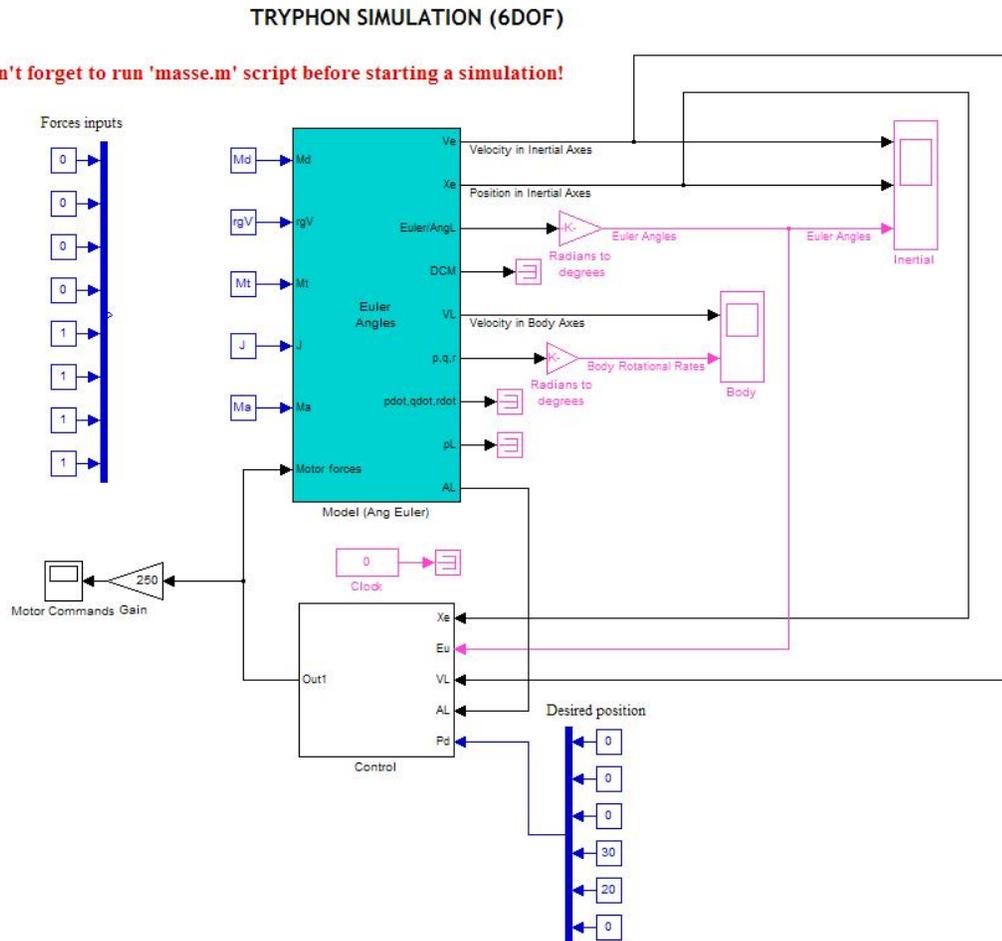


FIGURE 2.3 – Modèle Simulink du Tryphon

2.3.0.1 Tests manuels

Des relevés ont permis expérimentalement de déterminer les courbes de déplacement du robot réel. Grâce à ces observations, le modèle a été ajusté afin de correspondre le plus précisément possible à la réalité.

Obtenir des données valides, précises et utilisables à partir de tests sur un aérostat est un défi. Le robot est constamment en mouvement : il est influencé par les courants de convection, la ventilation de la salle et les turbulences causées par des corps rigides et des humains se déplaçant autour de lui. Commencer une prise de données à partir d'une position stable est déjà une tâche complexe. La taille du robot le rend difficile à tenir en place, ainsi qu'à relâcher sans oscillations. Suivre une ligne droite n'est pas non plus évident : la dérive inévitable causée par les courants environnants et les

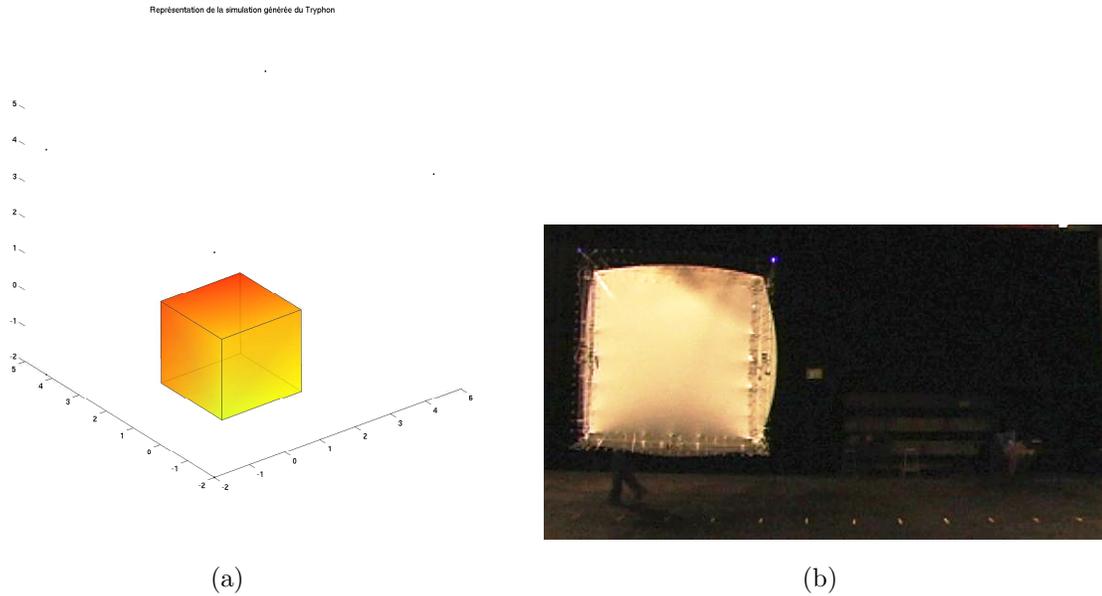


FIGURE 2.4 – a- Impression de l'écran de visualisation animée des trajectoires, b- Tests manuels et prise de données

légères asymétries de la structure et de sa motorisation introduisent des erreurs dans les mesures de distances.

Les séries de tests ont été exécutées dans une salle de théâtre fermée. La ventilation a été arrêtée; toutes les portes et les fenêtres ont été tenues closes afin que le robot atteigne un maximum de stabilité. Quelques courants résiduels ont été impossibles à éliminer complètement, mais la dérive était de moins de 20 cm/minute. Afin de mesurer les déplacements de l'aérobot, des bandes de ruban adhésif ont été disposées au sol à des intervalles de 2 pieds (61 cm), sur un parcours en ligne droite de 30 pieds (944 cm), tel que montré à la figure 2.3(b). En calculant la moyenne de trois répétitions de ce même parcours on peut réduire l'influence des conditions initiales (oscillations et orientation). Quatre tests ont été exécutés pour différentes puissances de moteurs (25%, 50%, 75%, 100%), afin de compenser la lacune majeure du modèle concernant la précision des effets d'amortissement aérodynamique (proportionnels à une puissance de la vitesse).

Tel qu'attendu suite aux approximations du modèle, la comparaison du comportement entre la simulation et le robot réel ne montre pas une correspondance précise entre la théorie et les mesures (FIG. 2.5).

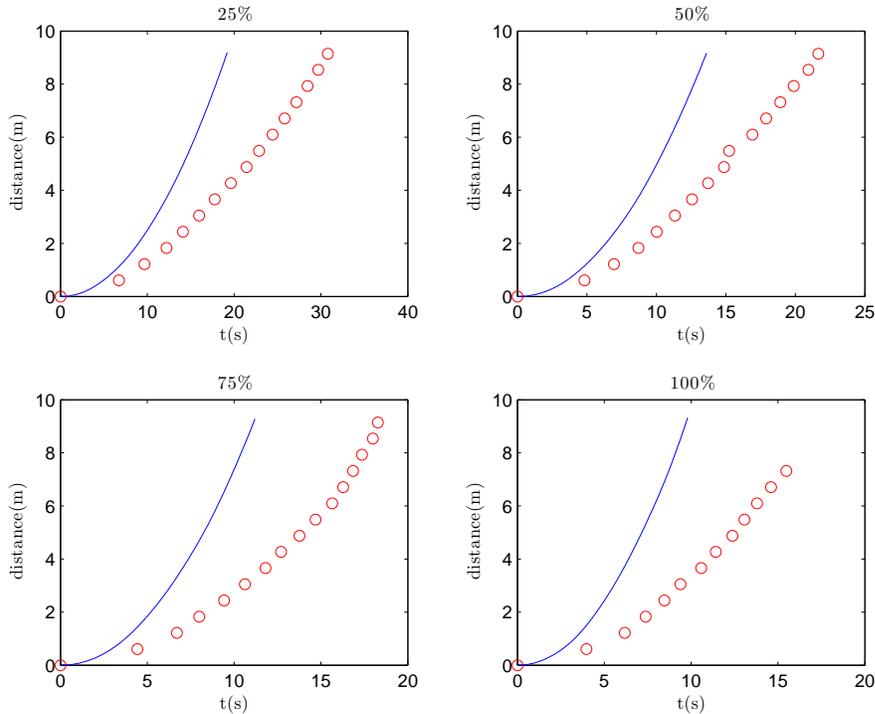


FIGURE 2.5 – Comparaison du modèle sans ajustement et des tests réels (points)

Nous faisons l’hypothèse que les masses sont exactes au gramme près puisque découlant de mesures prises pour chaque composant réel. De plus les puissances des moteurs sont aussi considérées exactes puisqu’elles sont déterminées selon les spécifications techniques du fabricant². Ainsi le seul facteur pouvant influencer les courbes réside dans le calcul des forces aérodynamiques. Étant donné qu’un cube a la même valeur pour tous les facteur géométriques k_i (section 2.1.3), l’ajustement de ce paramètre seul sera suffisant pour modifier le comportement du modèle. Il influencera alors la matrice des masses majorée (Équ. 2.7) en plus du torseur aérodynamique (Équ. 2.24).

Afin d’obtenir la valeur de k minimisant l’erreur quadratique sur tous les essais, la somme de ces erreurs doit être utilisée dans la sélection.

La valeur optimale déterminée de $k = 3.8$ transforme la matrice des masses et

2. Cette hypothèse s’avère ne pas être vérifiée en général, car les moteurs après un certain nombre d’heures d’utilisation ont des courbes de puissances légèrement différentes. Toutefois il est possible de compenser cela de manière logicielle dans les ESC (section 3.3.3) de sorte que l’ordinateur de bord n’y voie aucune différence.

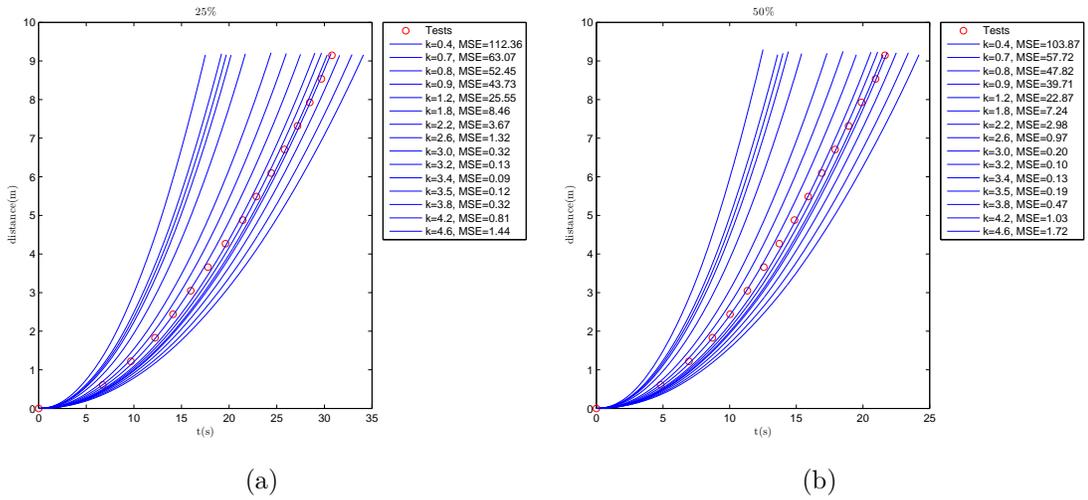


FIGURE 2.6 – a- Comparaison des itérations du modèle (moteurs à 25%) et des tests réels, b- Comparaison des itérations du modèle (moteurs à 50%) et des tests réels

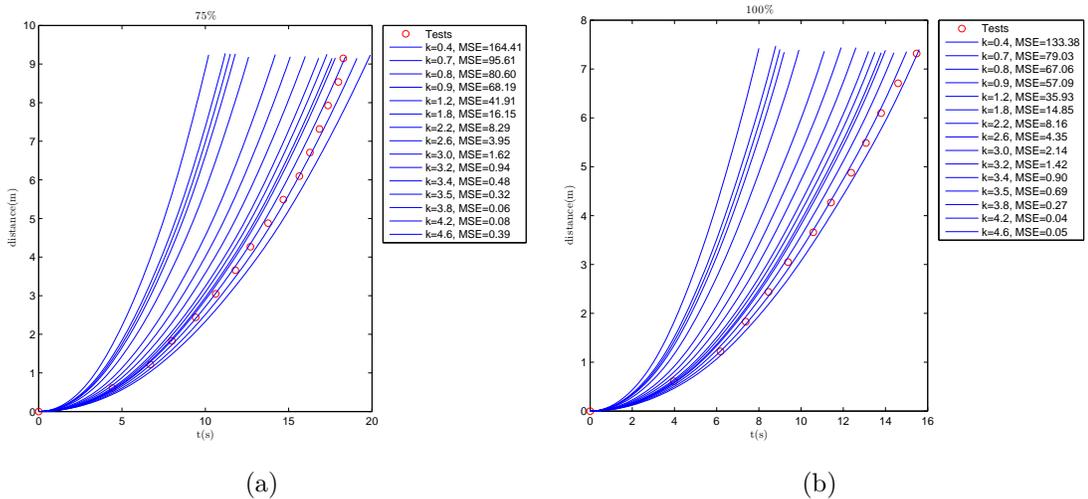


FIGURE 2.7 – a- Comparaison des itérations du modèle (moteurs à 75%) et des tests réels, b- Comparaison des itérations du modèle (moteurs à 100%) et des tests réels

k	25	50	75	100	ΣMSE
0,4	112,36	103,87	164,41	13,338	514,02
0,7	63,07	57,72	95,61	79,03	295,43
0,8	52,45	47,82	80,6	67,06	247,93
0,9	43,73	39,71	68,19	57,09	208,72
1,2	25,55	22,87	41,91	35,93	126,26
1,8	8,46	7,24	16,15	14,85	46,7
2,2	3,67	2,98	8,29	8,16	23,1
2,6	1,32	0,97	3,95	4,35	10,59
3,0	0,32	0,2	1,62	2,14	4,28
3,2	0,13	0,1	0,94	1,42	2,59
3,4	0,09	0,13	0,48	0,9	1,6
3,5	0,12	0,19	0,32	0,69	1,32
3,8	0,32	0,47	0,06	0,27	1,12
4,2	0,81	1,03	0,08	0,04	1,96
4,6	1,44	1,72	0,39	0,05	3,6

TABLE 2.1 – Sommaire des erreurs quadratiques moyennes sur les 4 tests

inerties à ajouter (EQU. 2.21) de sorte que les termes deviennent :

$$\mathbf{M}_{11} = \begin{bmatrix} 39,29 & 0 & 0 \\ 0 & 39,29 & 0 \\ 0 & 0 & 39,29 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$\mathbf{M}_{12} = \mathbf{M}_{21} = 0 \quad (2.28)$$

$$\mathbf{M}_{22} = \begin{bmatrix} 27,52 & 0 & 0 \\ 0 & 27,52 & 0 \\ 0 & 0 & 27,52 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

La variation du facteur k repose sur la géométrie du cube. Il est important de rappeler qu'à la section 2.1.3, la géométrie d'un cube parfait a été utilisée pour le calcul du facteur géométrique. Cependant, lorsque l'enveloppe du ballon est gonflée, ses faces deviennent convexes et tendent vers une forme plus sphérique. Sachant que pour un objet de même masse le facteur géométrique de la sphère serait $k_S = 0,49$, le facteur calculé empiriquement à partir d'û cube aurait du être plus faible à l'expérimentation. Le fait d'en obtenir un plus élevé est fort probablement lié à la structure des arêtes triangulaires, qui provoque des turbulences. Ces turbulences augmentent la friction de

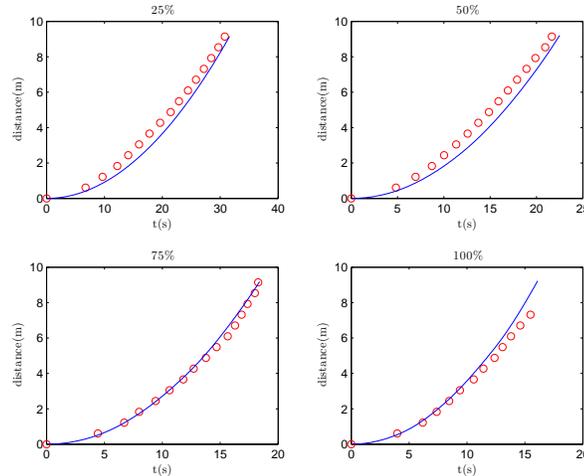


FIGURE 2.8 – Comparaison du modèle ajusté ($k = 3.8$) et des tests réels (points)

l'air aux arêtes, mais modifie aussi les propriétés du fluide immergeant. Lors du calcul théorique, celui-ci a été considéré parfait et en mode laminaire. Cette hypothèse n'est en fait valable que loin de la paroi du cube. Les perturbations créées par la structure des poutrelles peuvent être suffisamment importantes pour que même l'hypothèse de fluide laminaire ne puisse être retenue.

Ces effets jumelés aux faces légèrement convexes créent un objet dont l'aérodynamique est beaucoup plus complexe que celle d'un cube parfait.

Malgré tout l'optimisation a permis d'adapter le modèle et elle a mené à un facteur géométrique presque quatre fois plus grand que le facteur théorique. Le résultat est une force d'amortissement beaucoup plus grande, qui agit sur le robot proportionnellement au carré de sa vitesse. D'un point de vue physique, cela signifie que les forces dues aux effets aérodynamiques sont beaucoup plus grandes que celles qui s'exerceraient sur un cube parfait.

2.4 Simulations

L'étude décrite précédemment peut servir à conduire différentes simulations sur les trajectoires et les équipements embarqués qui aideront à mieux cerner le comportement de cet aérostat particulier.

2.4.1 Conception d'une configuration à 6 DDL

L'une des pistes permettant d'améliorer la robustesse des Tryphons consiste à minimiser le temps de calibration au montage. En effet, tel qu'expliqué à la section 2.1.4, le ballon doit être juste assez gonflé pour contre-balancer les effets de la gravité. De plus, généralement, un équilibrage initial (au repos) des angles de gîte et d'assiette longitudinale est exécuté manuellement pour augmenter la stabilité des robots et leur autonomie.

Afin de diminuer ce temps de montage une nouvelle configuration des équipements a été étudiée afin de ramener le centre de masse le plus près possible du centroïde. Cette approche a un double avantage :

1. Diminuer les bras de levier. Si les équipements sont légèrement déplacés ou si la structure imparfaite (de par sa construction artisanale) crée des déséquilibres, ces moments engendrés auront moins d'impact.
2. Fournir le potentiel d'une utilisation contrôlée des six degrés de liberté.

