



HAL
open science

Microdrone équipé d'un système visuel inspiré des abeilles

Erik Vanhoutte

► **To cite this version:**

Erik Vanhoutte. Microdrone équipé d'un système visuel inspiré des abeilles. Robotique [cs.RO]. Aix Marseille Université, 2018. Français. NNT: . tel-01910718

HAL Id: tel-01910718

<https://amu.hal.science/tel-01910718>

Submitted on 1 Nov 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

AIX-MARSEILLE UNIVERSITÉ

ED 463 - Sciences du Mouvement Humain

UMR 7287 - Institut des Sciences du Mouvement

163 Avenue de Luminy, 13009 Marseille, France

Thèse présentée pour obtenir le grade universitaire de docteur

Discipline : Science du Mouvement Humain

Spécialité : Biorobotique

Erik VANHOUTTE

Microdrone équipé d'un système visuel inspiré des abeilles

Soutenue le 23/10/2018 devant le jury composé de :

R. J. BOOTSMA	Professeur	ISM Marseille	Directeur de thèse
J. SERRES	MCF	ISM Marseille	Co-Directeur de thèse
V. SERFATY	Docteure	DGA/DS	Tutrice DGA
P. VASSEUR	Professeur	Univ. Rouen	Rapporteur
R. ZAPATA	Professeur	LIRMM	Rapporteur
N. MARCHAND	DR CNRS	GIPSA-lab Grenoble	Examinateur
V. BERGE-CHERFAOUI	Professeure	UTC	Examinatrice

Remerciements

Je souhaite remercier mes directeurs de thèse, Julien Serres et Reinoud Bootsma pour leur encadrement ainsi que de m'avoir accordé leur confiance, ils ont su me guider dans les démarches scientifiques et la rédaction des différentes publications de cette thèse.

J'exprime ma gratitude aux membres du jury d'avoir accepté de consacrer du temps pour la relecture et l'évaluation du travail présenté dans ce manuscrit de thèse.

Je remercie la Direction Générale de l'Armement d'avoir soutenu ce travail de thèse par le biais d'un co-financement AMU/DGA ainsi que la sélection et le tutorat de mon projet de thèse par Mme Véronique Serfaty.

Je remercie également l'école doctorale des Sciences du Mouvement Humain ainsi que l'Institut des Sciences du Mouvement pour l'encadrement et l'environnement de travail mis à disposition des doctorants.

Je tiens à remercier Alexis Baradel pour ces excellentes années de BTS et pour m'avoir ouvert la voie vers l'enseignement supérieur.

Je remercie Nicolas Delestre, Gilles Gasso, Nicolas Malandin d'avoir cru en moi et de m'avoir apporté un enseignement de qualité tout comme leurs collègues enseignants à l'INSA de Rouen.

Merci à mon tuteur de stage de fin d'études, Damien Eynard, d'avoir stimulé ma curiosité scientifique et sans qui je ne me serais pas lancé dans l'aventure de la thèse.

Je remercie les chercheurs de l'équipe Biorobotique, Franck Ruffier, Thibaut Raharijaona, Nicolas Franceschini et Michael Wiertlewski pour leur apport scientifique et discussion à mon travail de thèse. Un merci particulier au chercheur et surtout à notre chef d'équipe Stéphane Viollet pour nos réflexions et discussions scientifiques ainsi que pour tous ces moments passés en équipe dans une ambiance chaleureuse.

Je remercie notre micro-mécanicien Julien Dipéri et notre électronicien Marc Boyron pour leur implication et leur excellent travail si utile à cette thèse comme à beaucoup d'autres.

Je tiens à remercier Stéfano Mafra, Fabien Colonnier, Roman Goulard, Julien Dupeyroux et Augustin Manecy pour nos discussions enrichissantes entre doctorants, pour leur rigueur scientifique et pour tous ces bons moments partagés pendant et en dehors de la thèse.

Un grand merci à la cellule de Culture Scientifique et Technique, à mon binôme, Quentin Ailloud et à tous les autres participants pour tous ces bons moments de partages et de formations pour une mission nécessaire à la recherche, la diffusion scientifique.

Merci aux fondateurs de la start-up Unistellar et à mes collègues de me faire participer à un projet si passionnant à un rythme m'ayant permis en parallèle de finir ma rédaction de thèse.

Merci à mes amis d'enfance, de BTS, de SNSM, d'école d'ingénieurs, de parapente et à toute ma famille pour tous ces moments inoubliables d'évasions si utiles pendant ce marathon!

Un grand merci à ma Mère et ma Grand-mère pour leur soutien sans faille tout au long de

mes choix d'études, pour leur amour et leur bienveillance.

Merci à Maki pour sa chaleureuse présence et pour avoir accepté de figurer et de participer à sa manière à mes expériences de thèse.

Pour terminer, je remercie ma fiancée, Julie pour son soutien inconditionnel, son effervescence et ce même grain de folie. Merci.



Julie MATHIEU

Acronymes

- ALIS** AutopiLot using an Insect-based vision System, pilote automatique utilisant un système de vision basé sur celui de l'insecte [Portelli et al., 2010].
- CMOS** Complementary Metal Oxide Semiconductor, technologie de fabrication de composants électroniques utilisé notamment pour les capteurs photographique.
- CPU** Central Processing Unit, processeur ou unité centrale de traitement qui exécute les instructions machine des programmes informatiques.
- CurvACE** Curved Artificial Compound Eye, Capteur optique incurvé de 1,75 g, inspiré de l'oeil composé de l'insecte [Viollet et al., 2014].
- C_v Coefficient de variation, mesure relative de la dispersion des données autour de la moyenne.
- GPS** Global Positioning System, Système de Géo-localisation par satellites utilisant la trilatération.
- IMU** Inertial Measurement Unit, centrale inertielle composée d'un gyromètre 3 axes et d'un accéléromètre 3 axes.
- IQR** InterQuartile Range. En statistiques, l'écart interquartile ou étendue interquartile est une mesure de dispersion qui s'obtient en faisant la différence entre le troisième et le premier quartile.
- LIDAR** LIght Detection And Ranging, capteur émissif permettant la détection et l'estimation de la distance par la lumière (ou laser) en reposant sur l'effet Doppler-Fizeau ou sur la mesure du délai aller-retour de la lumière.
- LMS** Local Motion Sensor, capteur de mouvement local permettant la mesure du flux optique local.
- M²APix** Michaelis-Menten Auto-Adaptive Pixel, rétine à réponse auto-adaptative suivant la loi de Michaelis-Menten [Mafra et al., 2015].
- MORSE** Modular OpenRobots Simulation Engine, simulateur générique pour la robotique académique (openrobots.org/morse).
- OF** Optical Flow, le flux optique est une vitesse angulaire (exprimée en degrés par seconde ou en radians par seconde).
- RT-MaG** Real-Time MArseille Grenoble project, projet développé par le Gipsa-Lab (Grenoble) et l'ISM (Marseille) fournissant de multiples outils pour la conception de modèles MATLAB/Simulink et l'utilisation de systèmes linux embarqués temps réel dédiés à la robotique.
- SLAM** Simultaneous Localization And Mapping, localisation et cartographie simultanées.

SPI Serial Peripheral Interface, bus de données série synchrone qui opère en mode full-duplex. Les circuits communiquent selon un schéma maître-esclaves, où le maître contrôle la communication. Plusieurs esclaves peuvent coexister sur un même bus, dans ce cas, la sélection du destinataire se fait par une ligne dédiée entre le maître et l'esclave appelée Slave Select (SS).

X4-MaG Premier drone de type quadrirotor, à bas coût et open-hardware, conçu pour le projet RT-MaG.

Table des matières

Remerciement	iii
Lexique	v
Introduction générale	3
1 Contexte et enjeux des recherches en robotique bio-inspirée	5
1.1 Bioinspiration et couplage perception action dans le monde vivant	6
1.2 Contraintes inhérentes à la microrobotique aérienne	13
1.2.1 Les difficultés matérielles	13
1.2.2 Les limites de la navigation	14
1.3 Les différents microdrones en robotique	18
2 Perception et calculs du flux optique	23
2.1 État de l’art	24
2.2 Perception par une rétine bio-inspirée auto-adaptative nommée M ² APix	26
2.2.1 La rétine M ² APix	26
2.2.2 Calibration optique	27
2.3 Algorithmes de calculs de flux optique	30
2.3.1 Méthode par seuillage	31
2.3.2 Méthode par corrélation croisée	31
2.4 Performance des algorithmes et du capteur en présence de fortes perturbations lumineuses	33
2.4.1 Comparaison des méthodes sur bâches texturées défilantes	33
2.4.2 Comparaison en conditions de vol réel	39
2.5 Conclusion sur les apports pour les futures expériences de robotique bio-inspirée	44
3 Simulation des stratégies de navigation bio-inspirées des abeilles	47
3.1 Environnement et stratégies de navigation inspirées de l’abeille	48
3.2 Simulation de la perception de l’abeille pour la mesure de flux optique	49
3.2.1 Analyse du besoin et des solutions de simulations existantes	49
3.2.2 Modification du simulateur MORSE	51
3.3 Simulation par contrôleurs évènementiels de trajectoires guidées par flux optique	54
3.3.1 Protocole de la simulation	54
3.3.2 Expérience en tunnel avec réduction centrale symétrique	57
3.3.3 Expérience en tunnel avec changement brutal de largeur	59

3.4	Conclusion sur le simulateur et les stratégies simulées	62
4	Plateforme robotisée pour l'implémentation de différentes stratégies de vols	63
4.1	Introduction	68
4.2	Présentation de la plateforme d'expérimentation et de l'environnement	68
4.2.1	Réactivité du microdrone par le temps réel dur	70
4.3	Conception d'un œil stabilisé dédié à la navigation bio-inspirée	71
4.3.1	Conception mécanique	73
4.3.2	Architecture évolutive de transmission de données	74
4.4	Tests préliminaires du contrôle de trajectoires	77
4.4.1	Test sur bâche défilante	77
4.4.2	Microdrone en vol longeant un environnement texturé	79
5	Discussion et conclusion	89
5.1	Discussion et perspectives	90
5.1.1	Comparaison des capteurs CurvACE et M ² APix	90
5.1.2	Auto-adaptation et gamme de mesures du capteur M ² APix	91
5.1.3	Algorithme hybride de calcul de flux optique	93
5.1.4	Trajectoires des stratégies de navigation	93
5.1.5	Évitement d'obstacles frontaux par flux optique	94
5.1.6	Plateforme d'expérimentation	95
5.2	Travail accompli	96
6	Annexes	99
6.1	Publications durant la thèse	99
6.1.1	Brevet	99
6.1.2	Revue internationale à comité de lecture	99
6.1.3	Actes de conférences internationales	99
6.1.4	Autres communications	101
	Bibliographie	103

Introduction générale

L'outil n'a cessé de faire partie intégrante de l'histoire de l'humanité. C'est un instrument physique utilisé afin de réaliser une action dans un environnement qui, sans lui, serait impossible ou représenterait une charge de travail trop lourde. L'Homme en crée continuellement et les perfectionne au cours des siècles. Ainsi, les premières traces connues d'outils chez l'homme apparaissent sous forme d'os taillés et remontent à plus de 3,39 millions d'années [McPherron et al., 2010]. Depuis, une multitude d'outils ont vu le jour. Dans un premier temps pour répondre aux besoins physiologiques (i.e., premier étage de la pyramide des besoins de Maslow [Maslow, 1954]), puis pour d'autres applications dans de nombreux domaines tels que le transport, l'exploration, l'automatisation puis la robotique.

Le robot est un automate qui, comme lui, se comporte de manière automatique sans intervention humaine, mais qui, en plus, est doté de capteurs recueillant des informations de l'environnement qui lui confèrent la capacité de s'adapter et de se déplacer de manière autonome. C'est un agent physique qui réalise des tâches dans un environnement qu'il perçoit et dans lequel il évolue. Ces outils autonomes allient des connaissances pointues dans de multiples domaines (e.g., matériaux, mécanique, électronique, énergie, programmation, automatique...) et sont munis de processeurs (i.e. appareillage électronique) permettant d'exécuter un programme servant à agir par des actionneurs en fonction des informations récoltées par des capteurs. En robotique mobile ou d'exploration, la perception de l'environnement permettant les déplacements est souvent faite à l'aide de capteurs visuels tels que des cameras dotées de plusieurs milliers, voir millions de pixels. Les processus permettant d'extraire l'information des données provenant de tous ces pixels sont souvent lourds, ce qui demande du temps et/ou des capacités de calculs importantes.