Pour ce faire, les batteries ont été déplacées dans les huit coins symétriquement plutôt qu'à proximité des moteurs au centre des poutrelles ; 4 moteurs ont été ajoutés à la couronne du haut. Le tenseur de propulsion devient alors :

$$\boldsymbol{\tau}_p = \mathbf{L}\mathbf{F}_M \text{ avec } \mathbf{F}_M = \{F_0 \ F_2 \ F_4 \ F_6 \ F_8 \ F_A \ F_C \ F_E \ A_0 \ A_2 \ A_4 \ A_6\}^T \text{ }^3$$

$$\mathbf{L}_{12} = [L1|L2], \mathbf{L}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -b_z & -b_z \\ -b_z & -b_z & 0 & 0 \\ b_{y+} & -b_y & b_x & -b_x \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

où :

$$b_x = \frac{l}{2} - x, b_y = \frac{l}{2} - y, b_z = \frac{l}{2} - z, b_{x+} = \frac{l}{2} + x, b_{y+} = \frac{l}{2} + y$$

3. Les indices des forces correspondent à la numérotation hexadécimale des moteurs dans le programme principal de contrôle.

$\frac{l}{2}$ est la distance d'un moteur au centre volumique selon un des axes,
 x, y, z est la position du centre de masse par rapport au centre volumique,
 L_1 tel que définit à l'équation 2.26.

La configuration à six degrés de libertés contrôlés standard, telle que présentée à la FIG. 4.1(a) donne en simulation une distance $r_g = \{0 \ 0 \ 0,02\}$ m, comparée à $r_g = \{0 \ 0 \ 0,28\}$ m dans la configuration précédente.

2.4.2 Effets de la distribution des équipements

Le modèle Simulink a été utilisé afin de prévoir le comportement de robots selon différentes configurations d'équipement. En effet, l'électronique (spécialement le réseau de concentrateurs, section 3.3.2) permet une manipulation facile des capteurs et des moteurs en reconnectant ceux-ci en un autre endroit de la structure. Même si le contrôleur peut compenser pour les déséquilibres de son état initial (erreurs permanentes), cette compensation affecte l'énergie qui lui est requise pour remplir les tâches demandées.

À titre d'exemple, trois différentes configurations d'équipement standard ont été comparées pour mieux en comprendre les impacts :

1. Une batterie dans chaque coin et la caméra sur l'arête opposée à celle de l'ordinateur de bord.
2. Idem à 1, mais en retirant la caméra.
3. Idem à 1, mais en descendant les quatre batteries des coins supérieurs aux coins inférieurs (2 batteries par coin).

Toutes les configurations susmentionnées utilisent 12 moteurs, 12 sonars, un accéléromètre et une boussole, tel qu'illustré sur la FIG. 4.1(a). En simulation autant que lors de tests avec le robot réel, le contrôleur a été à même de stabiliser le robot pour toutes ces configurations. Pour la première et la dernière configuration la matrice des inerties calculée est la même :

$$J_{1,3} = \begin{bmatrix} 15,97 & -0,07 & 0 \\ -0,07 & 16,10 & 0,03 \\ 0 & 0,03 & 15,95 \end{bmatrix} \text{ (kg.m}^2\text{)} \quad (2.31)$$

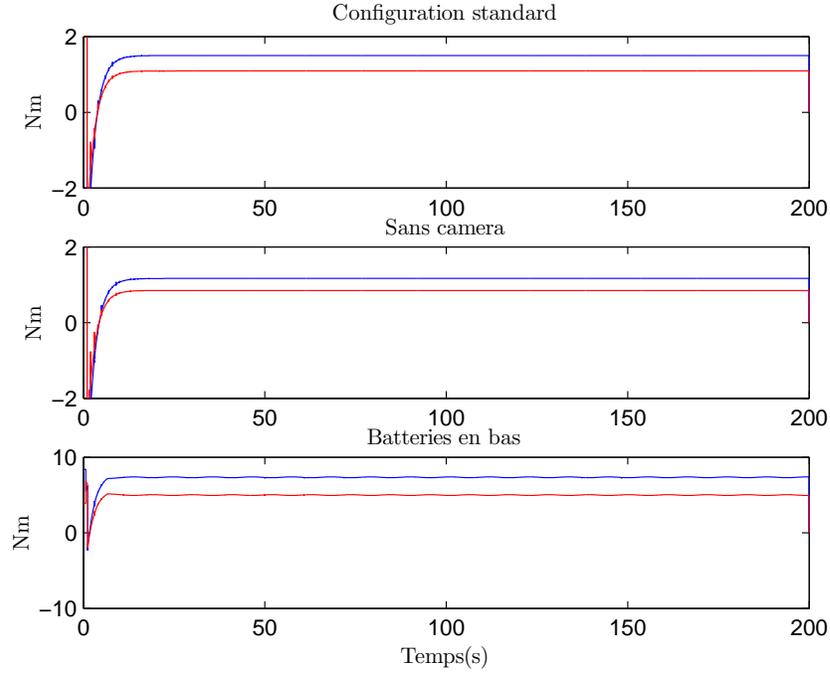


FIGURE 2.9 – Réactions (moments autour de l’axe x en bleu et y en rouge) simulées pour différentes configurations d’équipement

alors qu’en retirant la caméra, cette dernière change légèrement :

$$J_2 = \begin{bmatrix} 15,95 & -0,09 & 0,08 \\ -0,09 & 16,00 & 0,03 \\ 0,08 & 0,03 & 15,98 \end{bmatrix} \text{ (kg.m}^2\text{)} \quad (2.32)$$

Interchanger la position des batteries ne produit donc aucun effet sur les inerties. Ceci est dû au référentiel local, qui est fixé sur le centroïde. Par contre, la position du centre de masse est quant à elle influencée de manière significative pour la troisième configuration :

$$r_1 = \{0 \ 0 \ 0,025\} \text{ m} \quad r_2 = \{0 \ 0 \ 0,019\} \text{ m} \quad r_3 = \{0 \ 0 \ 0,134\} \text{ m} \quad (2.33)$$

Afin de comparer les impacts au niveau énergétique, des simulations ont été exécutées avec la même commande en position (et toujours à partir de l’origine) : $u_{x,y,z,\theta,\phi,\psi} = \{0 \ 0 \ 0 \ 30 \ 20 \ 0\}$. Les forces et les moments résultants pour remplir la tâche dans chacune des configurations selon un contrôleur PD identique sont montrés à la FIG. 2.9.

L'énergie globale dépensée après 200 secondes de simulation, calculée au moyen des forces et des déplacements, est représentée par :

$$E_1 = 0,4249 \quad E_2 = 0,4269 \quad E_3 = 0,7550 \quad (2.34)$$

Une comparaison entre les deux premiers tests montre que le robot est robuste aux modifications de configurations de capteurs. La majeure partie de son poids étant composée de la structure, du ballon, des moteurs et des batteries, le déplacement de capteurs ne l'affecte pas de façon significative. À cet effet le capteur le plus lourd a été sélectionné pour ce test (caméra), ce qui justifie cette généralisation. Le dernier test montre que l'utilisateur doit malgré tout être prudent dans la disposition des éléments principaux composant la masse de la mécatronique, soit : les moteurs et les batteries. Même si le robot parvient à se stabiliser, l'énergie requise est près de 80% plus grande.

Les équations du mouvement du Tryphon ont été développées d'après la littérature pertinente, puis ont servi à créer un modèle numérique. Ce modèle a ensuite été optimisé par comparaison avec des données empiriques. Il a finalement été utilisé pour déterminer la configuration optimale pour un contrôle actif des six degrés de liberté ainsi que pour évaluer l'influence de diverses configurations des équipements embarqués. La prochaine section concerne la robustesse électro-mécanique des aérobots.

Chapitre 3

Robustesse électro-mécanique

Le contexte de ce projet a pour conséquence et objectif de propulser chacun des prototypes robotiques le plus rapidement possible sous les projecteurs, devant un public. Il est arrivé à plusieurs reprises par le passé que des éléments trop fragiles de par leur conception, destinés à des tests en laboratoire, brisent et manquent de ruiner la présentation. Il a donc été décidé d'étudier la robustesse des composantes mécaniques et électroniques du robot afin de garantir que le Tryphon puisse survivre à plusieurs performances interactives consécutives sans dommages ni maintenance démesurée.

Au début octobre 2009, lors des phases initiales de cette recherche, un atelier de création a eu lieu à l'Université Laval avec deux Tryphons et trois acteurs. L'objectif artistique était de permettre aux acteurs d'appivoiser la dynamique et le potentiel visuel des robots, tandis que l'objectif technologique était de tester la robustesse de différents modules entre les mains des artistes. Les modifications qui suivent, déterminées à la suite de résidence, concernent les moteurs (turbines), les câbles et leur connecteurs, les circuits de concentrateur et les batteries.

3.1 Survol de la structure

Les Tryphons sont des aérostats semi-rigides. Ils sont composés d'une enveloppe souple, contenant l'hélium et d'une structure rigide externe, appelée exosquelette. En plus de contenir toute l'électronique et les moteurs, le principal rôle de l'exosquelette est de tendre les parois du ballon pour obtenir les faces planes du cube.

La structure actuelle en fibre de carbone a été développée en 2006 suite à une étude par éléments finis basée sur des prises de données empiriques (capteurs de force) sur une structure de test en bois [14]. Cette étude a permis de réaliser une conception robuste, facile à assembler et qu'il est possible de mettre à l'échelle pour différentes dimensions de robots cubiques. Depuis 2006, très peu de modifications ont été faites à ce design et donc, pour cette maîtrise, l'hypothèse a été posée que la structure de l'exosquelette elle-même ne représentait pas un maillon faible de la robustesse du système.

À des fins de clarté, il est pertinent de rappeler ici le concept général. L'exosquelette est composé de 12 poutrelles, elles-mêmes composées d'un assemblage de tubes, de tiges et de bandes de fibres de carbone. La section des poutrelles est un triangle équilatéral de 20 cm de côté. Leur assemblage est rendu possible grâce à un ensemble de plusieurs centaines de connecteurs en résine, de neuf modèles différents, dessinés sur mesure et réalisés par stéréolithographie¹. Les poutrelles s'assemblent simplement en s'insérant les unes dans les autres. Elles maintiennent la forme de l'ensemble grâce à la tension créée par l'étirement du ballon qui y est fixé. Toutes les poutrelles ont été assemblées de manière artisanale. Malgré la grande précision des bancs d'assemblages et le talent des artisans, leur poids et leur géométrie ne sont pas parfaitement uniformes. Cela provoque à l'occasion des déformations importantes des poutrelles, spécialement lorsque le montage est rapide et que peu de précautions sont prises pour assurer une distribution uniforme de la tension au fur et à mesure que le ballon se remplit d'hélium. Certaines pistes ont été discutées afin de parvenir à un nouveau concept ayant une géométrie similaire, mais éliminant les risques d'asymétries. Par exemple, les poutrelles pourraient être produites en trois sections planaires moulées individuellement. Ces trois faces seraient ensuite assemblées de façon permanente ensemble pour obtenir la géométrie actuelle en triangle équilatéral.

1. Tous les composants en résine (SLS - Selective Laser Sentering) des robots sont réalisés chez le partenaire du projet AXIS Prototypes, à Montréal.

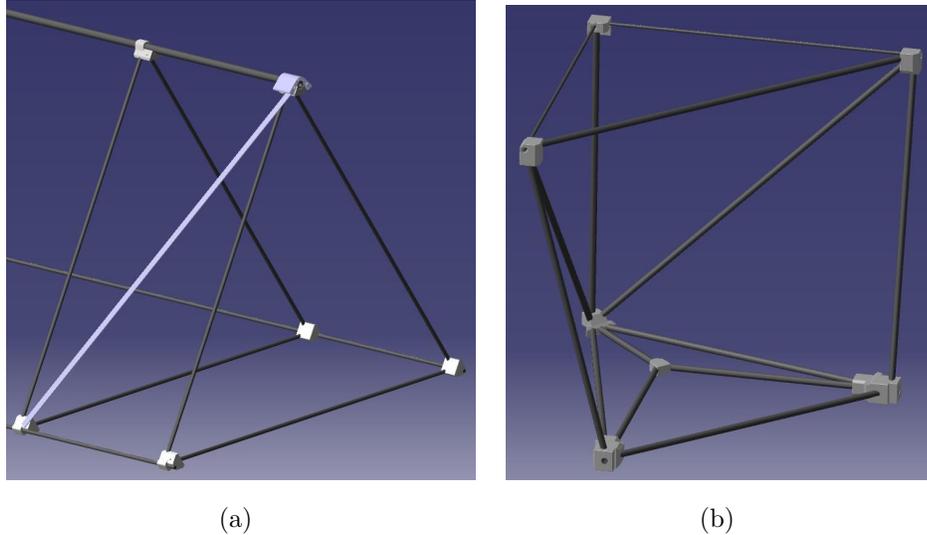


FIGURE 3.1 – a- Joints en SLS et assemblage des membrures, b- Coin de la structure

3.2 Turbines

Les actionneurs des robots sont des turbines positionnées au centre des arêtes avec, de chaque côté, des tuyères de polycarbonate transparent (tubulures) dirigeant leur poussée (air) vers les extrémités. De cette façon les poussées peuvent s'additionner lorsque deux robots s'assemblent côte-à-côte. Les turbines utilisées actuellement ont des hélices de polymère haute-densité et un carénage en fibre de carbone. Elles ont été sélectionnées avec le support d'une firme spécialisée, *DuctedFans.com* qui assure aussi leur maintenance. Si elles n'ont pas directement fait l'objet de questionnements lors de cette étude, leur support de fixation, en résine de prototypage rapide, a demandé plusieurs études, car il s'est avéré être trop rigide : il transmet les vibrations des moteurs à la structure, et les impacts sur la structure aux moteurs. Ces impacts modifient l'équilibre de rotation des moteurs, endommageant leur hélices et diminuant par conséquent la poussée des moteurs, qui deviennent plus bruyant. Les vibrations quant à elles risquent de faire céder les collages de la structure.

Une solution consistant en un fil de nylon muni d'une vis de serrage et passant dans des trous de fixation à l'extérieur du tube, puis autour des tiges de la poutrelle, a été conçue, mais n'a pas été réalisée (FIG. 3.2(b)). Le fil de nylon, flexible, peut absorber les chocs. Comme il est libre, il peut de plus glisser légèrement sur la structure, diminuant considérablement la transmission des vibrations.

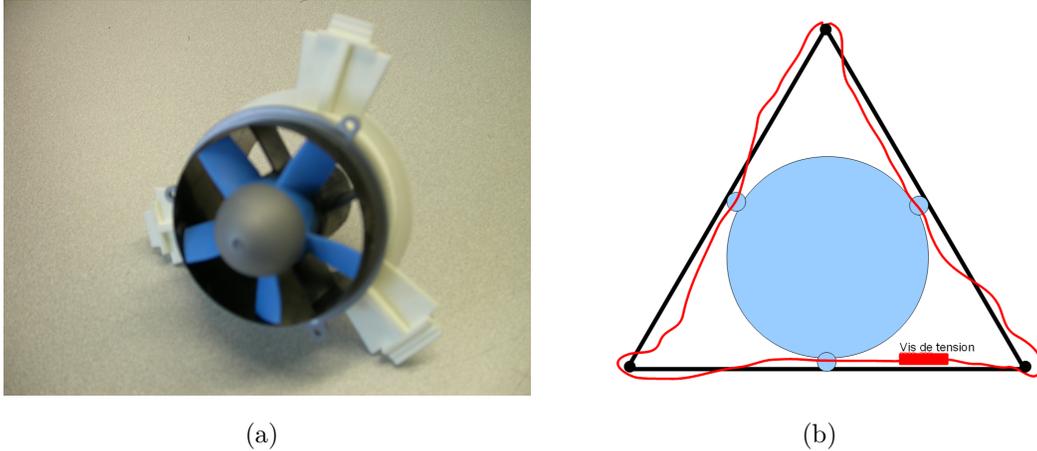


FIGURE 3.2 – a- Turbine ALFA et fixation en prototypage rapide (SLS), b- Nouveau concept de fixation utilisant un fil tendu

Cette nouvelle approche a l'avantage d'être moins coûteuse et plus simple à remplacer, en plus de limiter les vibrations transmises à la structure. Toutefois, il est possible que la tension nécessaire à maintenir correctement la turbine soit trop grande, et impose une contrainte trop forte sur le carénage des turbines.

Les tubulures dirigeant les flux d'air sont également des éléments critiques. Chaque moteur nécessitant deux tubulures de près de 1 m de longueur et de 65 mm de diamètre, la quantité de matériel que cela représente contribue notablement au poids total. Dans l'optique d'ajouter quatre nouveaux moteurs pour la couronne supérieure (configuration à 6 DDL, section 2.4.1), différents matériaux transparents ont été comparés pour sélectionner celui qui présente le meilleur rapport rigidité/poids. Dans le tableau 3.1, les

Matériel	Fixations requises	Poids du tube	Poids total
Polycarbonate (original)	2	38g	60g
Polyéthylène 10mil	2	40g	62g
Lexan 10mil	3	70g	92g
Lexan 5mil	3	32g	63g

TABLE 3.1 – Comparaison des matériaux étudiés pour les tubulures en polymère transparent

quatre matériaux les plus prometteurs sont présentés avec leur poids respectifs. Mise à part le poids, deux critères de design ont été retenus : le matériau doit être transparent pour des considérations esthétiques ; sa rigidité doit être suffisante pour supporter la poussée maximale sans s'écraser sur lui-même sous l'effet de la dépression causée par le

flux d'air en mouvement. Chaque tubulure est fixée à la structure par des anneaux de résine similaires à celui de la FIG. 3.2(a). Le nombre d'anneau varie selon la rigidité du matériau employé. Un anneau à chaque extrémité suffit pour la plupart des cas, mais pour le LexanTM qui est plus mince, un troisième est nécessaire au centre. Le résultat de cette comparaison révèle que le matériel déjà employé, le polycarbonate standard, reste le plus léger.

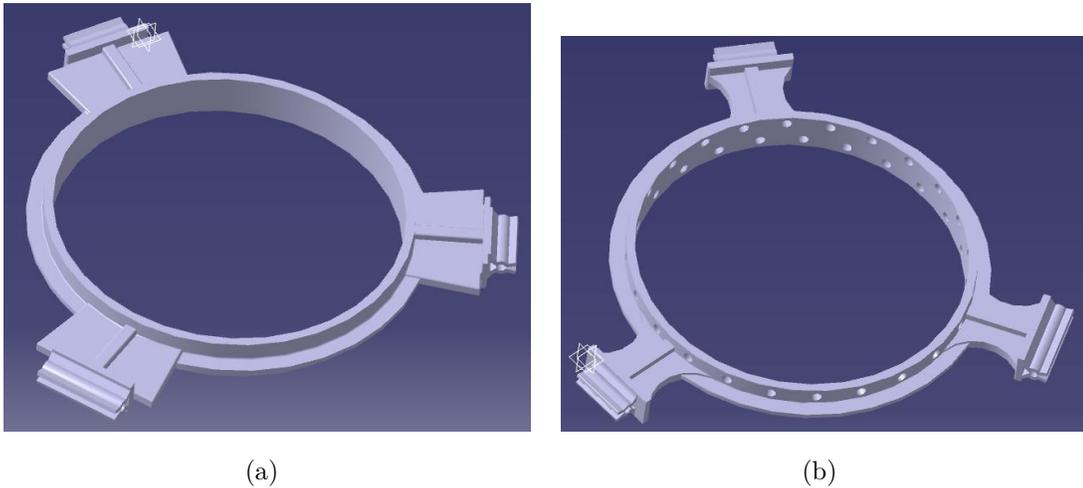


FIGURE 3.3 – a- Modèle de l'attache de fixation des tubulures (en SLS), b- Fixation allégée

Le design de ces anneaux de fixation peut aussi être allégé par un ensemble de perforations et de découpes en des points structurellement non critiques (FIG. 3.3(b)). Un gain de un à deux grammes par anneau en moyenne est observé, soit de 48 g à 85 g par cube.