Or, dans le monde vivant, selon James J. Gibson, pour se déplacer, les animaux perçoivent leur environnement de façon directe sans qu'ils aient besoin d'enrichir leurs perceptions avec des informations mémorisées [Gibson, 1979]. D'autre part, des études sur les insectes volants ont montré que le faible nombre de neurones (e.g., 1 million de neurones chez l'abeille) dont ils sont dotés leur permet tout de même d'extraire rapidement l'information visuelle leur permettant

de se déplacer avec une haute réactivité dans des environnements complexes et variés [Menzel and Giurfa, 2001, Haddad et al., 2004]. Certains travaux en robotique s'intéressent à ces capacités biologiques créées par des millions d'années de sélection naturelle [Darwin, 1859] afin de reproduire partiellement ou totalement certaines actions des êtres vivants. Cette discipline qui cherche à s'inspirer du règne animal pour effectuer de nouvelles avancées technologiques se réfère au Biomimétisme. Pour la Biorobotique, le Biomimétisme ne représente que la moitié de la réflexion appartenant à un cycle perpétuel d'échange de connaissances entre biologie et robotique. En effet, le fait d'implémenter des mécanismes bio-inspirés sur une plateforme robotique permet de confirmer ou d'infirmer des hypothèses biologiques, mais aussi d'apporter des éléments à une meilleure compréhension des facultés sensorielles des animaux [Beer et al., 1998, Webb, 2000, Franceschini, 2014, Guillot and Meyer, 2014].

La robotique aérienne actuelle se confronte à des contraintes fortes qui ont été surmontées par une multitude d'espèces animales de façons diverses. Dès lors, tout l'enjeu de ma thèse sera de s'inspirer des abeilles, afin de développer une perception plus directe qui nécessite moins de calculs pour la navigation des micro-robots aériens tels qu'il en existe actuellement. Il s'agit aussi d'avoir une approche différente sur les stratégies de navigation de nos microdrones, ce qui permettrait aussi de mieux comprendre le vol des abeilles. L'abeille a été choisie comme modèle d'inspiration, car les études perceptivo-motrices sont nombreuses et leurs capacités de navigation sont tout à fait impressionnantes compte tenu de leur taille.

La suite de cette thèse est constituée de cinq chapitres : le premier chapitre développe le contexte biologique et robotique liée à ce travail de thèse, mais développe aussi les contraintes existantes dans le domaine émergent de la microrobotique aérienne ; le chapitre 2 aborde l'approche d'une perception imitant certaines caractéristiques optiques de l'œil de l'abeille par le biais d'un capteur basse résolution auto-adaptatif bio-inspiré. Ce chapitre développe l'identification des caractéristiques et des capacités de ce capteur ainsi que la façon de traiter les données brutes afin d'extraire l'information pertinente pour des tâches de navigations de microdrone ; le chapitre 3 est consacré à la simulation d'une stratégie de navigation observée chez les insectes volants dans un tunnel, en collaboration avec des recherches connexes menées au laboratoire sur le contrôle évènementiel ; le chapitre 4 traite de la conception d'une micro-plateforme robotisée volante pour l'implémentation de la perception et des stratégies de navigations bio-inspirées ; enfin le chapitre 5 conclut sur les apports scientifiques de cette thèse en Biorobotique et explore les perspectives d'évolutions ouvertes par les expériences des précédents chapitres.

Chapitre 1

Contexte et enjeux des recherches en robotique bio-inspirée

Sommaire

1.1	Bioinspiration et couplage perception action dans le monde vivant	6
1.2	Contraintes inhérentes à la microrobotique aérienne	13
1.2.1	Les difficultés matérielles	13
1.2.2	Les limites de la navigation	14
1.3	Les différents microdrones en robotique	18

1.1 Bioinspiration et couplage perception action dans le monde vivant

Peut-on voler la nuit au clair de lune ? Ceci pourrait paraître contre nature pour un bon nombre de petits animaux volants tels que les abeilles qui doivent chercher le nectar des fleurs et le ramener à la ruche ! Pourtant la *Megalopta Genalis*, abeille nocturne présente notamment au Panama, effectue cette prouesse quotidiennement [Baird et al., 2011] grâce à une adaptation de son style de vol et de sa perception au milieu nocturne.

La Nature est une source d'étonnement qui paraît inépuisable. Actuellement, les insectes volants inspirent de plus en plus la microrobotique aérienne, et pour cause ; le contrôle d'attitude, la maîtrise et la précision de vol de la plupart des insectes (e.g. mouches, abeilles, libellules) sont pour l'instant non-reproductible par des créations technologiques humaines de taille équivalente. Certains insectes, comme l'abeille *Apis Mellifera*, ont la capacité de se poser et de repartir du plafond [Evangelista et al., 2010]. Elles sont aussi capables de naviguer sur plusieurs kilomètres à travers une forêt entre leur ruche et une source de nectar sans se perdre, et tout cela sans GPS¹. Les libellules, quant à elles, sont capables d'intercepter leurs proies en plein vol en moins de 200 ms avec un taux de réussite de 97% [Olberg et al., 2000, Olberg, 2012]. Pour réaliser ces prouesses, ces animaux utilisent essentiellement leur système visuel. La vision est un sens commun, en effet, environ 96% des espèces animales connues à ce jour possèdent un système visuel [Fernald, 2004].

Chez beaucoup d'espèces animales, les capacités et les déplacements observés sont souvent issus de l'utilisation d'informations multisensorielles (e.g. provenant de l'ouïe, du toucher, de la vue...). Toutefois, comme il a été montré chez les insectes volants, le système visuel est prépondérant dans la perception de leur environnement et de leur capacité à voler [Goulard et al., 2015, Goulard et al., 2016].

La perception visuelle d'un individu au sein d'un environnement en mouvement implique la perception du mouvement. Dans l'approche écologique de la perception et de l'action, James J. Gibson indique qu'un individu (agent) est indissociable de son environnement. Ces relations mutuelles entre agent et environnement sont marquées par une circularité : les modifications de l'environnement influencent les actions de l'agent et ses actions modifient l'environnement. Ainsi l'agent perçoit des informations présentes dans son environnement et utilise ces informations pour effectuer des déplacements grâce à des lois de contrôle dites perceptivo-motrices [Gibson, 1950, Gibson, 1979]. Les transformations de la scène optique s'appellent flux optique et se caractérisent par un champ vectoriel rendant compte des changements spatio-temporels qui s'opèrent dans

1. Global Positioning System

l'environnement.

Dans la répartition du flux optique, deux types de mouvements sont à distinguer. L'observation d'un champ vectoriel issu d'une rotation pure permet d'identifier deux vecteurs nuls donnant l'axe de rotation (Fig. 1.1a, b). Lors d'une translation pure, on distingue dans la direction du déplacement le vecteur nul du foyer d'expansion à partir duquel le flux optique augmente en suivant une fonction sinus puis diminue pour revenir à un vecteur nul au foyer de contraction (Fig. 1.1c, d).

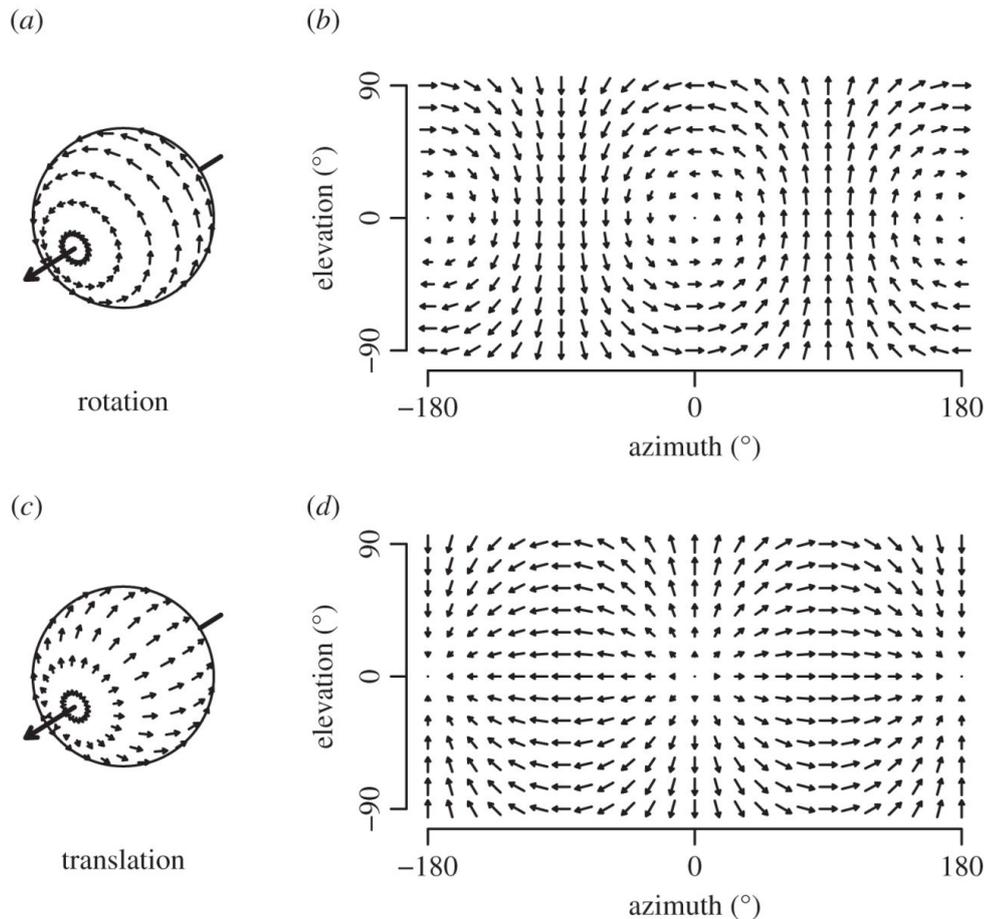


FIGURE 1.1: a) répartition des vecteurs de flux optique sur une sphère lors d'une rotation pure en roulis d'un observateur, b) même résultat représenté sur le plan de Mercator. c) répartition des vecteurs de flux optique lors d'une translation pure vers l'avant et son champ de vecteurs en d) représenté sur le plan de Mercator. Adapté de [Karmeier et al., 2003]

Lorsque l'environnement présente différentes distances aux objets observés, on note que la répartition du flux optique est modulée en fonction de la proximité aux objets comme schématisée sur la Fig. 1.2, mais seulement lorsque le mouvement à une composante de translation. Lors d'une rotation pure, cet effet est inexistant. Lorsqu'un observateur en translation pure oriente son regard à la perpendiculaire de son axe de translation (azimut à 90° ou -90° Fig. 1.1c, d) le flux optique est à son maximum, quelle que soit l'élévation. Or dans un environnement où des

objets se trouvent à différentes distances, ce même observateur remarquera une diminution du mouvement apparent des objets proportionnellement à la distance à laquelle ils se trouvent pour un même azimut (variation visible sur les vecteurs de flux optique se trouvant sur le segment rouge Fig. 1.2b). En d'autres termes, plus un objet se situe loin de l'observateur et plus le flux optique qu'il génère sera faible.