3.3 Électronique

La fragilité de l'électronique des robots a posé problème à quelques reprises. Les robots étant régulièrement manipulés par différentes personnes, les circuits sont branchés et débranchés pour chaque transport avec un soin parfois relatif. De plus, il est arrivé à l'occasion, lors de collisions sévères des cubes entre eux ou avec des obstacles fixes, que des connecteurs sensibles se séparent et interrompent la communication entre l'ordinateur embarqué et ses composants. Il a donc été nécessaire de repenser les circuits des

concentrateurs, le câblage les reliant, les circuits des contrôleurs de vitesse des moteurs et les connecteurs entre tous ces composants.

Le poids reste une contrainte principale omniprésente dans le design de ces éléments. Les circuits et leur connecteurs doivent donc être plus robustes sans augmenter significativement le poids de l'ensemble du robot.

3.3.1 Câbles

Les câbles téléphoniques utilisés auparavant étaient rigides et leur connecteurs avaient tendance à forcer le fil ou la plaquette de circuit imprimé sur laquelle ils étaient branchés. Ces fils sont aussi très lourds, leur gaine épaisse (protégeant de l'environnement, dont l'électricité statique pouvant s'accumuler sur les poutrelles du cube) et leur configuration torsadée (permettant de diminuer l'effet des perturbations électromagnétiques) résultent en un ratio très médiocre de diamètre du conducteur (ou capacité de courant) sur son poids linéaire. De plus, la version installée préalablement à cette étude a une section AWG28 ce qui peut être insuffisant pour les pics de consommation observés qui culminent à près de 1A. Des tests de flexibilité et des mesures de masse

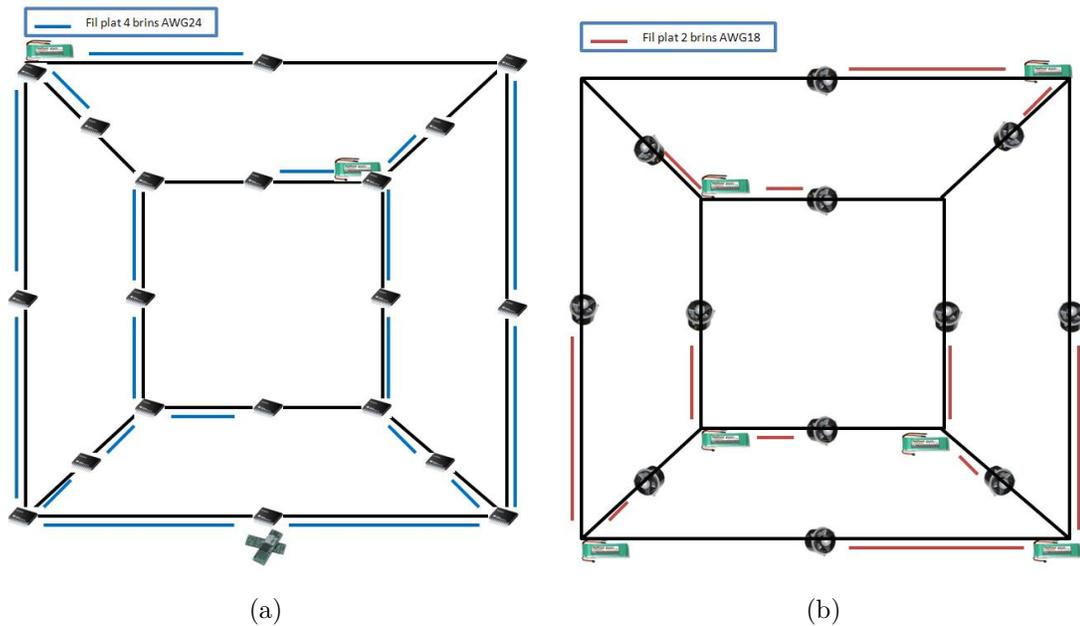


FIGURE 3.4 – a- Câblage de logique, b- Câblage de puissance.

linéaire ont été réalisés sur les fils disponibles en magasin ou sur des boutiques en ligne

spécialisées, tel que les fils audio haute-performance, le filage d'accessoire automobile, le câblage de bâtiment et les câbles plats audio. Ce dernier type de câble est particulièrement intéressant : pour le transport de signaux audio, des fils haut de gamme sont disponibles, offrant très peu de résistance, et n'ont généralement pas besoin d'une gaine épaisse. Le choix s'est arrêté sur des fils plats près de deux fois plus légers que



FIGURE 3.5 – Différents modèles de câbles TaperWire™(connecteurs à titre indicatif seulement)

ceux leur plus proche concurrent. C'est une compagnie américaine² qui conçoit ces fils plats haute fidélité. Ils sont destinés à être camouflés sous les meubles ou même sous du papier peint. Ils sont très légers tout en offrant peu de résistance au courant, et leur esthétique épurée, subtile, est bien adaptée à celle des robots. Ils ont été fixés par une bande autocollante sur les tubulures de chacune des arêtes, rigidifiant du même coup les tubulures et les fils et limitant les risques de bris causés par la fatigue des matériaux. Ils ont non seulement servi à diminuer la baisse de tension d'un bout à l'autre du circuit (moins de résistance au courant, puisque ces nouveaux fils, équivalents à des 24AWG remplacent des 28AWG) et à augmenter la robustesse du réseau électronique en le rendant solidaires des tubulures, mais ont de plus permis de diminuer le poids des cubes. Comparés aux fils téléphonique pesant $27.5g/m$, ceux-ci ne font que $18.5g/m$, ce qui représente un gain d'environ 135 g dans la configuration à huit moteurs.

Deux variantes de ces fils ont été utilisés : la première afin de transporter les signaux

2. Taperwire™<http://www.taperwire.com/>

du bus de communication I2C ainsi que l'alimentation des circuits logiques (FIG. 3.4(a)) et le second pour l'alimentation des moteurs (FIG. 3.4(b)). Comme ces derniers peuvent tirer jusqu'à 20A des batteries, des ensembles de fils plats équivalents à AWG18 ont été installés.

3.3.2 Concentrateurs I2C

Les circuits précédant ceux de la présente étude ont subi de nombreuses itérations de design au niveau électronique et étaient donc toujours sujets à être remplacés d'une démonstration à l'autre. Ils étaient imprimés de manière artisanale sur des plaques de résine très minces (FIG. 3.6(a)). La flexibilité des plaques, jumelée à la rigidité des fils et à la fragilité des traces des circuits, faisaient converger beaucoup de risques sur cet élément. Ils ont donc constitué l'élément central du nouveau design de cette étude. Les circuits faits à la main ont été remplacés par des circuits imprimés et le design électro-mécanique a été complètement modifié pour s'intégrer à la structure, diminuer le bruit dans les traces sur ces plaquettes et ajouter de nouvelles capacités au système (FIG. 3.6(b)). En effet, pour le concentrateur servant à alimenter le réseau, le schéma a été révisé afin de permettre la surveillance du niveau des batteries alimentant la logique. De plus, tous les concentrateurs des coins ont été munis de contrôleurs de DEL RGB qui constituent des indicateurs d'état du robot pour la collaboration avec des comédiens. Il est possible de manipuler la fréquence de scintillement et la couleur des LEDs directement du programme principal, ce qui pourra servir à identifier les robots dans un contexte de collaboration multi-robots. Chacun de ces circuits a maintenant sa propre adresse, ce qui permet de trouver plus rapidement la source d'un problème de communication sur le bus. Les nouveaux schémas électroniques sont annexés au mémoire A.1.1-A.2.

Deux design pour les concentrateurs ont été développés, chacun avec un potentiel différent. Le premier, dit à régulation centralisée, possède deux circuits d'alimentation, permettant de réguler la tension sur tout le réseau logique. Empiriquement une tension de 5.5v permet de maintenir sur 9 mètres de câbles (FIG. 3.4(a)) une tension toujours supérieure à 5V.

Le deuxième, dit à régulation distribuée, contrôle la sortie en voltage à chaque

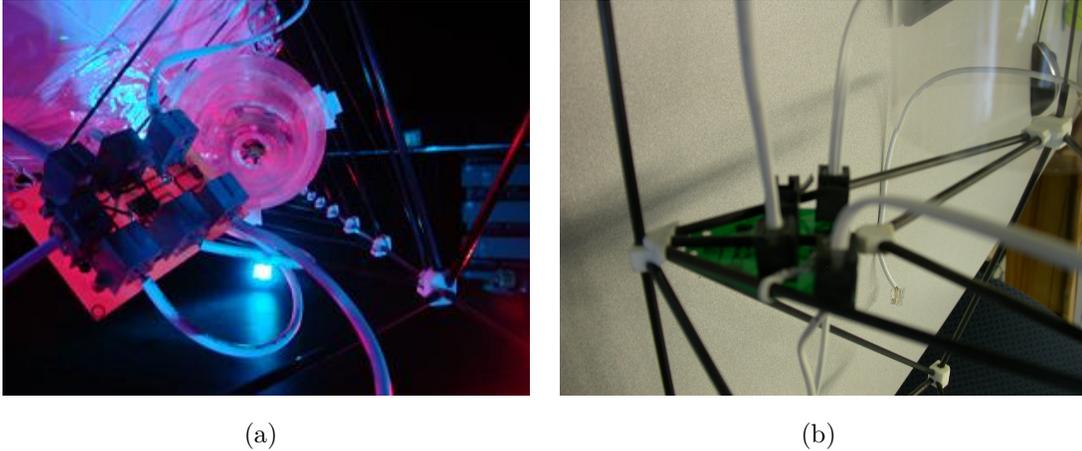


FIGURE 3.6 – a- Ancien circuit - flottant, b- Nouveau circuit solidaire à la structure.

concentrateur. Ce faisant le voltage transporté dans les câbles est toujours maximal et minimise les pertes énergétiques. Si les spécifications électriques des différents capteurs permettent de déduire qu'un régulateur de 0.5A est suffisant sur chaque concentrateur, les expérimentations ont montré que ces régulateurs devront être remplacés par d'autres d'une capacité de 1A, voire de 2A pour celui qui reçoit l'ordinateur de bord.

Un robot a été équipé avec chaque solution. Tel qu'indiqué à la figure 3.4(a) deux batteries alimentent la logique, en régulation centralisée. Cela implique la régulation en deux points du même circuit à la main (ajustement des résistances variables des diviseurs de tension) et la consommation s'avère n'être jamais égale. Si ce problème ne se pose pas dans le cas de régulation distribuée, des erreurs de communications sur le bus surviennent à l'occasion lors de période de haute consommation. Les causes de ce problème n'ont pas encore été diagnostiquées; il est probable que les résistances maintenant les lignes de communication du bus soient mal adaptées à ces différences de voltage.

3.3.3 Contrôleurs de vitesse électronique

Les ESC (Electronic Speed Controller) permettent de gérer les différences de phases nécessaires au fonctionnement de moteurs électriques sans balai.

Les contrôleurs électroniques utilisés en début de projet pour contrôler la vitesse

des moteurs sans balai en vitesse étaient développés par une firme tchèque pour une communication RS232 sur mesure permettant des relevés de températures, de vitesse en temps réel et de consommation de la batterie. Par contre, ils se sont avérés peu fiables et le type de communication demandait une interface interprétant les commandes du bus I2C. Qui plus est, le logiciel des micro-contrôleurs de ces circuits était fermé et il était impossible d'y avoir accès pour le modifier ou pour mieux saisir son fonctionnement.

Il a donc été décidé de créer des ESC spécifiques pour le projet. Il n'a pas été nécessaire de repartir de zéro, puisqu'une compagnie Allemande, MikroKopterTM, produit des ESC donc le code et le schéma sont publics et qui sont déjà adaptés à une communication I2C. Suite à des tests sur nos moteurs pour s'assurer qu'ils ne surchauffaient ni ne bloquaient avec ces ESC, un robot complet a été équipé et le programme embarqué a été modifié de sorte qu'il permette de satisfaire aux besoins du projet :

1. En plus de la commande de vitesse, une commande séparée permet de sélectionner le sens de rotation.
2. Une communication bilatérale permet l'envoi des données des capteurs de l'ESC en température, voltage, ampérage et vitesse de rotation courante.
3. En cas de rupture de la communication entre l'ordinateur de bord et le moteur, celui-ci s'arrête automatiquement par sécurité au bout de 5 secondes, sans réception de commande I2C.
4. La lecture du voltage se fait de manière analogique, et le résultat est représenté sur un octet p dans le processeur de manière non-linéaire. Une relation linéaire approximative calculée sur des données empiriques a été programmée dans les contrôleurs de sorte que l'envoi à l'ordinateur principal soit l'équivalent en volts :

$$E = 21.33p - 3.33.$$

L'architecture développée est présentée à la FIG. 3.7.

Une nouvelle branche a été créée sur le site de développement de MikroKopter pour partager les modifications faites pour ce projet. Chaque batterie alimente deux moteurs (FIG. 3.4(b)). Deux problèmes liés à ce design sont ressortis lors des premiers essais. Le premier concerne la lecture de voltage faite sur les ESC. Celle-ci est très relative à la puissance utilisée et donc, lorsque, de deux moteurs sur la même batterie, un seul tire beaucoup de puissance, la lecture du voltage du second est complètement erronée. Cela est géré dans le programme principal : la valeur de tension de la batterie du moteur tirant le plus d'énergie écrase celle de l'autre ESC. Le second problème se situe au

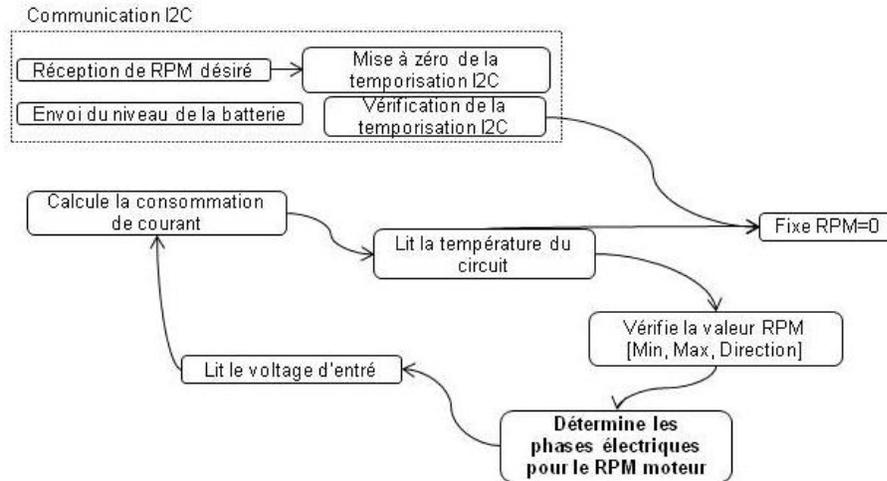


FIGURE 3.7 – Architecture du programme de gestion distribuée des moteurs (ESC)

niveau du démarrage. Lorsque les ESC démarrent ils envoient un signal permettant de faire "sonner" le moteur. Cette opération demande un pic d'ampérage très élevé et la batterie n'arrive pas à fournir ce pic pour deux moteurs en même temps. Un délai de démarrage a donc été introduit pour tout les moteurs horizontaux (qui sont appariés avec les verticaux au niveau des batteries), ce qui les autorise à démarrer seulement après leur alter-ego.

3.4 Batteries

Les batteries utilisées sur l'aérobot sont des LiPo de 2400MAh qui peuvent dégager jusqu'à 30A avec un voltage de 8.4V. Il est essentiel de les manipuler avec grand soin car un mauvais branchement peut détruire des composantes, et un court-circuit peut même les faire exploser ! Malgré l'utilisation de connecteurs polarisés afin d'assurer un branchement adéquat, des incidents sont survenus par le passé : batteries se décrochant et tombant au sol ; batteries branchées en court-circuit avec elles-mêmes par des employés... Les batteries dans la configuration à huit moteurs (ne contrôlant que 4 DDL) étaient positionnées directement à côté des moteurs. Par contre, dans la configuration pour les 6 DDL les batteries doivent être positionnées dans les coins de la structure (section 2.4.1). Les fils de puissances permettant la conduction électrique des coins aux

moteurs sont du même type que ceux pour du réseau I2C discutés précédemment, mais dans un équivalent 18AWG plutôt 24AWG.



FIGURE 3.8 – a- Batterie LiPo avec connecteurs originaux, b- Batterie avec connecteurs modifiés

Afin de pallier les inconvénients des derniers types de connexion et de fixation des batteries, la méthode de branchement est révisée de sorte que :

- les batteries soient fixées solidement et invariablement à la structure pour éviter des chutes ;
- s’assurer qu’un détrompeur soit prévu pour garantir un branchement correct ;
- permettre que le branchement soit rapide et de manipulation simple.

La FIG. 3.8(b) montre les modifications des connecteurs de batteries. En utilisant des plaques de cuivre pour le contact, aucun branchement n’est nécessaire, et il n’y a donc aucun risque d’abîmer des fils ou de forcer la structure lors d’une connexion difficile. De plus, le positionnement des contacts à 90° agit comme détrompeur tout en évitant les courts-circuits lors de l’entreposage.

Un boîtier fixé solidement sur la structure, dans lequel s’insère la batterie (FIG. 3.9(b)), assure le détrompage, et une fixation fiable des batteries sur les cubes. Produit aussi en stéréolithographie, il a été conçu afin de permettre un contact robuste pour les trois différents modèles de batteries généralement utilisées (qui ont les mêmes dimensions à quelques millimètres près). Des contacts métalliques du boîtier sont reliés à une paire de connecteurs. L’ensemble des pièces conduisant le courant est couvert d’époxy



(a)



(b)

FIGURE 3.9 – a- Batterie modifiée dans son boîtier, b- Boîtier de batterie installé dans un coin du cube

pour éviter tout court-circuit.

Dans ce troisième chapitre, les pièces maîtresses de la mécanique des cubes volants ont été analysées afin d'en déterminer les failles éventuelles. Pour la plupart, de nouveaux design ont été produits et testés ; pour les autres des pistes de solutions ont été discutées. Étant donné le marché très dynamique du domaine des avions télécommandés amateurs, cette étude a avantage à être reprise régulièrement pour évaluer les nouveaux produits disponibles. Le prochain chapitre discutera du contrôle, et donc des capteurs sélectionnés pour cette tâche.

Chapitre 4

Perception et commande

Les capteurs permettent aux robots d'obtenir de diverses sources des informations sur leur environnement afin, éventuellement, de fonctionner de manière autonome. Ils leur permettent aussi, dans le cadre de ce projet, d'interagir avec des comédiens et des visiteurs au moyen de canaux de communications variés. À partir des lectures discutées au premier chapitre, une sélection de capteurs a été faite : accéléromètre, boussole, altimètre et caméra. Une courte description et des tests de calibration sont présentés pour chacun ; puis une commande par PIDs spécialisés est décrit.