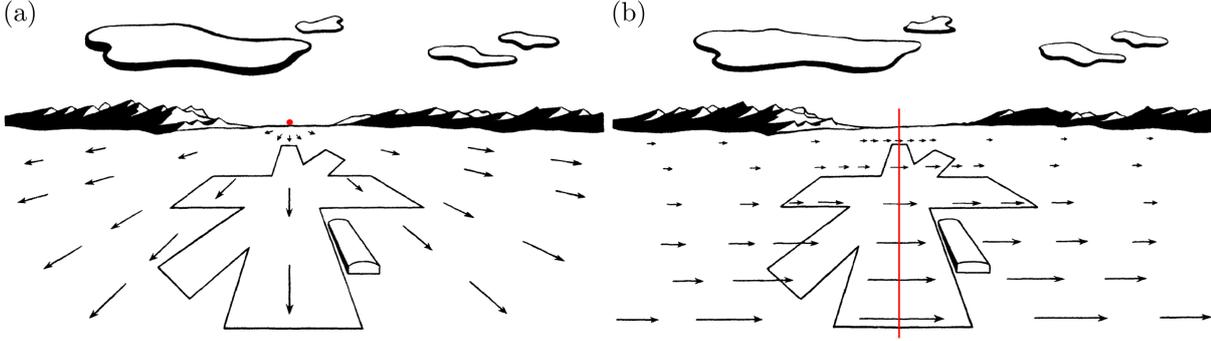


FIGURE 1.2: a) Champs de vecteurs perçus par un aéronef qui se déplace au-dessus d'une piste d'aéroport en direction de l'horizon au centre de l'image, le foyer d'expansion (vecteur nul) du champ de vecteurs correspond à cette direction de déplacement (point rouge). b) même scène, mais cette fois le déplacement se fait vers la gauche. Adapté de [Gibson, 1979]

Pour une translation pure, le flux optique noté $\vec{\omega}_T$ est défini par l'équation suivante :

$$\vec{\omega}_T = -\frac{\vec{V} - (\vec{V} \cdot \vec{d}(\Psi, \Theta)) \cdot \vec{d}(\Psi, \Theta)}{D(\Psi, \Theta)} \quad (1.1)$$

Où \vec{d} est le vecteur unitaire orienté vers la direction pointant vers l'objet (Fig. 1.3), \vec{V} est le vecteur vitesse de translation par rapport à l'objet et $D(\Psi, \Theta)$ est la distance de l'objet perçu [Nakayama and Loomis, 1974, Lee, 1976a, Koenderink and van Doorn, 1987].

Pour simplifier, en 2 dimensions, le flux optique de translation ω_T d'un objet visé dépendra de la vitesse linéaire V , de la distance D_φ de l'objet visée et de l'angle φ entre la direction de déplacement et de la direction de l'objet visé :

$$\omega_T = \frac{V}{D_\varphi} \sin(\varphi) \quad (1.2)$$

Cette mesure de flux optique dépend donc de la vitesse de déplacement, de la direction visée et de la proximité des objets.

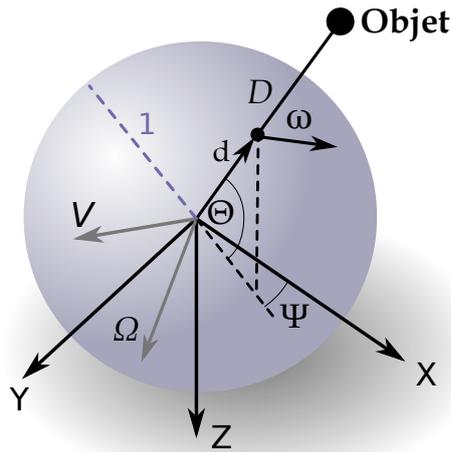


FIGURE 1.3: La direction de la mesure de flux optique est indiquée par le vecteur unitaire \vec{d} , qui est une fonction de l'angle d'azimut Ψ et de l'angle d'élévation Θ . La distance de l'objet suivant la direction $\vec{d}(\Psi, \Theta)$ est notée $D(\Psi, \Theta)$. Le vecteur de flux optique $\vec{\omega}$ est tangentiel à la surface de la sphère, représenté ici par une sphère de rayon unité pour simplifier la représentation graphique. Les vecteurs \vec{V} et $\vec{\Omega}$ représentent respectivement la translation et la rotation du regard par rapport à l'objet. Adapté de [Zufferey and Floreano, 2004].

D'après l'approche Écologique de la perception et de l'action, le flux optique permet la perception du mouvement d'éléments présents dans l'environnement et/ou de l'agent. Elle permet aussi la perception de l'organisation statique de l'environnement lorsque l'agent est en mouvement. Cette perception directe ne nécessite pas d'enrichissement (i.e., informations supplémentaires mémorisées permettant la reconnaissance de la scène observée). L'illusion d'optique "Ames Room" présentée sur la figure 1.4 ne permet l'observation de la scène que d'un point de vue fixe et unique (e.g., la prise de vue photographique pour vous, lecteur, ou à travers un trou pour les observateurs de cette expérience).

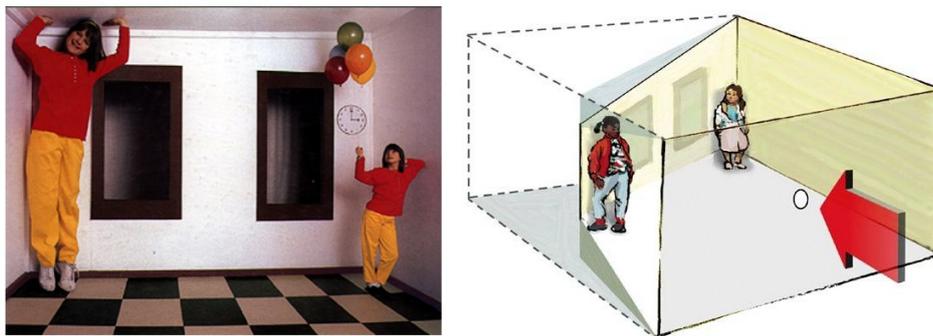


FIGURE 1.4: Illusion "Ames Room" ou chambre d'Ames. À gauche une photo prise à partir du point d'observation pointé par la flèche rouge du schéma de droite. Tirée de [IllusionWorks, 1997]

Elle met ainsi en évidence notre capacité à enrichir, si nécessaire, notre perception pour

interpréter la scène (e.g., perspective, carrelage censé être un damier régulier, fenêtre censée être de même taille) et dans ce cas créer une ambiguïté sur la taille des personnes se trouvant sur cette photo. Si un observateur doté seulement d'une perception de flux optique sans enrichissement était en mouvement devant cette scène, il apprécierait correctement l'organisation spatiale de celle-ci sans illusion. C'est sur cette base de perception visuelle directe du flux optique que repose l'approche définie par James J. Gibson [Gibson, 1950, Gibson, 1979].