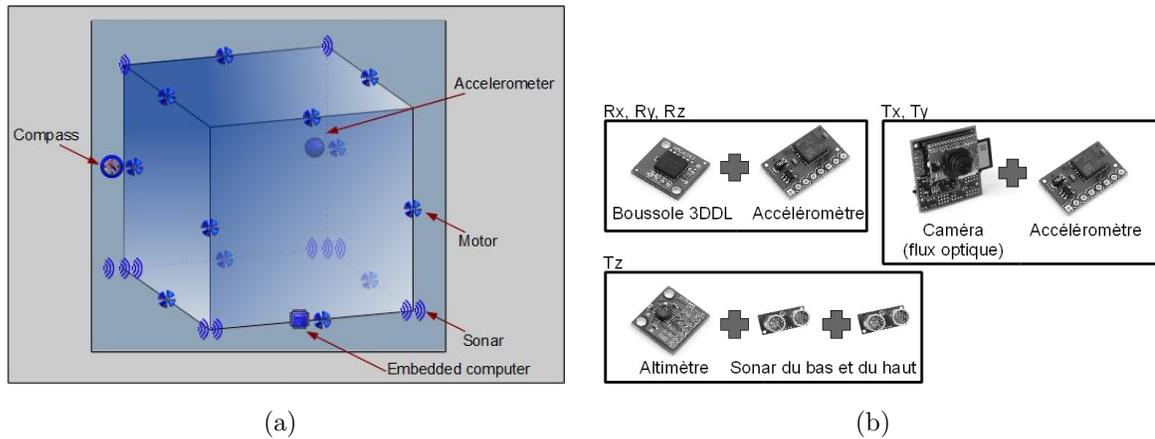


FIGURE 4.1 – a- Équipement embarqué - configuration de base, b- Répartition des capteurs selon l'information fournie

4.1 Sélection des capteurs

Plusieurs types de capteurs différents ont été installés sur les aérobots dans les dernières années, chacun d'eux dans un objectif précis. Avant cette étude, une boussole, 12 sonars et 8 détecteurs de luminosité étaient installés. Comme il a été discuté à la section 2.4.1, un des sous-objectifs permettant d'augmenter la robustesse du système est de considérer le contrôle des 6 degrés de liberté. En ce sens, un accéléromètre a été ajouté afin d'obtenir de l'information sur l'angle de gîte et sur l'assiette longitudinale ; il est jumelé à une nouvelle boussole 3 axes. Les données de l'accéléromètre sont aussi intégrées afin de connaître la translation en X et en Y . À cette fin, diverses méthodes numériques ont été tentées et leur résultats sont présentés. Ces méthodes se sont avérées insuffisantes ; afin d'améliorer la connaissance des translations en X et en Y , une caméra est ajoutée pour calculer le flux optique du plan (sol) sous le robot. Pour cette solution, plusieurs options ont aussi été testées et sont présentées. La configuration de base standard à la fin de ces recherches est présentée à la FIG. 4.1(a) et la participation de chaque capteur dans la structure de données pour les 6 degrés de liberté à la FIG. 4.1(b).

4.1.1 Sonars

Les capteurs à ultrasons ont été dès le début du projet [VOILES| SAILS]. Le modèle utilisé (FIG. 4.2) consiste en un émetteur séparé du récepteur, alimenté en 5V et communiquant par I2C.



FIGURE 4.2 – a- Modèle SRF08, b- Nouveau modèle d'attache en SLS

Leurs grande imprécision de mesure et la limite physique de leur capacité sont très contraignants, aussi l'objectif de la nouvelle configuration de capteurs considérée dans la présente étude est d'arriver à ne les utiliser que pour la détection de collisions et pour des interactions spécifiques avec les comédiens.

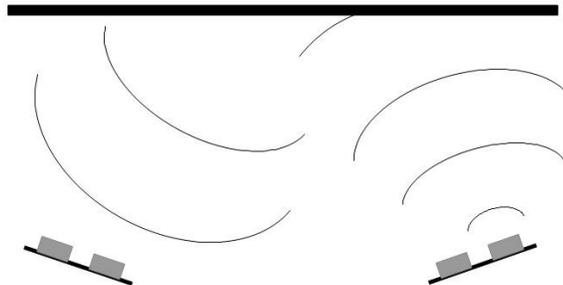


FIGURE 4.3 – Exemple d'erreur de lecture due à l'orientation des capteurs (réflexion du signal sur un mur).

Les sonars IF permettent une détection théorique jusqu'à 6 m selon un angle d'ouverture de 60° . Aucun test n'a été fait sur ces capteurs déjà bien intégrés aux robots, mais leur erreur pourrait être modélisée afin d'améliorer la fiabilité des lectures, comme le mentionnent Muller et al. [39]. Dans le cas des Tryphons, une erreur de mesure par-

ticulière provenait à l'occasion de l'orientation des capteurs sur l'exosquelette (FIG. 4.3). Ainsi leur support de fixation à été revu de sorte qu'il permette une orientation plus simple et plus robuste aux chocs. Lui aussi réalisé par prototypage rapide, selon la méthode SLS, il est vissé sur le circuit du capteur et se « clippe » sur une tige de la structure. Le « clip » peut aussi être serré avec plus de force au moyen d'une vis de nylon.

Ce modèle de sonar est également équipé d'un détecteur de luminosité qui a déjà été utilisé à l'occasion de performances artistiques. Dans des travaux futurs, ayant la position du robot à partir d'un point de départ (navigation à l'estime), il sera possible de créer une carte de l'espace d'évolution du robot, autant sur le plan géométrique (obstacles - REF. [39]) que sur le plan lumineux.

4.1.2 Boussole

La boussole est un capteur utilisé depuis plusieurs années sur les Tryphons (FIG. 4.4(a)). Malgré sa sensibilité aux structures mécaniques métalliques de l'environnement, elle donne de bons résultats lorsque le bâtiment le permet, ou encore lorsque l'aérobot reste stable autour de son point de calibration. Elle possède aussi une interface I2C, une résolution supérieure à 0.1° et une erreur spécifiée par le fabricant d'environ 2° à 3° . Bien que cette solution soit opérationnelle, d'autres capteurs plus récents permettent

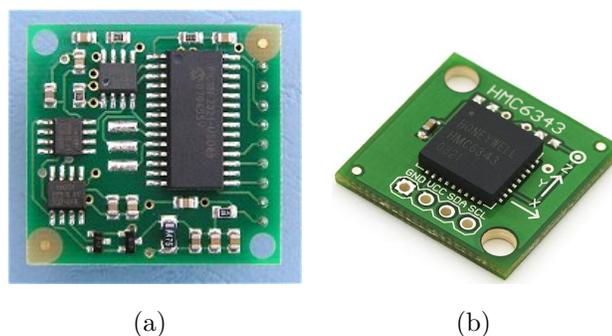


FIGURE 4.4 – a- Boussole 1DDL CMPS03, b- Boussole 3DDL HMC6343

de meilleures performances. Une nouvelle boussole installée lors de cette étude permet d'obtenir l'orientation selon les trois degrés de liberté grâce à un accéléromètre intégré. Elle est aussi équipée d'un algorithme de compensation des perturbations de champs électromagnétiques pour le magnétomètre, et d'un algorithme de compensation des

angles de gîte et d'assiette longitudinale sur la mesure magnétique. Cela contribue à fournir une erreur maximale de seulement 1° pour l'azimut et plus faible encore pour le gîte et l'assiette longitudinale.

L'accéléromètre trois axes permet de déterminer l'orientation du robot selon deux axes, grâce à l'orientation de la gravité lorsque le robot est au repos (accélérations nulles). L'idée est de déterminer quelle fraction de la gravité est contenue dans les mesures de chacun des axes et de calculer les angles que donnent ces rapports :

$$\theta = \arctan\left(\frac{A_x}{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}}\right), \phi = \arctan\left(\frac{A_y}{\sqrt{A_x^2 + A_z^2}}\right) \quad (4.1)$$

où les A_i sont les composantes de l'accélération selon chaque axe.

4.1.3 Altimètre

Un altimètre barométrique est utilisé afin d'aider à déterminer la hauteur Z absolue du robot. Le modèle choisi est déjà I2C, mais demande une alimentation de 2.5 V-3.3 V différente de celle transportée sur le bus (5 V). Sa résolution est d'environ 10 cm au-dessus du niveau de la mer, mais sa précision n'est pas spécifiée.



FIGURE 4.5 – Modèle SCP1000.

Pour des modèles technologiquement semblables, la précision garantie tourne autour de 0.5 mbar, ce qui représente, au niveau de la mer, environ 4 mètres. Malgré cette valeur peu encourageante le capteur a été testé au laboratoire et les résultats sont prometteurs.

Les performances du capteur ont été mises à l'épreuve par divers tests de manipulation en laboratoire. La figure 4.6 présente les résultats d'un test lors duquel le capteur

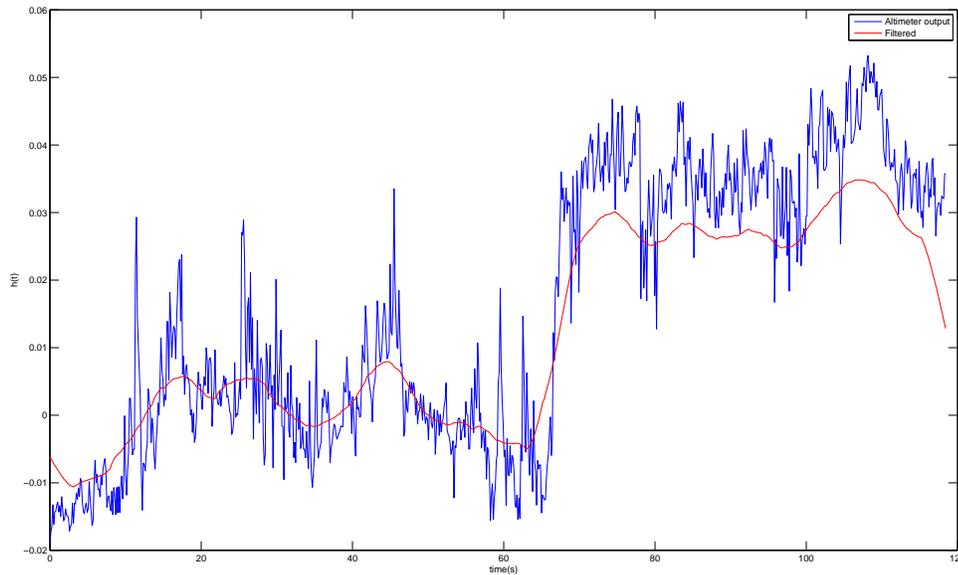


FIGURE 4.6 – Lecture de l’altimètre et résultat d’un filtre Gaussien.

est manuellement amené du niveau de calibration à une hauteur d’environ 1 mètre. De l’analyse de ce graphique on peut envisager que l’utilisation de l’altimètre dans un environnement contrôlé et stable soit possible. Ses données seules ne sont malgré tout pas suffisantes pour déterminer la hauteur absolue Z du robot. En étant jumelé aux sonars pointant vers le bas et vers le haut, il peut servir à estimer les variations de hauteur lorsque ces mêmes sonars dépassent la limite de leur portée.

4.1.4 Accéléromètre

Un accéléromètre à 3 axes est utilisé afin d’aider à déterminer les translations du robot dans une navigation à l’estime et de fournir une autre source d’information complémentaire sur l’orientation du robot (section 4.1.2).

Le modèle de capteur embarqué pour le moment est un LIS3LV02DQ, qui disparaît malheureusement progressivement du marché. Un bon remplaçant potentiel pourrait être le SCA3000. Les deux permettent une communication I2C directe et sont réglables pour une étendue de mesures de 0 à 2 g. Ils sont calibrés pour un voltage d’entrée de 2.5 V-3 V plutôt que le 5 V disponible sur le bus du robot ; un diviseur de tension ou

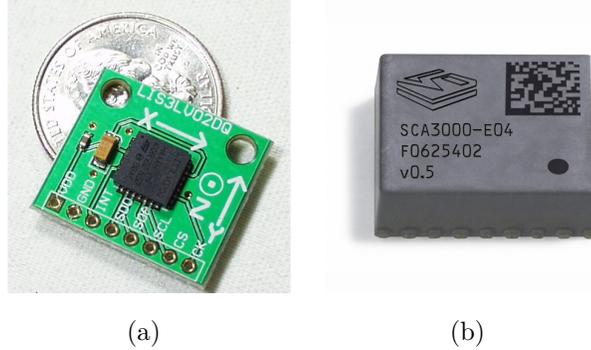


FIGURE 4.7 – a- Modèle LIS3L, b- Modèle SCA3000

un régulateur linéaire doivent donc être ajoutés, tout comme pour l'altimètre.

L'accéléromètre est orienté de façon à suivre le référentiel local du robot, mais il ne peut pas être positionné à son origine (FIG. 4.8). Cela n'a pas d'impact sur les données d'orientation, puisque le robot est considéré comme un corps rigide et que donc l'orientation de tout point du robot est la même que celle de l'origine. Si les lectures de l'accéléromètre peuvent servir à déterminer l'orientation du robot grâce à la gravité, cette composante doit donc être soustraite afin d'obtenir les accélérations réelles du robot.

En fixant le capteur à une table, les lectures permettent d'évaluer le bruit statique en fréquences (FIG. 4.1.4). L'analyse fréquentielle montre des pics pour les axes X et Z près de 1.5 Hz ainsi qu'à de très basses fréquence. Un filtre passe-haut pourrait aider à solutionner ce problème de bruit, mais il éliminerait du même coup la composante de l'accélération gravitationnelle et ainsi empêcherait d'utiliser le capteur comme inclinomètre.

Ensuite différents tests sont réalisés afin de déterminer la meilleur méthode d'approximation de la trajectoire basée sur l'intégration de l'accélération. La première approche considérée consiste à évaluer la vitesse et la position au moyen des équations générales de mouvement uniformément accéléré :

$$v_i = v_{i-1} + a_{i-1}\delta t \quad (4.2)$$

$$p_i = p_{i-1} + v_{i-1}\delta t + \frac{a_{i-1}\delta t^2}{2} \quad (4.3)$$

où v_i est la vitesse au temps i , a_i l'accélération et p_i la position.

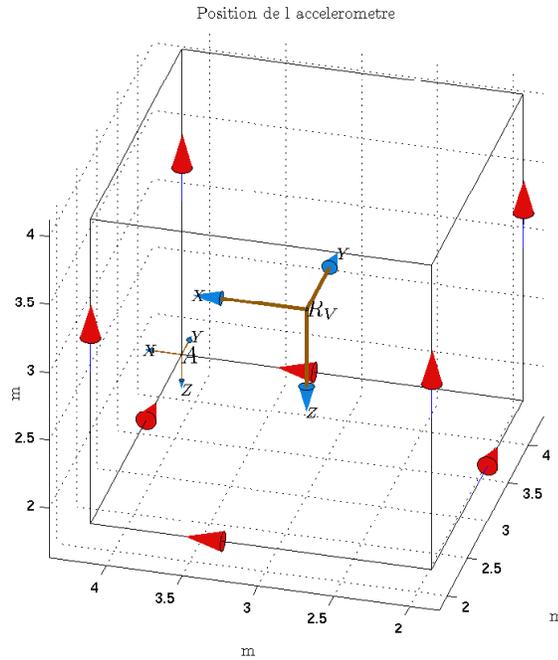


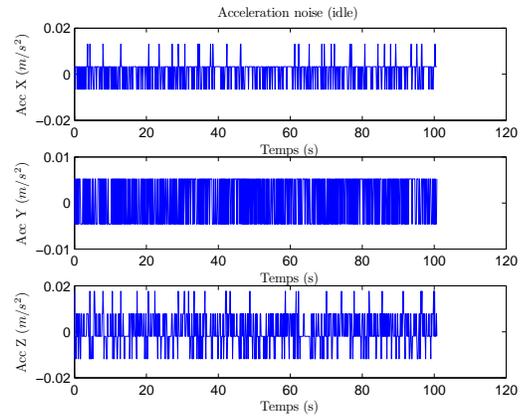
FIGURE 4.8 – Position et orientation de l’accéléromètre.

En collaboration avec Martin J.-D. Otis¹ d’autres méthodes d’intégration numérique ont été testées afin de comparer la précision des résultats. Des dizaines de combinaisons de méthodes d’intégration sont comparées : trapèze, Simpson, filtre gaussien, filtre FIR, etc. Au final la meilleure solution consiste à créer une boucle de correction de l’erreur avec un PID ajusté permettant de converger vers une minimisation de l’erreur (FIG. 4.10).

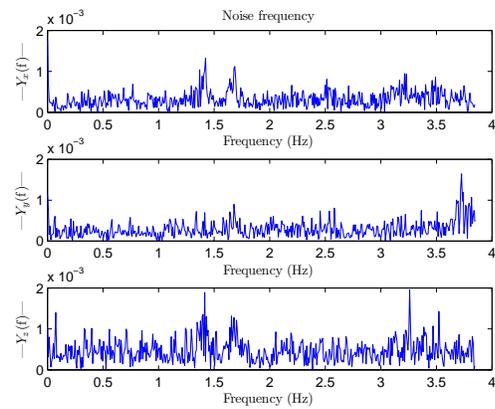
Lors de tests sur un actionneur linéaire en laboratoire, des trajectoires d’aller-retour sur une distance connue de 50 cm ont été réalisées à différentes vitesses. La FIG. 4.11 montre l’un de ces résultats dont la trajectoire réelle est en noir. Des graphiques d’accélération de la première ligne, on remarque des pics dans les valeurs d’accélération en X et en Y . Ces données aberrantes sont dues à des chocs des actionneurs au départ et à l’arrêt et sont retirés avant dérivation. Aucune des deux méthodes de dérivation discutées ne converge vers la trajectoire réelle.

La principale source de dérive dans les données de l’accéléromètre provient d’un biais aléatoire sur les données. L’objectif est donc de déterminer, d’après les informations

¹. Alors post-doctorant à l’Université McGill, maintenant professeur à l’Université de Chicoutimi ; au cours de communications personnelles.



(a)



(b)

FIGURE 4.9 – Bruit de l'accéléromètre : a- Brut, b- Domaine fréquentiel

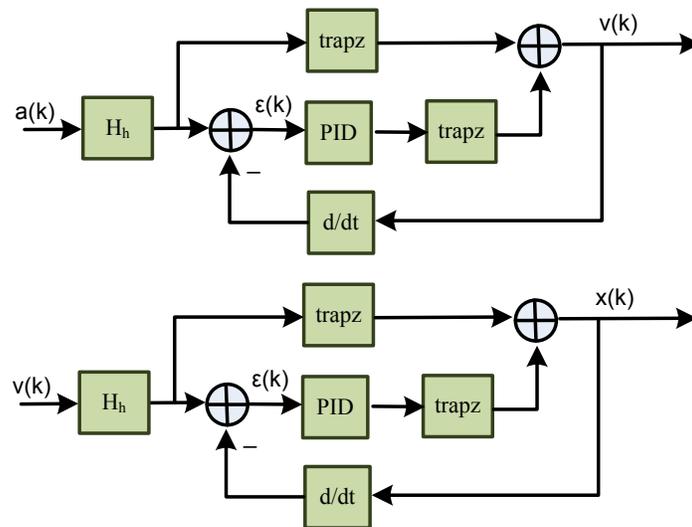


FIGURE 4.10 – Boucle de correction de l'intégration

dont dispose le robot sur sa trajectoire, un biais initial idéal. Par exemple, lors d'un test effectué sur des trajectoires d'aller-retour, en imposant une position finale égale à la position initiale, la valeur de décalage obtenue donne de très bons résultats sur l'allure de la trajectoire. Toutefois, cette approche ne peut être utilisée en fonctionnement continu car de telles informations sur la position finale réelle ne seront généralement pas connues. Il est envisageable d'utiliser une approche probabiliste basée sur les informations de la commande et des autres capteurs, mais cela ne sera pas couvert dans la présente étude.