L'œil est un organe sensible à la lumière et il existe sous différentes structures dans le règne animal. L'œil de l'Homme, par exemple, peut se résumer à un cristallin et une cornée qui jouent le rôle de lentille pour l'ensemble des 126 millions photorécepteurs tapissant la rétine de l'œil.

Chez l'insecte, l'œil à facettes ou œil composé possède plusieurs petits yeux élémentaires appelés ommatidies. Ces ommatidies sont composées d'un ou plusieurs photorécepteur(s) surmonté(s) d'une cornée et d'un cône cristallin (Fig. 1.6) [Franceschini and Kirschfeld, 1971, Wakakuwa et al., 2005]. Le nombre d'ommatidies varie selon les espèces, allant de plusieurs dizaines à environ 30 000 milles chez la libellule [Sherk, 1978]. L'abeille, quant à elle, possède pour chaque œil plusieurs milliers de ces ommatidies (Fig. 1.5).



FIGURE 1.5: Photographie de la tête d'une Abeille *Megachile Fortis* prise par l'USGS² Bee Inventory and Monitoring Lab.

Les propriétés et la répartition spatiale de ces ommatidies peuvent varier selon la région de l'œil avec différentes spécialisations perceptives. Chez l'abeille, il existe des spécialisations sur la reconnaissance de motif, la détection de l'angle de polarisation de la lumière, la reconnaissance des

2. USGS : United States Geological Survey (Institut d'études géologiques des États-Unis)

couleurs (bleu, vert et ultraviolet) [Wakakuwa et al., 2005] ou encore la perception du mouvement relatif de l'environnement (flux optique) relié au canal vert.

Ici, nous nous intéressons particulièrement à la mesure du flux optique, car celle-ci est largement impliquée dans la réalisation des déplacements. Cette mesure est conditionnée par la résolution spatiale de l'œil, mais surtout par la fréquence de stimulation aussi appelée fréquence vacillante de fusion du clignotement ou F.F.F. (Flicker Fusion Frequency) qui, de manière triviale, correspond au seuil de fréquence à partir duquel des images successives sont perçues comme un défilement continu. Chez la plupart des animaux, c'est essentiellement le haut niveau de la fréquence de fusion qui conditionne le haut degré de sensibilité au mouvement.

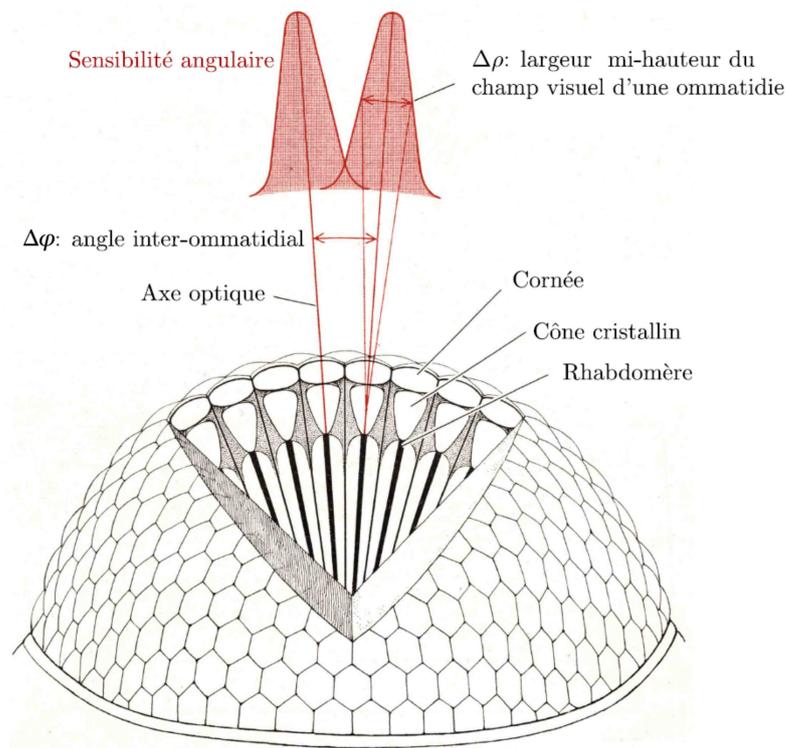


FIGURE 1.6: Structure de l'œil composé de l'insecte représentant ses caractéristiques optiques telles que l'angle inter-ommatidial $\Delta\varphi$ et la largeur de la courbe de sensibilité angulaire $\Delta\rho$. Adapté à partir de [Horridge, 1977].

L'abeille possède une fréquence de fusion de 300 Hz alors que celle de l'Homme est à peine de 20 Hz [Mukul Sarkar, 2013]. L'abeille a donc une bande passante temporelle 15 fois plus importante que celle de l'Homme. Deux autres paramètres de l'œil composé vont nous intéresser, ceux-ci sont les propriétés optiques des ommatidies, car ils conditionnent la perception du mouvement tout comme la fréquence de fusion. Le premier paramètre est l'angle inter-ommatidial noté $\Delta\varphi$ (Fig. 1.6) qui correspond à l'échantillonnage spatial et donc la densité de photorécepteurs dans un champ visuel. Chez les insectes, cet angle est généralement compris entre 1° et

3°. Cependant, selon le type d'espèces, prédateur ou non, cet angle peut être différent. Un faible angle inter-ommatidial (haute densité de photorécepteurs) permet une vue très précise spatialement. Elle sera utile, par exemple, pour des prédateurs ayant le besoin d'identifier leur proie à longue distance et éviter de se faire repérer. Les *odonates* (libellules), prédateurs de petits insectes (e.g. moucheron, moustique, etc.) possèdent, par exemple, un angle inter-ommatidial de 0,24°. Alors que chez les coléoptères, principalement non prédateurs, l'angle inter-ommatidial peut atteindre les 5°, et même plusieurs dizaines de degrés pour les *Apterygota*, insectes non ailés primitifs [Land, 1997].