Puisque la majorité des accéléromètres sont utilisés en combinaison avec d'autres types de capteurs (tel qu'un GPS), les données combinées sont généralement traités en simultané dans un filtre de Kalman. Cette solution permet de modéliser la cinématique du robot et de filtrer en accordant une mesure de confiance aux lectures par rapport au modèle. Les résultats obtenus dans le second graphique de la figure 4.12 sont beaucoup plus près de la trajectoire réelle. En combinant cette information avec celle d'un autre type sur ces translation, la dérivation sera encore améliorée.

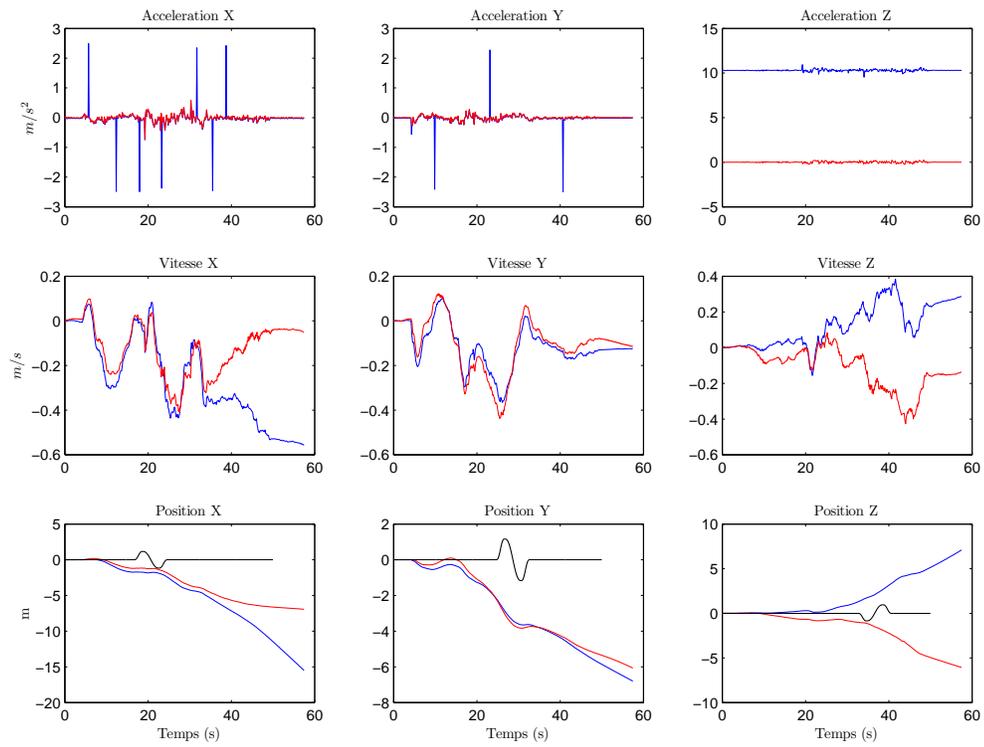


FIGURE 4.11 – Intégration des accélérations

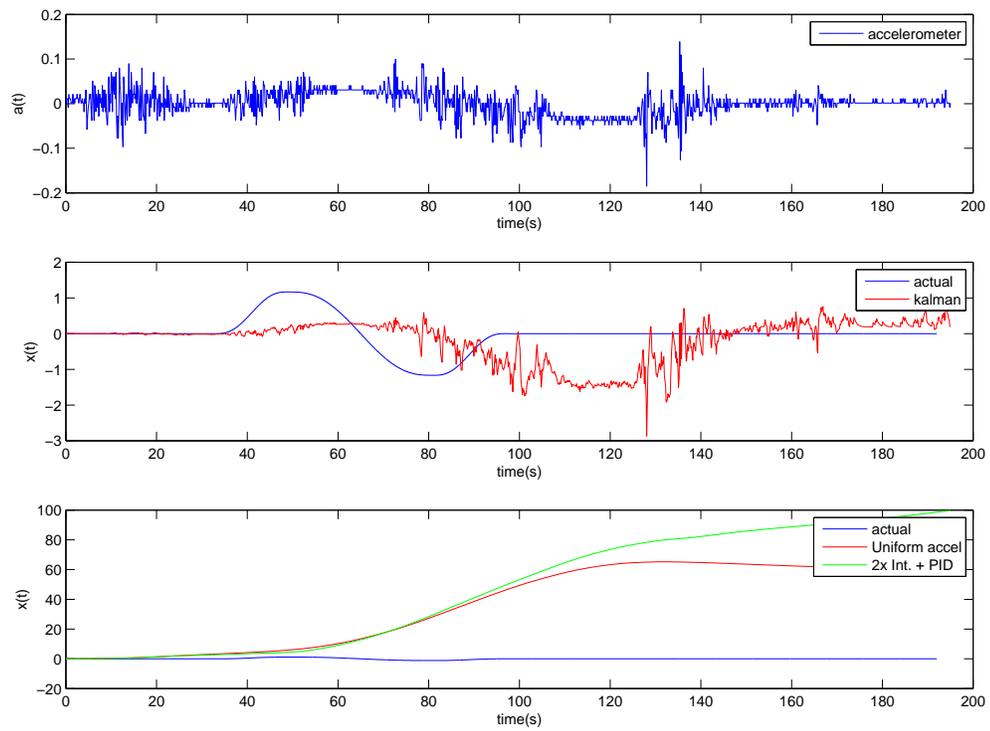


FIGURE 4.12 – Filtre de Kalman comparé aux autres résultats.

4.1.5 Caméra

À la section 1.3.3 il a été discuté du potentiel des systèmes de vision, qui évoluent rapidement en robotique mobile. La majorité des projets de vision par ordinateur demandent beaucoup de ressources de calcul, et les solutions complètement embarquées sont limitées. Une application de la vision a toutefois déjà fait ses preuves sur des plateformes volantes : le flux optique.

La première caméra testée est une CMOS vendue en plateforme de déploiement avec un processeur ARM et une librairie de sources libres de droits (cmucam.org). Elle ne sera finalement pas installée sur le robot à cause de sa puissance de calcul limitée, mais elle servira à démontrer la faisabilité de l'algorithme de vision développé.

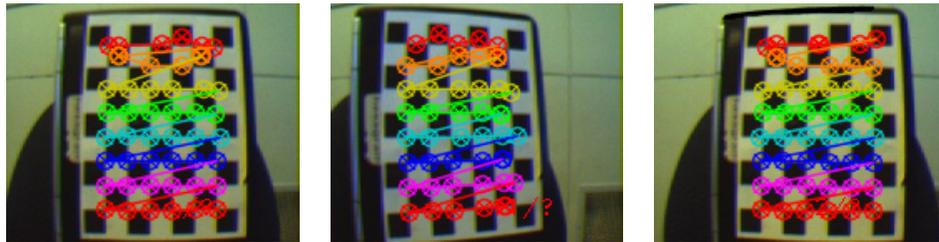


FIGURE 4.13 – Damier de calibration.

Afin de calculer des grandeurs réelles à partir des images de la caméra, la matrice des paramètres internes a d'abord été évaluée. Cela a été réalisé au moyen d'une routine utilisant la librairie OpenCV afin de chercher les points saillants d'un damier (calibration par plans). Les performances de cette librairie ont déjà été mises à l'épreuve et la figure 4.13 montre que la caméra est suffisamment précise (et le damier suffisamment gros) pour permettre ce type de calibration. La matrice des paramètres internes obtenue pour une résolution de 176×143 pixels se présente ainsi :

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 236,72 & 1 & 87,26 \\ 0 & 262,2 & 70,4 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Le processeur de la CMUCAMTM est muni d'une mémoire vive de 64kb et considérant que le flux optique demande de conserver quelques images pour la différentiation temporelle, celles-ci doivent être de basse résolution (88x71). Qui plus est le RGB n'est

pas nécessaire, un seul canal monochrome est suffisant. Toutefois la lecture du CMOS par défaut ne prend qu'un seul des trois canaux pour le monochrome (le rouge). Le module a été modifié afin de considérer la moyenne des sous-pixels (RGBG), ce qui diminue grandement le bruit de l'image (FIG. 4.14(b)). Cette qualité d'image sans traitement peut atteindre un taux de 50 ips.

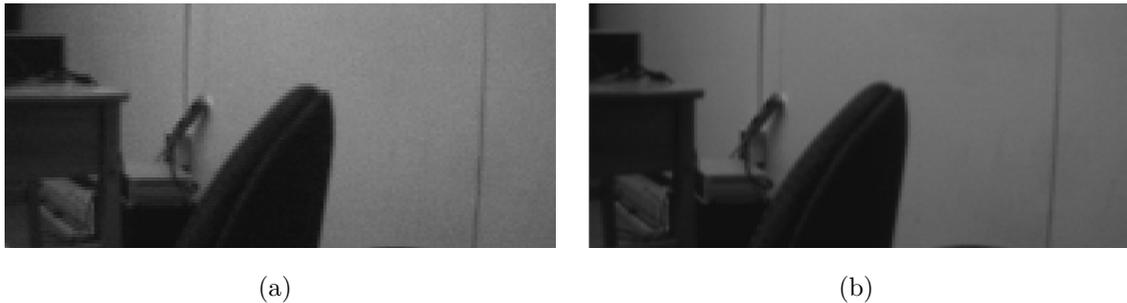


FIGURE 4.14 – a- Un seul canal, b- Moyenne des sous-pixels

Plusieurs possibilités se présentent avec l'utilisation d'une caméra embarquée. Dans le cadre de cette recherche, deux éléments majeurs contraignent le choix de la solution : le temps disponible pour cet aspect du développement est restreint et l'utilisation de marqueurs externes n'est pas souhaitable. Cette dernière contrainte s'explique par la volonté de conserver un maximum de robustesse dans la calibration et l'installation du système, afin de ne pas dépendre pour cette étape d'une mise en scène particulière.

La solution développée consiste à pointer la caméra utilisée vers le sol sous l'aérobot afin d'évaluer deux de ses translations et une rotation à partir des vitesses du flux optique observé. Les hypothèses suivantes sont posées :

- Intensité constante de la scène, ce qui permet de déduire le flux optique des gradients spatio-temporels :

$$\nabla \mathbf{v} + I_t = 0 \quad (4.5)$$

où le gradient représente les dérivées spatiales (x, y) de l'image selon le type de noyau choisi.

- Scène plane, ce qui permet de poser des contraintes géométriques aux vitesses :

$$\mathbf{v} = \{ax + by + c + gx^2 + hxy, dx + ey + f + iy^2 + jxy\} \quad (4.6)$$

Où $\{x, y\}$ sont les coordonnées dans l'image et $\{a, b, c, d, e, f, g, h, i, j\}$ sont des coefficients à déterminer. Toutefois les termes du second ordre se sont toujours avérés être négligeables dans les tests effectués dans cette application.

Il en résulte un système d'équations linéaires demandant un minimum de 6 pixels aux gradients linéairement indépendants (I_x, I_y, I_t) afin d'être résolu. Afin de diminuer le bruit des dérivées, des filtres gaussiens à huit voisins sont appliqués sur chaque dimension indépendamment.

Un prototype MatLab a été réalisé afin de valider le concept. Une fois le système d'équations sur-déterminé résolu par une pseudo-inverse (SVD), le flux optique pour chaque pixel est calculé à partir des vitesses du plan trouvées. Ceci génère un champ de vitesses permettant de comparer les résultats à ceux obtenus avec une méthode Horn-Schunck (H-S) classique.

Le modèle a d'abord été testé avec des séries d'images provenant de banques classiques pour les algorithmes de flux optique. Les résultats en translation (FIG. 4.15) et en rotation (FIG. 4.16) ont montré une bonne robustesse du modèle aux différences de profondeur et texture. En effet l'hypothèse du plan effectuée en quelque sorte une moyenne sur tout le mouvement devant la caméra.

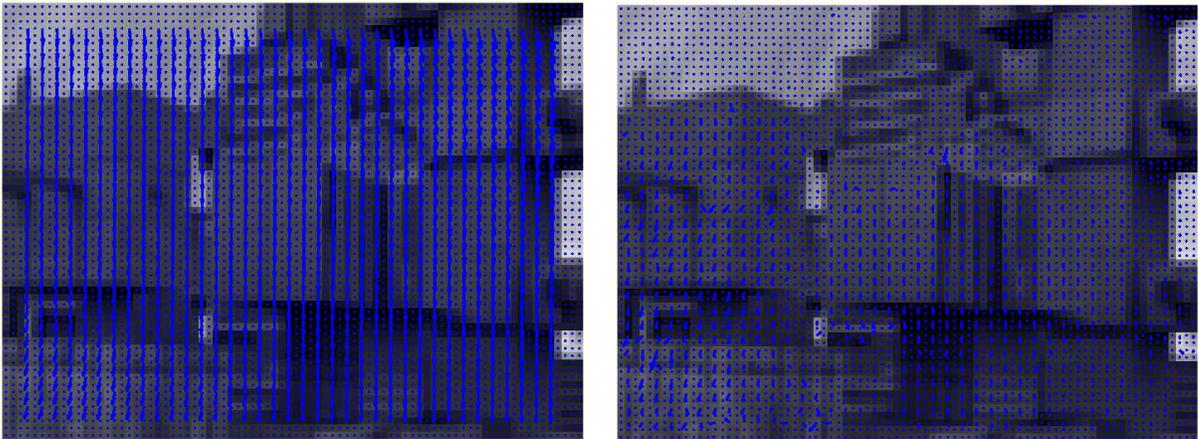


FIGURE 4.15 – Flux optique - Translation (sim)

Utilisant un actionneur linéaire, un banc d'essai a ensuite permis de tester le système en translation. Le contrôle par RT-Lab permet de connaître avec précision la vitesse de la caméra sur ce socle. Pour ces tests l'analyse des images est effectuée sur MatLab (hors-ligne) et les images doivent donc être enregistrées sur une carte flash, ce qui diminue considérablement la rapidité de la prise de photos. C'est pourquoi les tests ont été effectués à de faibles vitesses (50 mm/s) assurant un mouvement faible à 5 ips.

Les résultats sont très encourageants. Connaissant la distance du mur et la distance

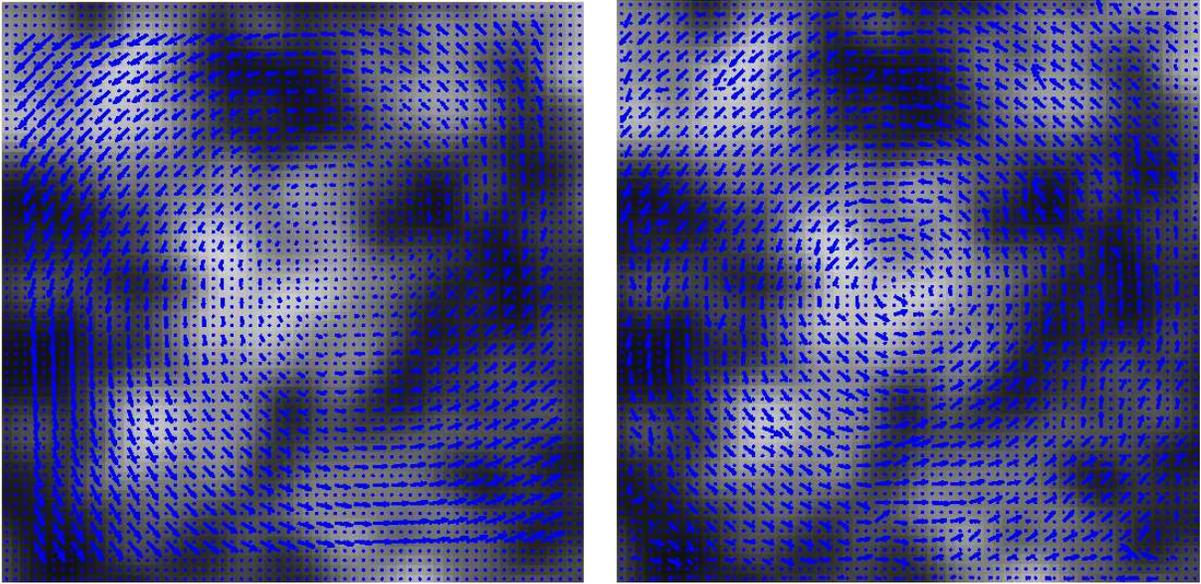


FIGURE 4.16 – Flux optique - Rotation (sim)

focale de la caméra, la vitesse de translation a été estimée à 57 mm/s. Qui plus est on remarque que comparé à une méthode plus locale d'analyse de l'image (H-S), le bruit est complètement lissé.

Il est à prévoir que certains problèmes surviendront avec les variations d'éclairage et de luminosité dans une salle de spectacle. Un filtre infrarouge pourrait être ajouté à l'objectif pour minimiser leur impacts.

L'étape suivante consiste à embarquer ce calcul sur le robot. Afin de réaliser le calcul sur le processeur de la CMUCAMTM, la fonction SVD de *Numerical Recipe* [55] a été utilisée. Toutefois, les calculs mathématiques à point flottant ne sont possibles que de manière logicielle à cause des capacités limitées du processeur. Cela ne permet la prise d'une image que toutes les 3 secondes. Ce taux de rafraîchissement étant beaucoup trop lent, le code a alors été adapté pour permettre l'inversion de la matrice d'image de dimension fixe par des opérations sur des entiers uniquement. Les résultats pour une image de 6×6 pixels ont démontré un taux de rafraîchissement de près de 20 images par seconde. Malheureusement, pour atteindre la taille minimale fonctionnelle, déterminée par des simulations sur `MatLab`, de 70×70 pixels, l'inversion matricielle perd beaucoup trop de précision en utilisant seulement des entiers et devient inutilisable.

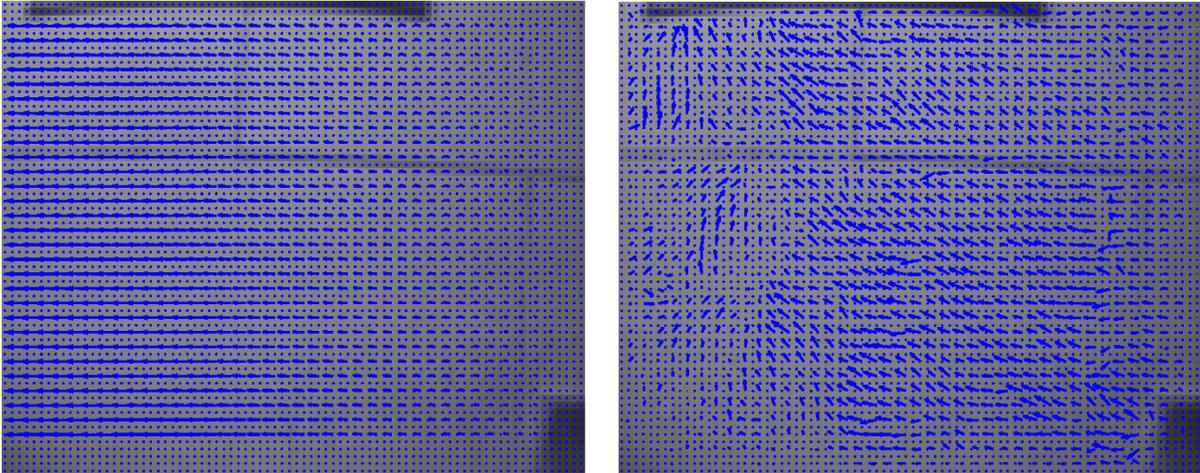


FIGURE 4.17 – Flux optique - Translation (réelle)

L'algorithme est maintenant adapté à une caméra pour GumstixTM 2. L'avantage de cette plateforme, en plus de proposer une caméra beaucoup plus précise et légère et de permettre de profiter de la puissance de calcul des processeurs OMAP, est que la communauté de développeur a déjà adapté la majorité de la librairie d'algorithmes la plus utilisée en vision, OpenCV, pour cette plateforme.

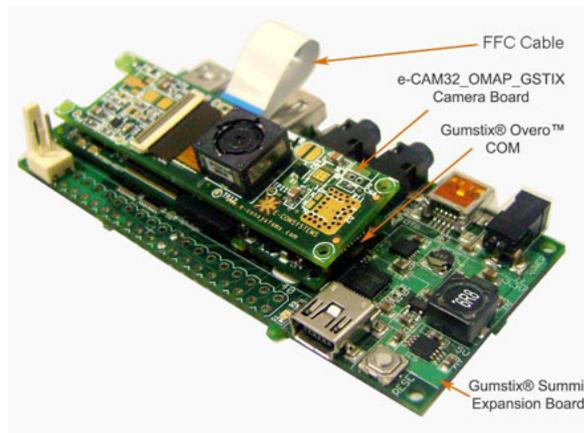


FIGURE 4.18 – Ordinateur sur plaquette (GumstixTM) et sa caméra

2. <http://www.gumstix.com/>, visité le 08/2011

4.2 Commande

Beaucoup de possibilités s'offrent en terme de commande dans le contexte de ce projet et chacune a ses avantages : SLAM, asservissement visuel ("visual servoing"), logique floue, apprentissage par EM, PID centralisé ou distribué, etc. Étant donné les contraintes de temps de la recherche, une seule a pour le moment été examinée : la commande par PID spécialisés avec traitement par filtre de Kalman. Un modèle Simulink communicant avec le robot de sorte à écraser le contrôle embarqué permet d'ajuster rapidement les gains de filtres et les PID (FIG. 4.19).

4.2.1 Filtre de Kalman

Le filtre de Kalman simple consiste à prédire à chaque pas de temps la valeur de l'état suivant puis à corriger cet estimé au moyen des mesures prises. Il permet donc toujours d'appliquer un filtre qui consiste à conserver les propriétés du système dynamique d'un état à l'autre. C'est un filtre récursif, c'est à dire qu'il n'utilise que l'état précédent pour estimer le suivant. Par exemple pour la translation en X , le filtre prend la forme suivante :

D'abord l'état (position, vitesse et accélération) est estimé en fonction de l'état précédent :

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = \mathbf{A}_k \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1} \quad (4.7)$$

Ensuite les matrices d'erreurs et de lectures sont mises à jours :

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{k|k-1} &= \mathbf{A}_k \mathbf{P}_{k-1|k-1} \mathbf{A}_k^T + \mathbf{Q}_k \\ \tilde{\mathbf{y}}_k &= \mathbf{y}_k - \mathbf{C}_k \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} \end{aligned} \quad (4.8)$$

La matrice des gains de Kalman (\mathbf{S}_k n'est qu'une matrice temporaire) :

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_k &= \mathbf{C}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{C}_k^T + \mathbf{R}_k \\ \mathbf{K}_k &= \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{C}_k^T \mathbf{S}_k^{-1} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Finalement, le calcul de l'état actuel s'effectue selon le modèle, les états précédents et les lectures :

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{x}}_{k|k} &= \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k \tilde{\mathbf{y}}_k \\ \mathbf{P}_{k|k} &= (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_{k|k-1}\end{aligned}\tag{4.10}$$

où le vecteur des états du système (voir $\hat{\mathbf{x}}$ de l'équation 4.15) est défini tel que :

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & dt & \frac{dt^2}{2} \\ 0 & 1 & dt \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

La matrice des observations (voir \mathbf{y} ÉQ. 4.15) :

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\tag{4.11}$$

La matrice de covariance du modèle discret, tiré de [56] :

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \frac{T_s^5}{20} & \frac{T_s^4}{8} & \frac{T_s^3}{6} \\ \frac{T_s^4}{8} & \frac{T_s^3}{3} & \frac{T_s^2}{2} \\ \frac{T_s^3}{6} & \frac{T_s^2}{2} & T_s \end{bmatrix}\tag{4.12}$$

La matrice de covariance du modèle des mesures ne contenant que les écarts type des capteurs déterminés empiriquement :

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.005 & 0 \\ 0 & 0 & 0.026^2 \end{bmatrix}\tag{4.13}$$

Et la matrice \mathbf{P}_k est initialisée avec :

$$\mathbf{P}_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\tag{4.14}$$

et avec :

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}} &= \left\{ \begin{array}{l} \text{Position X} \\ \text{Vitesse X} \\ \text{Accélération X} \end{array} \right\} \\ \mathbf{y} &= \left\{ \begin{array}{l} \text{Vitesse estimée du flux optique} \\ \text{Accélération ré-orientée de l'accéléromètre} \end{array} \right\} \end{aligned} \quad (4.15)$$

Les équations sont les mêmes pour la translation en Y . Par contre en Z les matrices \mathbf{C} et \mathbf{y} deviennent :

$$\begin{aligned} \mathbf{C} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{y} &= \left\{ \begin{array}{l} \text{Altitude selon les sonars} \\ \text{Altitude selon l'altimètre} \\ \text{Accélération ré-orientée de l'accéléromètre} \end{array} \right\} \end{aligned} \quad (4.16)$$

et pour les rotations :

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

4.2.2 PIDs spécialisés

Suivant les recommandations tirées de plusieurs projets similaires en commande, celui-ci a été divisé selon les quatre mouvements principaux du robot. En effet, à cause de la répartition des charges et de l'utilisation généralement stable des angles de gîte et d'assiette longitudinale, les translations selon X et Y peuvent relever du même contrôleur, de même que les rotations autour de ces axes.

Au moyen de la méthode développée par Thierry Laliberté³, le système physique est approximé par un système masse-ressort :

$$\begin{aligned} P &= (2\pi f)J \\ D &= 2z\sqrt{Jp} \end{aligned} \tag{4.18}$$

En fonction des valeurs d'inerties et de masses déterminées à la section 2.1.1 les valeurs du tableau 4.1 ont été obtenues.

Mouvement	K_P	K_I	K_D
T_{XY}	5.1	0	11.3
T_Z	5.1	0	11.3
R_{XY}	6.3	0	14.1
R_Z	6.3	0	14.1

TABLE 4.1 – Gains théoriques du PID distribué

Si ces valeurs ont prouvé leur efficacité en simulation, elles sont trop élevées pour le robot réel. En effet, les réaction fortes et rapides sont très coûteuses en énergie. L'utilisation de gains dix fois moins élevés sera plus appropriée.

³. Professionnel de recherche au laboratoire de robotique de l'Université Laval; communications personnelles.

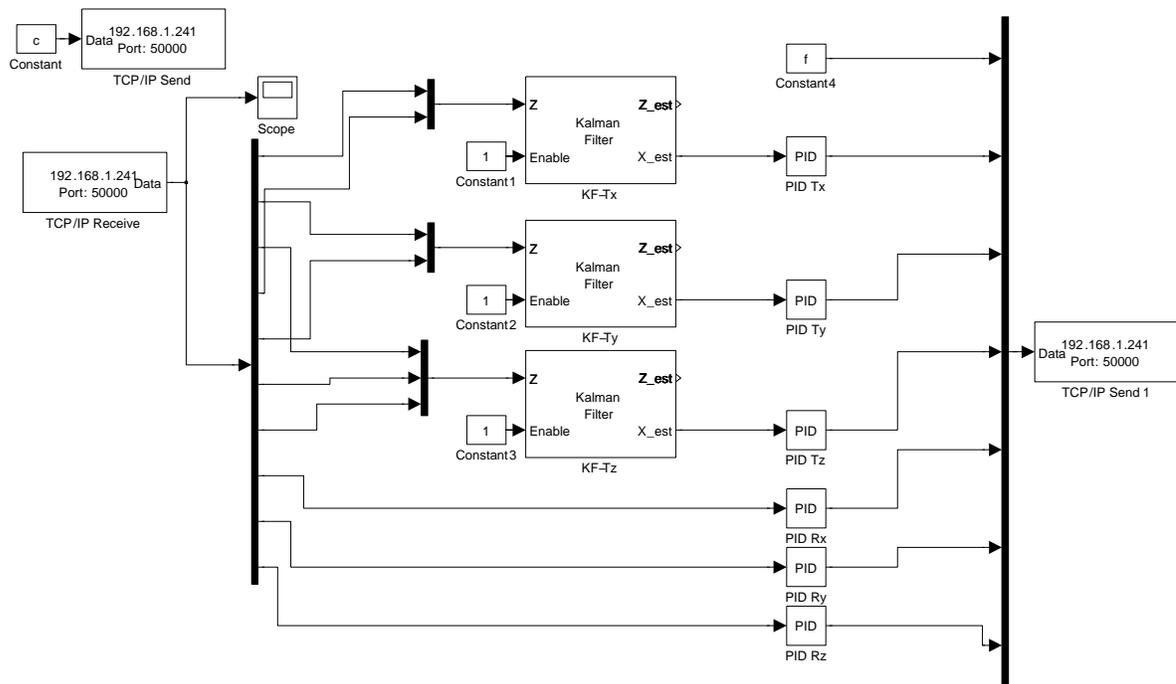


FIGURE 4.19 – Modèle Simulink avec filtres et PID distribués

Chapitre 5

Applications

Le développement des prototypes du projet [VOILES| SAILS] et l'amélioration de notre connaissance sur ces robots a le potentiel de mener à plusieurs avancés dans une large gamme de domaines. Les Tryphons proposent une plateforme d'expérimentation en robotique, en cybernétique, en intelligence en essaim, en dynamique du vol, tout en demeurant fortement liés au monde artistique qui les a vu naître, particulièrement en terme d'applications multimédias et dans le cadre de performances théâtrales.

5.1 Technologie des aérostats

Tel que résumé précédemment (section 1.1.1), les dirigeables ont été le sujet d'un regain de popularité en recherche dans les dernières années, principalement à cause

de leur haut ratio de charge utile disponible par rapport à leur poids, à leur grande autonomie et à leur consommation énergétique faible, attribuable à leur équilibre aérostatique. De surcroît, la géométrie cubique des aérostats de ce projet permet un contrôle facilité et une utilisation complète des six degrés de libertés. Cette géométrie implique intrinsèquement un contrôle découplé des trois translations X , Y et Z , ce qui lui donne un net avantage sur les formes classiques d'aérostats.

Des robots volants conçus pour évoluer à l'intérieur, étant équipés de caméras et de détecteurs thermiques, peuvent servir à patrouiller les usines. Munis des capteurs appropriés, ils peuvent détecter automatiquement les intrusions et les fuites dans les réseaux de distribution, ou même exécuter des contrôles de qualité en différents endroits critiques d'une ligne de production. La charge utile disponible peut alors être utilisée pour transporter de petits équipements dans des secteurs difficiles à atteindre, au moyen d'un treuil fixé entre deux cubes par exemple, surpassant les grues dans leur versatilité.

Travailler sur le contrôle et la conception d'aérostats conçus pour l'intérieur constitue une plateforme d'entraînement idéale pour de futures applications extérieures ; On peut par exemple penser à un garde robotique flottant autour d'un individu, afin d'aviser rapidement un officier si la sécurité de la personne est mise en danger. Les aérostats peuvent aussi patrouiller près de bâtiments, assurant un point de vue plus haut et plus flexible afin de contrôler les intrusions. Lorsqu'une catastrophe naturelle survient, il est souvent trop risqué d'envoyer des humains au centre névralgique. Les aérostats peuvent survoler la scène afin d'acquérir des données et de remplir des missions de recherche et de sauvetage. La charge disponible peut servir dans cette situation à procurer des vivres de survie ou des médicaments. En volant autour de bâtiments ils peuvent créer, en associant les prises de vues, un modèle 3D ou la carte d'une ville (tel que discuté dans [20]). Des régions éloignées aux climats hostiles peuvent ainsi être cartographiées aisément et suivies en altitude. Tel que discuté dans [57] les dirigeables semi-autonomes déclassent les satellites classiques dans l'observation et la surveillance de l'environnement terrestre en terme de résolution, de manœuvrabilité et de flexibilité au niveau de la configuration de leurs capteurs. En télécommunication les meneurs de l'industrie indienne sont intéressés par des aérostats qui peuvent servir de station de relais, transmettant un signal réseau. Ils surveillent entre autres les développements fait par l'Agence de Défense Américaine sur des dirigeables évoluant à très haute altitude et autonomes pour plus d'un mois grâce à l'énergie de panneaux solaires [58]. La marine américaine voit dans ces dirigeables une percée dans la surveillance des côtes et des

frontières. Évidemment, dans leur état actuel, les Tryphons peuvent difficilement être utilisés dans des applications extérieures, mais ils constituent un banc d'essai idéal pour le prototypage d'algorithme de contrôle et de stabilisation.

Dans le milieu académique, ce type de robots procure une plateforme de recherche stable et flexible pour l'intégration de capteurs, le développement d'algorithmes de contrôle ou le développement de comportements [59]. L'équipe de Sharf et Nahon à l'Université McGill utilise les capacités d'un aérostat afin de simuler un objet libéré de la gravité dans l'espace. Leur sphère (FIG. 1.5(a)) est détectée par le système de vision d'un manipulateur afin d'étudier les méthodes de préhension les mieux adaptées à un environnement sans gravité [5].

En atmosphère contrôlée, le Tryphon a la capacité de fonctionner pendant plus de six heures sans changement de batteries. Ils devient un concurrent légitime aux robots avec câbles et sur roues comme le Khepera¹ pour des expérimentations de longue durée, par exemple dans le cadre de recherches sur les algorithmes évolutifs. À nouveau, la charge utile simplifie ici l'intégration de nouveaux capteurs et l'architecture modulaire permet la modification de la configuration des capteurs.

5.2 Interaction Humain-Robot

Le contexte des présentations artistiques permet de mettre en contact les robots avec des agents au profil très varié. Cet environnement est ce qui manque à beaucoup de chercheurs en interaction humains-robots, que ce soit du point de vue cognitif ou comportemental. Plusieurs projets ont déjà démontrés le potentiel des installations ou performances artistiques pour collecter des données pertinentes en ce domaine [60, 8, 61, 62]. La méthodologie de collecte des données est encore un des principaux points sensibles de ce type de contexte de recherche, puisque les variables non-observées sont difficiles à contrôler précisément dans un environnement de performance artistique ou d'exposition.

Une nouvelle collaboration dans le milieu de la psychologie est maintenant en émergence : les oscillations lentes de aérostats, leurs hésitations lors d'interactions, leur

1. Plateforme robotique de K-Team



FIGURE 5.1 – Installation interactive "Fish-birds" de M.Velonaki [8]

manière d'interagir et de se déplacer, rendent les Tryphons semblables à de gros animaux fantastiques, alors que ces mouvements proviennent d'une mécanique complexe et d'algorithmes de comportement programmés. Les nombreux capteurs leur permettent de réagir à la lumière, à la voix humaine (chant) et à beaucoup d'autres types de stimuli, ce qui augmente leur similitude avec des organismes vivants. Cette similarité, qui déclenche des émotions réelles, des impressions et un sentiment d'empathie de la part de l'auditoire, est maintenant perçue comme une plateforme prometteuse pour l'exploration des interactions humains-robots dans le domaine de l'intelligence artificielle, de la vie artificielle et des émotions artificielles. Plusieurs psychologues ont déjà manifesté leur intérêt à entreprendre des études participatives avec les cubes, ce qui représente une nouvelle fois leur potentiel à réunir des chercheurs de différentes disciplines autour d'un même projet tout en leur permettant de réaliser des développements dans leur propre domaine.

5.2.1 Domaine artistique

Comme il a été maintes fois mentionné, le concept original des Tryphons a été développé et présenté par le professeur Nicolas Reeves en tant qu'une concrétisation d'une image architecturale et en tant qu'œuvre à vocation artistique [11]. Le professeur Reeves envisage de nombreuses possibilités d'applications artistiques pour ces aérobots, dont certaines sont mentionnées ci-après. Dans un cadre artistique, le Tryphon devient un porte-parole de la science pour un large auditoire. Il démontre à quel point des objets

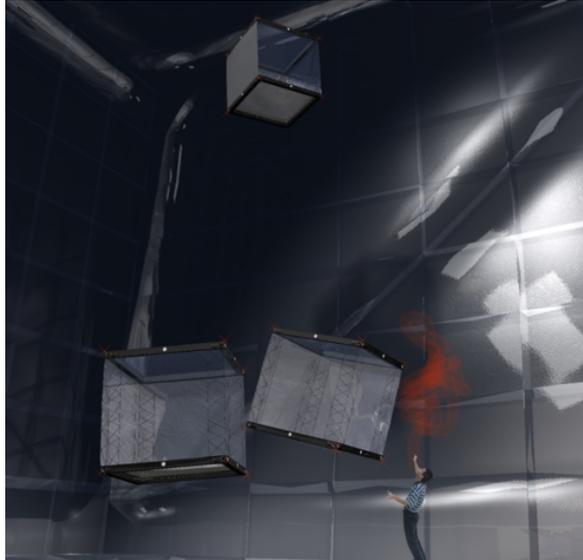


FIGURE 5.2 – Simulation d'une chorégraphie humains-robots

esthétiques et fascinants peuvent être créés avec l'aide de la technologie. Équipé d'un ensemble de capteurs, il interprète son environnement et réagit selon les algorithmes de comportement programmés sur son ordinateur de bord. Puisqu'il est réactif à la lumière, aux obstacles (via les ultrasons) et à l'étendue de la voix humaine, des acteurs et des visiteurs peuvent interagir avec lui en utilisant les interfaces appropriées. Les enfants sont émerveillés par cet animal familier énorme et étrange ; même si son mouvement semble diriger l'attention du robot vers eux, ils n'en sont pas effrayés². Les Tryphons ont le potentiel de devenir des protagonistes de performances théâtrales ou chorégraphiques, mais ils sont souvent encore plus mystérieux lorsqu'ils interagissent avec des humains³. D'un point de vue technique leur géométrie cubique leur donne un potentiel unique. Au théâtre, l'éclairage est souvent limité par l'espace disponible sur les grilles et la position de ces grilles. Les faces du Tryphon peuvent être couvertes de Mylar, ou d'un autre matériau très réfléchissant, et utilisées pour rediriger le faisceau lumineux de lampes de scène, le transformant en réflecteur volant. En poussant plus loin cette application, il est possible de concevoir un système de maintien et de contrôle de la pression derrière cette membrane de Mylar, permettant ainsi de modifier la courbure d'une parabole concave et de changer la distance focale du faisceau. Ce faisant il serait possible de mieux en contrôler les effets, la largeur et l'intensité.

2. Voir la performance "Robofolies" sur voiles-sails.org

3. Voir la performance 'Rom<evo>' sur voiles-sails.org

Grâce à la structure qui étire l'enveloppe du ballon, les faces deviennent presque parfaitement planes. Les robots peuvent ainsi devenir des structures flottantes à six écrans (cinq si personne ne peut voir la face supérieure). Lors de spectacles dans des stades, de parties sportives ou d'opéras, des séquences vidéo peuvent être projetées sur ces écrans. D'une façon similaire, ils peuvent être adaptés pour servir de décor de théâtre, créant un ensemble mobile recouvert de textures variables projetées, aisément modifiables dynamiquement pendant la performance. Le système de projection de ces applications peut reposer sur un ensemble de projecteurs robotisés externes s'adaptant aux mouvements du ou des cube(s) via un système de suivi par caméras⁴. Les développements récents et futurs sur les projecteurs de poche et pico-projecteurs permettront fort probablement d'installer très bientôt des systèmes puissants et ultra-légers à l'intérieur de l'enveloppe de polyuréthane, procurant des projections de l'intérieur. Un autre type d'utilisation comme écran consiste à installer un ensemble (cluster) de DEL couvrant partiellement chaque face afin de diffuser du matériel vidéo embarqué.