Cet angle peut aussi être non uniforme au sein d'un même individu, chez l'abeille, l'angle inter-ommatidial horizontal augmente en allant de l'avant vers l'arrière [Land and Nilsson, 2012, Cronin et al., 2014] car les besoins ne sont pas les mêmes selon les directions observées. Par exemple, les mesures de flux optique proches du centre d'expansion (vers l'avant, dans la direction de déplacement), sont de plus faibles amplitudes (Fig. 1.1a) et nécessitent d'avoir une meilleure résolution spatiale pour mesurer le flux optique précisément. Le deuxième paramètre, noté $\Delta\rho$, est l'angle d'acceptance ou de sensibilité angulaire (Fig. 1.6). Cet angle est souvent représenté par la largeur à mi-hauteur de la sensibilité gaussienne d'un photorécepteur, ici l'ommatidie. Plus cet angle est grand et plus l'image perçue sera floue. Chez l'abeille, cet angle est selon la région de l'œil composé, d'environ 1,9°, et joue le rôle de filtre spatial passe-bas permettant de supprimer les détails visuels superflus. Cela permet ainsi d'éviter le phénomène de recouvrement de spectre lors de la transformation spatio-temporelle des signaux photorécepteurs.

Il existe d'autres paramètres visuels qui entrent en compte dans la compréhension de la perception des insectes. On peut citer l'hyperacuité, qui permet de percevoir des détails au-delà de la résolution structurelle de l'œil composé par la vibration du système visuel [Westheimer, 2009, Viollet, 2014, Rigosi et al., 2017]. Quoi qu'il en soit, l'abeille qui ne mesure environ qu'un centimètre de long, d'une masse d'environ 100 mg, possédant moins d'un million de neurones, utilisant principalement un système visuel d'une apparente faible résolution spatiale et d'une perception "floue" de l'environnement, surmonte le défi de la navigation aérienne longue distance incluant toutes les contraintes que cela implique !

1.2 Contraintes inhérentes à la microrobotique aérienne

Les plateformes robotiques et la navigation aérienne ont chacun leurs propres contraintes fortes et représentent un réel défi technologique et scientifique. Les microdrones sont des plateformes robotiques particulièrement contraignantes du point de vue de leur envergure, leur masse et leur autonomie respectivement inférieure à 0,15 m, inférieure à 100 g et supérieure à 15 min. Ces plateformes doivent également être dotées d'un système de perception de l'environnement leur permettant de les rendre les plus autonomes possible face aux variations environnementales (e.g., luminosité, température, objets en mouvement, vent, etc.) [Serres et al., 2017].

1.2.1 Les difficultés matérielles

Les principales contraintes inhérentes à la microrobotique peuvent venir des difficultés d'intégrations des composants, des contraintes mécaniques et du prototypage. Mais l'autonomie énergétique est une difficulté récurrente et bien connue. Malgré les récentes avancées sur la densité énergétique et la baisse du coût, qui ont notamment permis la démocratisation des drones grand public d'aujourd'hui (Fig. 1.7), l'autonomie de vol des drones reste un facteur limitant. Il semble aussi que le niveau d'autonomie du drone soit directement lié à sa taille. Par exemple, les maxima observés sur les drones commerciaux d'environ 1 kg vont jusqu'à 30 min d'autonomie de vol (e.g., le DJI[©] Mavic Pro). À l'inverse, pour les drones de moins de 100 g, leur autonomie atteint difficilement les 10 min de temps de vol (e.g., le Parrot[©] MAMBO MISSION).

L'autonomie d'un microrobot aérien semble donc dépendre de sa taille, mais il est évident que c'est en réalité un dilemme entre capacité d'accélération, poids à vide/charge utile, type de vol (agressif ou stationnaire). La miniaturisation rend ce dilemme plus grand encore.

Pour se confronter à ces contraintes et dans un but de recherche, les drones commerciaux ne sont pas la seule option de plateformes. En effet, le monde de l'open-source/open-hardware offre la liberté du sur-mesure, de la modification et de l'intégration de prototypes utiles pour explorer de nouvelles pistes et solutions.

Les contraintes inhérentes à la microrobotique aérienne dans le milieu de la recherche impliquent une grande rigueur, car chaque panne, chaque erreur, peut coûter cher en temps et en argent. Les expérimentations ont une mise en place relativement longue et nécessitent des phases de préparation et phases de pré-vol³. La faible autonomie de vol implique aussi des expérimentations de vol plus courtes et fastidieuses. Enfin, le compromis entre robustesse et légèreté peut impliquer une certaine fragilité de la structure qui, lors d'un incident de vol, sera souvent

3. Phases de pré-vol présentes dans beaucoup de milieux aériens : aviation, parapente, parachutisme, etc.

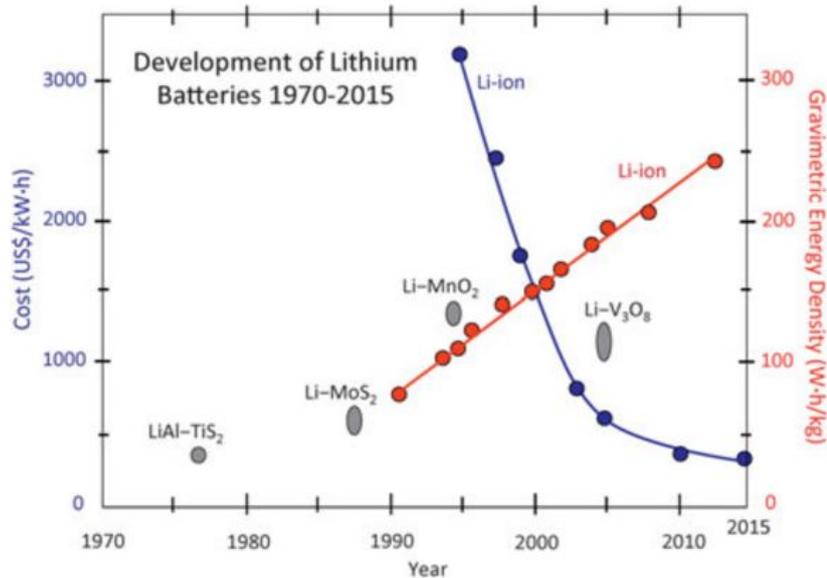


FIGURE 1.7: Développement des batteries lithium sur la période de 1970-2015. En bleu le coût énergétique et en rouge la densité énergétique depuis la commercialisation de la première batterie li-ion par Sony en 1991. Tirée de [Crabtree et al., 2015].

synonyme de crash et de dégâts matériels. Tous les éléments cités ci-dessus liés à la plateforme matérielle sont à prendre en compte et nécessitent d’être maîtrisés pour mieux comprendre les limites des tâches qui y seront implémentées.