De telles techniques peuvent conduire au développement de guides autonomes pour des musées ou des expositions : des explications écrites pourront apparaître sur les faces des robots alors qu'ils guident les visiteurs dans les différentes salles.

Comme on le voit, les limites des applications des Tryphons dans le domaine artistique ne dépendent que de la créativité de l'artiste ou du concepteur.

5.3 Assemblage et collaboration

La forme cubique des Tryphons leur donne la possibilité de s'assembler en vol. Un peu à la manière de briques, ils peuvent créer des structures complexes à partir d'éléments simples identiques. Dans le domaine de l'architecture, de nouveaux concepts de design peuvent être testés rapidement dans un médium visuel réel et à grande échelle, un peu comme une imprimante 3D, grâce à un essaim de robots volants qui permet de démontrer et de ressentir plus facilement l'impact visuel d'une architecture [12]. En rendant les aérobots réactifs à des paramètres de l'environnement, il est imaginable de créer un ensemble de règles de bases et d'ensuite les laisser décider, par exemple au moyen d'algorithmes évolutifs, quelle configuration optimise ces règles dans un con-

4. Voir la performance "Étés de la danse" sur voiles-sails.org

texte donné. Le directeur du laboratoire des Systèmes et Algorithmes d'Intelligence Distribuée à l'EPFL (Lausanne), le professeur Martinoli, a signifié son grand intérêt pour le potentiel de ces robots [63], qui contraste avec la majorité des plateformes de très petite taille actuellement utilisées dans ce domaine de recherche.

Si l'on applique le potentiel d'assemblage à la projection vidéo décrite auparavant, de nouvelles possibilités d'écrans gigantesques décomposables surgissent : une image large peut être projetée sur plusieurs écrans, ensuite décomposée en fragments qui seront transportés par des robots individuels et reconstruite ailleurs. Un système de réflexion peut aussi être imaginé à partir d'une structure assemblée, créant un immense miroir avec une distance focale ajustable, idéal pour la détection d'ondes radio ou l'observation.

Enfin les Tryphons sont adaptés au développement d'intelligence en essaim ou de comportements collaboratifs. Leur système de capteurs réactifs de base et leur géométrie simple les rends idéaux pour le partage de l'information, les comportements collaboratifs et l'assemblage collectif. Ils sont tous connectés sur le même réseau sans fil et ont déjà la possibilité d'échanger de données par communication TCP.

Le groupe du professeur Winfield à l'Université de Bristol a signifié son intérêt pour ce projet dans le cadre de ses études [64], à partir du moment où les robots auront atteint un niveau de robustesse permettant de travailler essentiellement au niveau des protocoles de collaboration.

Conclusion

Cette étude vise à doter la flotte des aérojets Tryphon de pièces robustes et d'une architecture de commande fiable. Ces robots ont passé plusieurs stades de prototypes et l'expérience du projet a permis de cibler quelques problèmes clés du design de l'électromécanique et du contrôle qui rendent leurs performances instables. Ces éléments doivent être revus dans une approche systématique et globale des robots. Si les robots ont majoritairement été utilisés lors d'installations, interactives ou autonomes, ils sont prévus pour des performances théâtrales exigeant un contrôle fiable et une répétabilité des comportements.

Pour remplir ces objectifs il fallait d'abord mieux connaître la dynamique des aérojets et les principaux paramètres l'influençant. À partir de la littérature des dirigeables et de concepts empruntés à l'hydrodynamique, un modèle mathématique physique théorique a été construit. Il s'est avéré qu'en le comparant à des tests, il représentait incorrectement la réalité. Prenant le facteur géométrique k des effets aérodynamiques comme valeur ajustable, le modèle a pu être optimisé. En modélisant correctement le comportement des Tryphons, il a été possible d'étudier les impacts sur la consommation d'énergie d'une répartition asymétrique des équipements. Puis, afin de diminuer le temps de calibration et d'augmenter le potentiel de contrôle du robot, une configuration permettant d'utiliser pleinement le potentiel contrôlé des 6 degrés de liberté a été conçue. Elle consiste à disposer les équipements de manière à rapprocher au maximum le centre de volume du centre de masse tout en augmentant la puissance disponible

pour les rotations autour des axes x et y .

Le modèle a aussi permis de réaliser que les effets aérodynamiques sont beaucoup plus grand que ceux développés théoriquement pour un cube parfait. Il est probable que cela soit dû à la géométrie en treillis des poutrelles de la structure, qui cause des turbulences dans le fluide ambiant.

Afin de permettre une utilisation extensive des robots lors de performances publiques, l'ensemble des circuits et câbles a été revu pour devenir plus robuste aux chocs et aux manipulations des éléments critiques. De nouveau câbles plats, fixés à la structure, ont été employés et des circuits imprimés ont été spécialement conçus pour s'adapter à la géométrie des poutrelles. L'étude des circuits a également mené à revoir la régulation de l'alimentation, distribuée ou centralisée, ainsi qu'à ajouter des contrôleurs DEL et des indicateur de niveau des batteries. Afin de développer une expertise complète et un programme de commande mieux adapté aux besoins du projet, les ESC des moteurs de turbine ont été remplacés par ceux d'une plateforme libre de droits. Cela a permis de fournir de l'information supplémentaire à l'ordinateur de bord, comme la consommation de courant, le voltage de la batterie, la vitesse de rotation de la turbine et sa température. Si les turbines n'ont pas été directement touchées par l'étude, leurs tubulures ont fait l'objet d'une recherche afin de garantir un rapport optimal poids/rigidité. Finalement des boîtiers pour les batteries ont été conçus et testés afin d'éviter les erreurs de branchement, d'équilibrer la répartition des batteries sur le robot et d'assurer une fixation sécuritaire.

Le potentiel de commande des six degrés de liberté a été décrit mécaniquement au premier chapitre, mais les capteurs embarqués au début de l'étude, un magnétomètre et des sonars, ne fournissaient pas suffisamment d'information pour un asservissement complet. Un ensemble de senseurs composé d'un accéléromètre, d'une boussole 3 axes, d'un altimètre et d'une caméra pour le flux optique du plan sous le robot a été présenté, testé virtuellement sur le modèle numérique et développé, de façon à ce que le robot équipé soit prêt à expérimenter. Un filtre de Kalman fusionne les données de ces différents capteurs et les interprète selon leur variance connue et le modèle cinématique du mouvement de l'aérobot. Une série de PD simples permet ensuite de contrôler de manière intuitive les 6 degrés de libertés indépendamment.

Maintenant que la robustesse des Tryphons a atteint un niveau acceptable pour des

performances répétitives et l'utilisation sécuritaire hors des laboratoires, la création de scénarios de théâtre aussi bien que le développement de comportements de plus haut niveau peuvent être amorcés. Les dernières lignes de ce mémoire présenteront certains travaux prévus suite à cette recherche.

Travaux futurs

La plateforme de recherche [VOILES| SAILS] emprunte simultanément différentes directions de développement artistique et technologique. Si la robustesse mécanique et électronique a été atteinte dans le cadre de cette recherche, la robustesse au niveau des algorithmes de contrôle reste encore très dépendante du type d'installation réalisé.

Interaction vocale

La musique et le chant ont une importance centrale dans une majorité d'œuvres théâtrales. Dans le contexte d'une telle performance impliquant Tryphons et acteurs, une interaction vocale doit être développée. Sans qu'il ne soit nécessaire que cette interaction soit de la précision d'une commande vocale exhaustive, la solution doit être complètement embarquée pour assurer l'autonomie du robot lors de ses interactions. Ces techniques demandent énormément de puissance de calcul et les modules embarqués sont encore limités [65]. Les performances ont déjà été testées et le concept validé en simulation sur un poste de travail afin de modifier le modèle d'état du robot selon la note chantée par une actrice.

Interface de commande

Au cours de l'année 2010 une ébauche d'interface de commande a été réalisée afin de permettre une surveillance et un contrôle plus intuitifs des paramètres des robots par un utilisateur au sol.

Si pour le moment les fonctionnalités procurent majoritairement un rendu visuel de

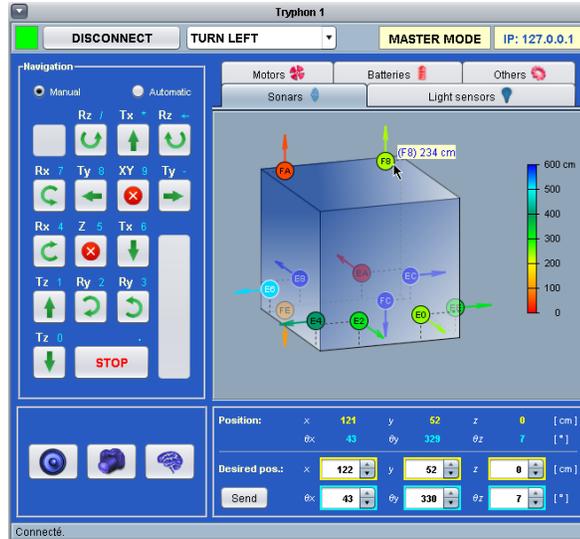


FIGURE 5.3 – Interface SAILS•Ji en mode expert

l'état des différents composants électroniques et des lectures en temps réel de chaque robot en opération, l'objectif est d'en faire une interface de création. Basée sur les graphiques de flux et la programmation visuelle, cette interface permettra aux comédiens et autres intervenants du milieu artistique de développer leurs propres comportements et interactions sans nécessiter de connaissances approfondies en programmation [66].

Capture de mouvement

Le modèle dynamique développé à la section 2.1 a été optimisé et validé par des expériences sur l'un des robots. Toutefois, étant donné la grande dimension et l'équilibre fragile du robot, ces prises de données exécutées manuellement se sont avérées très complexes. Cette complexité, couplée aux limitations des mouvements possibles dans ce contexte (trajectoires rectilignes seulement), affaiblit la robustesse du modèle numérique obtenu.

Dans le cadre de l'obtention d'un système de capture de mouvement Vicon à l'Université Laval, des expérimentations sur différents types de trajectoires seront effectuées. Elles résulteront en des données plus précises pour l'optimisation du modèle.

Autres pistes de commande

Dans les délais de cette recherche, seul le contrôle par PID's spécialisés a été développé. Le programme embarqué des Tryphons possède cependant plusieurs autres types de contrôleurs (logique floue, bang-bang et PID centralisé) dont les gains n'ont pas encore été ajustés. En comparant leur performances, il est probable que certains contrôleurs soient préférables dans un contexte particulier.

Grâce au modèle maintenant développé il est envisageable de prévoir l'intégration d'un contrôle prédictif. Ce type de contrôle permettrait une réponse plus rapide et plus souple de la motorisation, connaissant les paramètres dynamiques du robot, sans surcharger les bus de communication et sans augmenter la consommation d'énergie dans le circuit logique.

Dans le domaine de la vision, le dernier capteur intégré, la caméra du Gumstix™, permet une vaste étendue d'applications grâce notamment à la puissance de calcul disponible et à la librairie OpenCV adaptée. Des techniques de SLAM très prometteuses pourrait être tentées pour améliorer significativement les informations traitées par la caméra. Des études ont permis d'adapter les technique de SLAM dans un environnement 3D en utilisant une seule caméra (monoculaire) [67].

Bibliographie

- [1] Cooke, C., and al., 1990. *See in particular Krutikov's flying cities*. Editions of The Museum of Modern Art, New York, USA.
- [2] Li, Y., and Nayon, M., 2007. “Modeling and simulation of airship dynamics”. *Journal of guidance, control and dynamics*, **30**, Nov-Dec, pp. 1691–1700.
- [3] Lozano, R., 2007. *Objets volants miniatures : modélisation et commande embarquée*. Systèmes automatisés. Lavoisier, Paris, France.
- [4] Windischbauer, F., 1999. “Is there another chance for lighter-than-air vehicles?”. *foresight*.
- [5] Rouleau, G., Verma, S., Sharf, I., and Martin, E., 2005. “Vision-based tracking and trajectory generation for robotic capture of objects in space”. *Collection of technical papers - AIAA Guidance, Navigation and Control Conference 2005*, August 15-18, pp. 5937–5950.
- [6] Kawamura, H., and al, 2005. “Motion design for indoor blimp robot with pid controller.”. *Journal of robotics and mechatronics.*, **17**.
- [7] Jimenez, A., and Seco, F., 2006. *Ultrasonic localization methods for accurate positioning in New acoustics : selected topics II*. CSIC, Biblioteca de Ciencias, Spain, pp. 147–166.
- [8] Velonaki, M., and Rye, D., 2010. “Human-robot interaction in a media art environment”. *Proceedings of 2010 IEEE/ACM International Conference on Human Robots Interaction*, March.

- [9] Leach, J., 2005. “‘being in between’ : Art-science collaborations and a technological culture”. *Social Analysis*, **49**, pp. 141–160.
- [10] S. E. Sim, J. S., and Storey, M.-A. “Beg, borrow, or steal : Using multidisciplinary approaches in empirical software engineering research”. *Empirical Software Engineering*.
- [11] Reeves, N., Nembrini, J., Poncet, E., Martinoli, A., and Winfield, A., 2005. “Voiles ;sails : Self-assembling intelligent lighter than air structures”. *Exposé à la conférence sur les Arts Génératifs 2005*, May.
- [12] Reeves, N., Nembrini, J., Poncet, E., Martinoli, A., and Winfield, A., 2005. “Mascarillons : Flying swarm intelligence for architectural research”. *IEEE Swarm Intelligence Symposium 2005*, June.
- [13] Bernasconi, P., 2004. Robotisation des mascarillons. End of studies project report, École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [14] St-Onge, D., 2004. Analyse de la structure du mascarillon. End of studies project report, École Polytechnique de Montréal, Montreal, CA, May.
- [15] Courtlandt, C., 1962. *Histoire de l’Aéronautique*. Éditions rencontres, Paris, France.
- [16] Fossen, T. I., 1994. *Guidance and control of Ocean Vehicles*. John Wiley & Sons Ltd, NY, USA.
- [17] Lamb, H., 1895. *Hydrodynamics*. C.J. Clay and Sons (Cambridge university press), London, U. K.
- [18] Vernon, T. A., Bara, B., and Hally, D., 1988. *A surface panel method for the calculation of added mass matrices for finite element models*. Centr de recherche pour la défense atlantique - Gouvernement du Canada, Canada.
- [19] Khoury, G., and Gillett, J., 1999. *Airship Technology*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [20] Hygounenc, E., Jung, I., Souères, P., and Lacroix, S., 2004. “The autonomous blimp project of laas-cnrs : Achievements in flight control and terrain mapping”. *The International Journal of Robotics Research*, **23**, April-May, pp. 473–511.
- [21] Bestaoui, Y., and Hima, S., 2007. “Modelling and trajectory generation of lighter-than-air aerial robots : Invited paper”. *International workshop on Robot motion and control #6*.
- [22] Zufferey, J.-C., Guanella, A., Beyeler, A., and Floreano, D., 2006. “Flying over the reality gap : from simulated to real indoor airships”. *Journal of Autonomous Robotics*, **21**, Sept., pp. 243–254.

- [23] R., J., L., J., G., Z., J., Z., and X., S., 2005. “Design of flight control system for a robotic blimp.”. *Proceeding of SPIE*, **6042**.
- [24] Y. Li, M. N., and Sharf, I., 2009. “Dynamic modeling and simulation of flexible airship”. *AIAA Journal*, **47**, March, pp. 592–605.
- [25] Li, Y., 2008. Dynamic modeling and simulation of flexible airship. Tech. rep., Montreal, CA.
- [26] Valdmanis, M., 2010. Localization and navigation of a holonomic indoor airship using on-board sensors. Tech. rep., Montreal, CA.
- [27] Zufferey, C., 2008. *Bio-inspired flying robots : Experimental synthesis of autonomous indoor flyers*. EPFL Press, Lausanne, Suisse.
- [28] Gomes, S., and Ramos, J., 1998. “Airship dynamic modeling for autonomous operation”. *Proceedings of 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, May.
- [29] Popper, F., 1993. *Art of the electronic age*. Thames and Hudson, New York, US.
- [30] Wilson, S., 2002. *Information Arts : Intersections of art, science and technology*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- [31] Fruchter, R., and Emery., K., 1999. “Teamwork : assessing cross-disciplinary learning”. *CSCCL '99 Proceedings of the 1999 conference on Computer support for collaborative learning*, **19**.
- [32] St-Onge, D., Gosselin, C., and Reeves, N., 2011. “A comparison of collaborative approaches in robotic artworks”. *Proceedings of 2011 International Conference on Robotic and Automation*, Mai.
- [33] Piedrahita, G., and Guayacundo, D., 2006. “Evaluation of accelerometers as inertial navigation system for mobile robots”. *Proceeding of IEEE 3rd Latin American Robotics Symposium, 2006. LARS '06*, pp. 84–90.
- [34] Bijker, J., and Steyn, W., 2008. “Kalman filter configurations for a low-cost loosely integrated inertial navigation system on an airship”. *Control Engineering Practice*, **16**, p. 1509– 1518.
- [35] Y.K. Thong, M.S. Woolfson, J. C. B. H.-G., and Jones, D., 2004. “Numerical double integration of acceleration measurements in noise”. *Measurement*, **36**, pp. 73–92.
- [36] Liu, H., and Pang, G., 2001. “Accelerometer for mobile robot positioning”. *IEEE Transactions on Industry Applications*, pp. 812–819.

- [37] H.-H. Lin, C. T., and Hsu, J.-C., 2008. “Ultrasonic localization and pose tracking of an autonomous mobile robot via fuzzy adaptive extended information filtering”. *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, **57**, pp. 2024–2034.
- [38] Kirchner, N., and Furukawa, T., 2005. “Infrared localization for indoor uavs”. *Proceeding of the 1st International Conference on Sensing technology*, Nov.
- [39] Muller, A. Rottmann, L. R., and Burgard, W., 2009. “A probabilistic sonar sensor model for robust localization of a small-size blimp in indoor environments using a particle filter”. In *Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 3589–3594.
- [40] W. Burgard, D. Fox, H. J. C. M., and Thrun, S., 1999. “Sonar-based mapping with mobile robots using em”. *Proceeding of the 16th International Conference on Machine Learning*.
- [41] Szeliski, R., 2009. *Computer vision : Algorithms and applications*. ch. 8.
- [42] S., V. D. Z., A., B., and J., S.-V., 2002. “Visual station keeping for floating robots in unstructured environments”. *Robotics and autonomous systems*, **39**, pp. 145–155.
- [43] A. Elouardi, S. Bouaziz, A. D. L. L.-J. K., and Reynaud, R., 2006. “A smart sensor-based vision system : implementation and evaluation”. *Journal of physics D : applied physics*, **39**, pp. 1694–1705.
- [44] Fumiya, I., 2003. “Biologically inspired visual odometer for navigation of a flying robot”. *Robotics and autonomous systems*, **44**, pp. 201–208.
- [45] Zhang, H., and Ostrowski, J., 1999. “Visual servoing with dynamics : control of an unmanned blimp”. *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, May.
- [46] Kawamura, H., and al, 2005. “Pid landing orbit motion controller for an indoor blimp robot”. *10th symposium on artificial life and robotics*, pp. 177–184.
- [47] Kawamura, H., and al, 2007. “Learning landing control of an indoor blimp robot for self-energy recharging”. *12th symposium on artificial life and robotics*, pp. 116–121.
- [48] S. Oh, A. Z., and Taylor, K., 2000. “Autonomous battery recharging for indoor mobile robots”. *Proceeding of the Australian Conference on Robots and Automation*.
- [49] Bowditch, N. *American practical navigator*. ch. 7.

- [50] Fox, D., Burgard, W., Dellaert, F., and Thrun, S., 1999. “Monte carlo localization : Efficient position estimation for mobile robots”. *Proc. 16th National Conference on Artificial Intelligence, AAAI’99*, July.
- [51] Fox, D., Burgard, W., Dellaert, F., and Thrun, S., 1999. “Markov localization for mobile robots in dynamic environments”. *Journal of Artificial Intelligence Research*, **11**, pp. 391–427.
- [52] A. Rottmann, C. Plagemann, P. H., and Burgard, W. “Autonomous blimp control using model-free reinforcement learning in a continuous state and action space”.
- [53] St-Onge, D., Gosselin, C., and Reeves, N., 2010. “Dynamic modelling of a cubic flying robot”. *Proceedings of 2010 ASME International Design Engineering Technical Conferences (IDETC)*, August.
- [54] White, F. M., 2003. *Fluid mechanics*, fifth ed. McGraw Hill, New York, USA.
- [55] W.H. Press, S.A. Teukolsky, W. V., and Flannery, B., 2002. *Numerical Recipes in C++*. Second Edition. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [56] Zarchan, P., and Musoff, H., 2005. *Fundamentals of Kalman filtering : a practical approach*, Vol. 190.
- [57] Elfes, A., Bueno, S. S., Bergerman, M., and Ramos, J. J. G., 1998. “A semi-autonomous robotic airship for environment monitoring missions”. *Proceedings of 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, May.
- [58] Wilson, J., 2004. “A new era for airships.”. *Aerospace America*, May.
- [59] Kawamura, H., and al, 2007. “Development of the research platform of small autonomous blimp robot”. *Electronics and communications in Japan*, **9**, Sept., pp. 1419–1429.
- [60] St-Onge, D., and Reeves, N., 2010. “Human interaction with flying cubic automata”. *Proceedings of 2010 IEEE/ACM International Conference on Human Robots Interaction*, March.
- [61] Demers, L.-P., 2010. “Machines performers”. *Proceedings of 2010 IEEE/ACM International Conference on Human Robots Interaction*, March.
- [62] Murphy, R., Hopper, A., and Zourntos, T., 2010. “A midsummer night’s dream (with flying robots)”. *Proceedings of 2010 IEEE/ACM International Conference on Human Robots Interaction*, March.
- [63] W.C. Evans, G. M., and Martinoli, A., 2010. “Comparing and modeling distributed control strategies for miniature self-assembling robots”. *Proceedings of the 2010 International Conference on Robotic & Automation*, May.

- [64] W. Liu, A. Winfield, J. S. J. C., and Dou, L., 2007. “Strategies for energy optimization in a swarm of foraging robots”. *Swarm robotics Ws*, pp. 14–26.
- [65] Q. Hong, C. Zhang, X. C., and Chen, Y., 2007. “Embedded speech recognition system for intelligent robot”. *Proceeding of the 14th International Conference on Mechatronics and machine vision practice*, Dec.
- [66] A.D. Bateson, N. B., and Wilkinson, A., 2009. “Flowchart driven robot to promote educational development (fred)”. *Proceeding of Innovation in student learning*.
- [67] T. Lemaire, C. Berger, I.-K. J., and Lacroix, S., 2007. “Vision-based slam : Stereo and monocular approaches”. *International Journal of Computer Vision*, **74**, pp. 343–364.

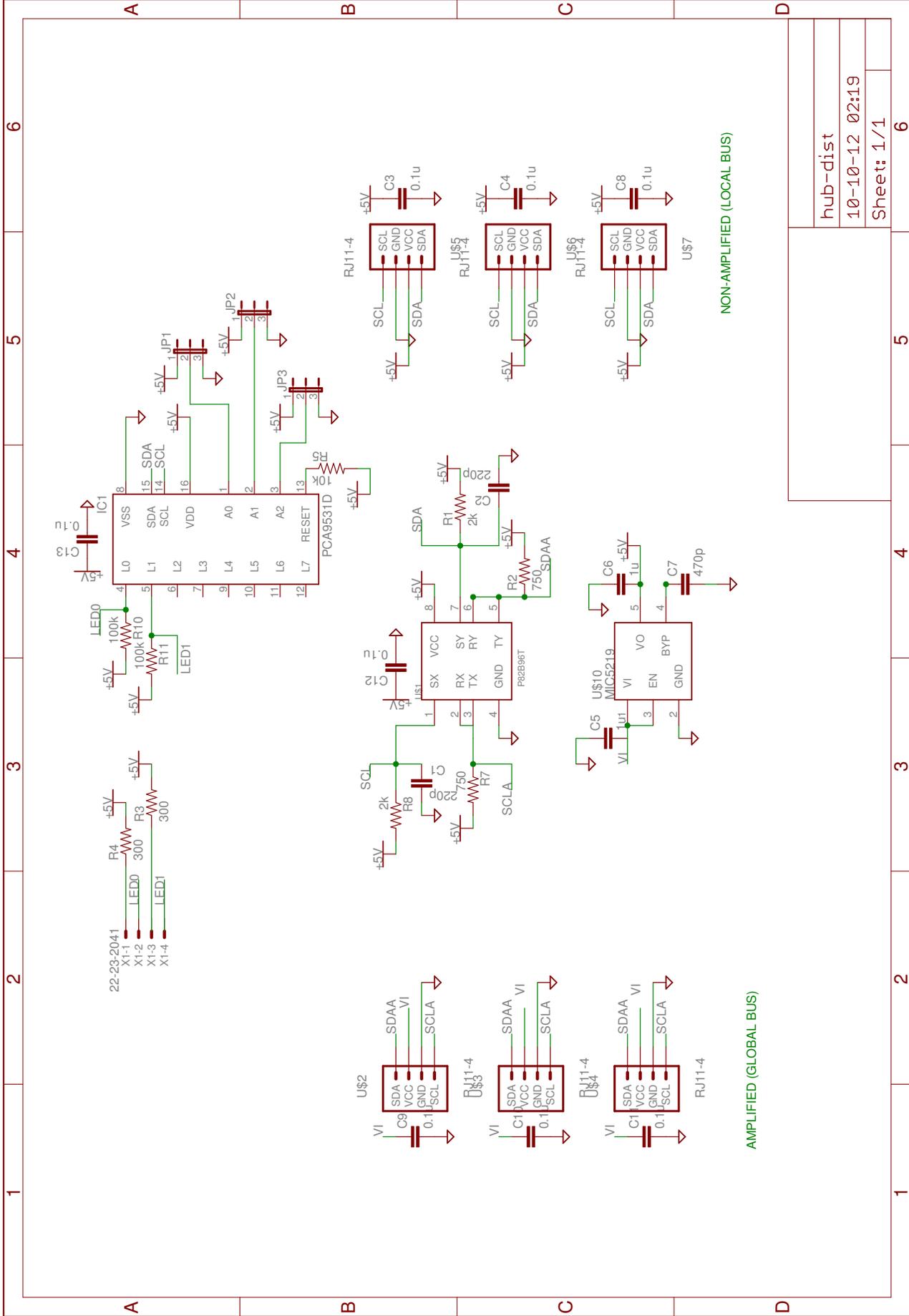
Annexe A

ANNEXE A : SCHÉMAS DES CIRCUITS

Cette annexe comprends les schémas des nouveaux circuits électroniques. Chacun est suivi du dessin en 2 couleurs de sa plaquette de circuit imprimé. Les circuits ont été réalisés avec la logiciel EAGLE.

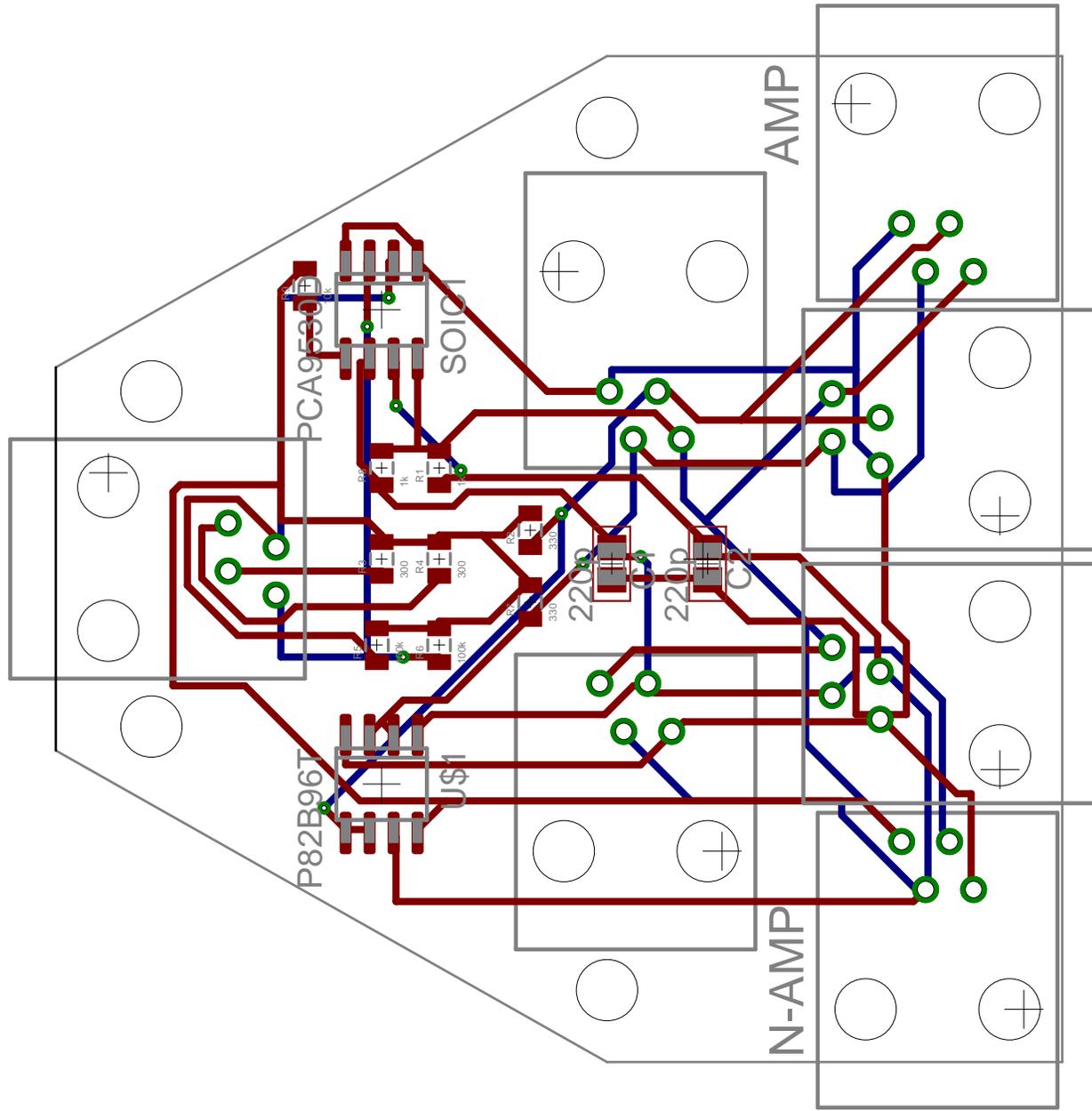
A.1 Concentrateur

A.1.1 Régulation distribuée

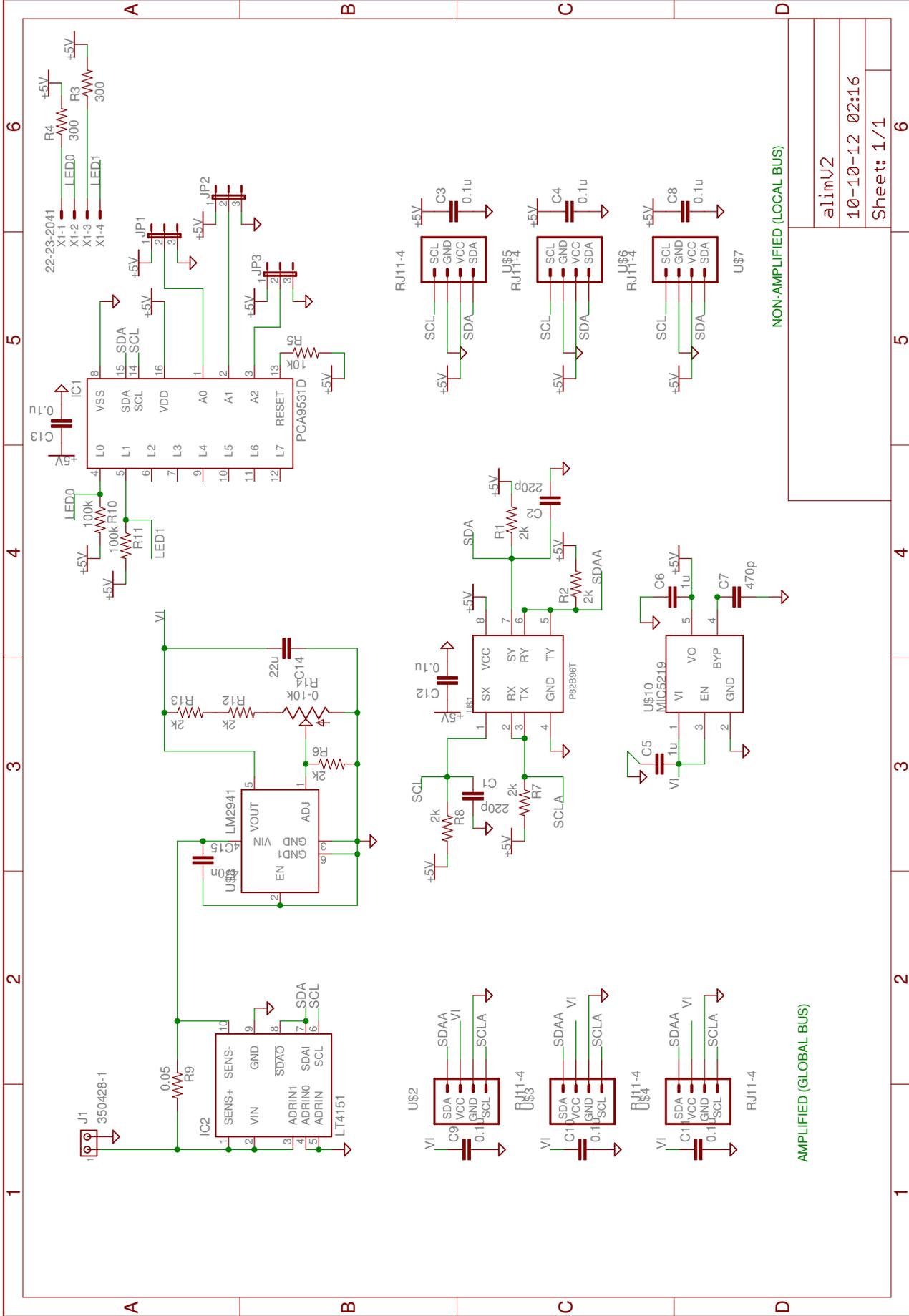


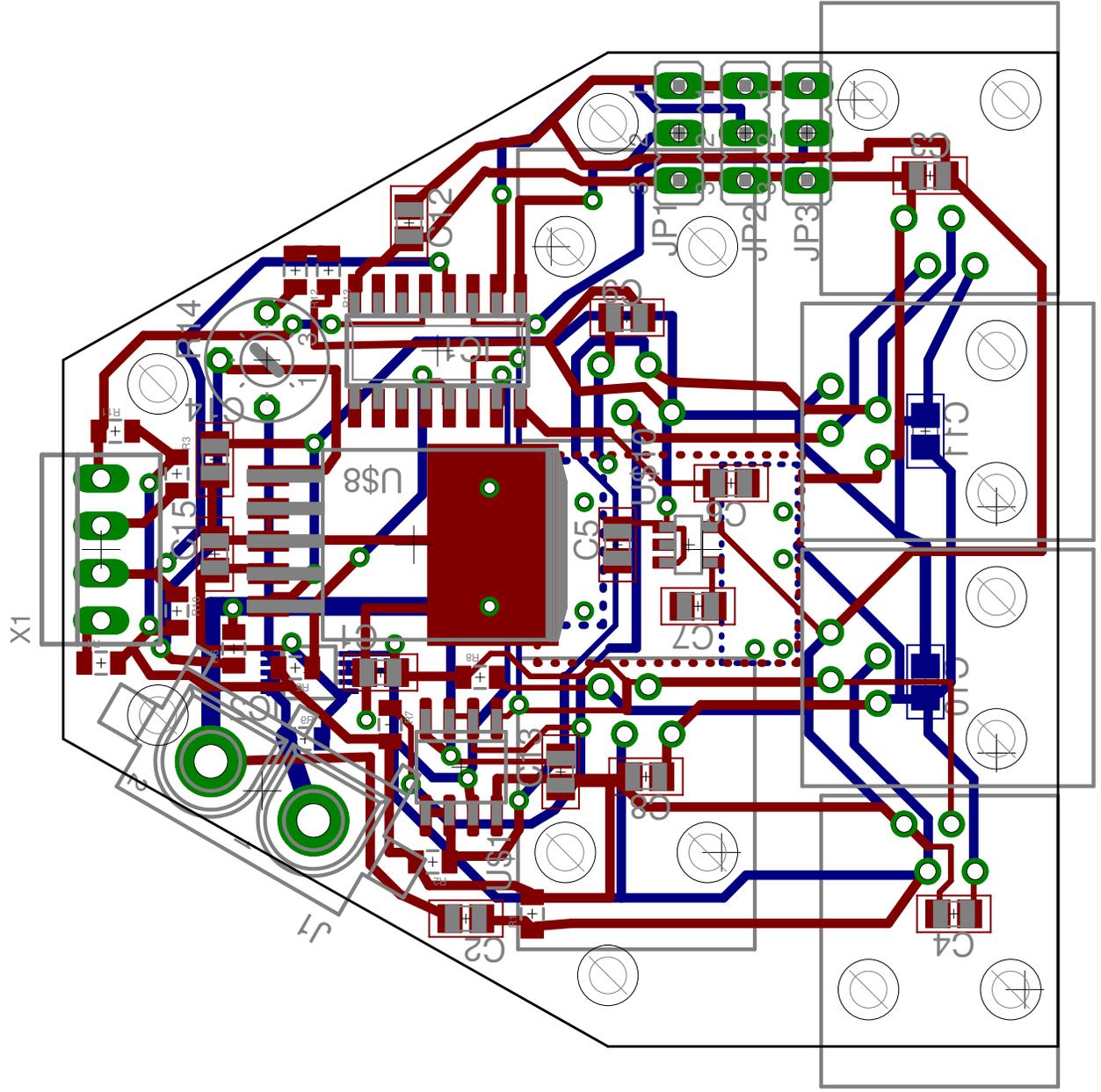
hub-dist	6
10-10-12 02:19	6
Sheet: 1/1	6

A.1.2 Régulation centralisée



A.2 Alimentation





A.3 Altimètre