1.2.2 Les limites de la navigation

En robotique autonome aérienne, toutes informations de l’environnement prélevées au travers de capteurs sont potentiellement exploitables. Pour mieux appréhender l’utilité de ces informations dans un déplacement autonome, une organisation en niveaux de contrôles est proposée ci-dessous, avec une notion à garder en mémoire : il existe la redondance ou bien encore l’intégration multisensorielle pouvant apporter des informations utiles dans un ou plusieurs niveaux de contrôles.

Contrôle d’attitude : ce premier asservissement est utilisé pour stabiliser le vol. Il s’appuie fréquemment sur des informations provenant de capteurs inertiels (i.e., accéléromètres, gyroscopes, gyromètres), qui sont semblables au fonctionnement de notre oreille interne (i.e., otolithes et canaux semi-circulaires). Certains travaux ont permis d’effectuer cette tâche en remplaçant l’information inertielle par de l’information visuelle [Expert and Ruffier, 2015b, Taylor et al., 2003, Yigit and Altug, 2012, Shabayek et al., 2012, Demonceaux et al., 2007], mais ceci peut créer un lien de dépendance avec les conditions environnementales dans lesquelles ces systèmes

fonctionnent (e.g., manque de luminosité, absence de contraste, forte variation lumineuse, etc.).

Ces informations permettent, par des boucles d'asservissement et en fonction des actionneurs disponibles, de contrôler le roulis, le tangage et le lacet du drone. Les capteurs inertiels disponibles sur le marché confèrent de nombreux avantages. Ils sont peu chers, facilement intégrables (quelques millimètres de côté), sont peu consommateurs d'énergie (de l'ordre du milliwatt) et fonctionnent à des fréquences relativement élevées (plusieurs centaines de Hz). De plus, les centrales inertielles ont peu de dépendances aux conditions environnementales, hormis la gravité terrestre. De ce fait, elles semblent parfaitement adaptées aux microdrones. Grâce à ce type de capteur à haute fréquence, un microdrone peut être réactif et adopter un comportement de vol à la fois agressif et parfaitement contrôlé (e.g., virages serrés, rejet de perturbations externes, fortes accélérations, loopings, etc.).

Contrôle de position et de vitesse : cet asservissement permet à l'aéronef de contrôler sa position dans un référentiel donné. Un récepteur GPS, par exemple, permet en extérieur de recevoir les signaux radio émis par une constellation de satellites dédiée et, par trilatération, de déduire la position du récepteur dans le référentiel terrestre. Des systèmes équivalents de trilatération ou triangulation en extérieur et en intérieur utilisent des balises radio ou ultrasonore à différentes positions connues pour que l'aéronef déduise ses coordonnées relatives ou absolues. Mais ces systèmes, au même titre que le GPS, nécessitent des installations émettrices externes construites par l'Homme. Cela remet en cause la notion d'autonomie en vol du drone, car les informations sont tirées d'un environnement très particulier, extrêmement dépendant de l'activité humaine. Pour obtenir une réelle autonomie qui pourrait, par exemple, résister à une panne générale du système de localisation émissif, l'aéronef ne doit pas dépendre d'émissions artificielles externes. Dans ce dernier cas, les solutions courantes utilisent des capteurs émissifs (e.g., ultrason, laser, infrarouge, etc.) afin de mesurer les distances aux objets présents dans l'environnement. Ils sont simples d'utilisation et offrent souvent l'information de façon directe. Malheureusement, les inconvénients des capteurs émissifs embarqués sont nombreux. Ils rendent facilement détectable l'aéronef et présentent un risque de perturbations par des plateformes robotiques à proximité utilisant des capteurs émissifs aux mêmes fréquences. De plus, ils consomment de l'énergie pour émettre leurs signaux et sont rarement suffisamment compacts pour être embarqués sur des microdrones.

Les solutions non émissives les plus courantes consistent à capter l'émission lumineuse naturelle via des capteurs visuels. Il est ainsi possible, à l'aide d'une caméra embarquée, de détecter et de traquer des points caractéristiques de l'environnement et ainsi de mesurer les variations de

positions relatives à ces points. Mais ces systèmes monoculaires rendent difficile l’appréciation des profondeurs et nécessitent d’être en mouvement pour les déterminer. Les systèmes stéréoscopiques offrent plus de précisions pour la perception de l’environnement en 3 dimensions, même en l’absence de mouvement. Pour cela, ces systèmes mesurent la parallaxe⁴ entre les images acquises par deux caméras observant la même scène. Des systèmes hybrides existent afin d’apporter plus d’informations et de précisions avec, par exemple, une stéréoscopie partielle et de la mesure du flux optique pour obtenir de meilleures précisions odométriques [Strydom et al., 2014]. Il est aussi possible d’utiliser des objectifs radicalement différents (i.e., objectif de perspective classique et objectif fish-eyes⁵) [Eynard, 2011, Eynard et al., 2012] ou même des capteurs aux sensibilités spectrales différentes (i.e., spectre visible et infrarouge) afin d’obtenir des sensibilités différentes aux textures, aux températures et à la lumière naturelle [Krotosky and Trivedi, 2007, Bonardi et al., 2017].

Le contrôle de vitesse, quant à lui, peut s’effectuer de manière simple en dérivant des mesures de positions successives. Mais il est aussi utile, dans certains cas, d’utiliser des capteurs de flux d’air (e.g., anémomètre, tube Pitot) pour mesurer la vitesse de déplacement dans l’air et donc de se détacher d’un référentiel terrestre [Zufferey et al., 2007a, Beyeler et al., 2009, Expert and Ruffier, 2015a]. Les mesures de flux optique, quant à elles, apportent de l’information de vitesse linéaire puisque ces mesures y sont sensibles (Eq. 1.1). Mais cette mesure est le résultat d’un couplage entre la vitesse de déplacement et la distance aux objets, ce qui donne, dans le champ visuel, uniquement une vitesse optique angulaire [Serres and Ruffier, 2017]. Le flux optique est, de façon triviale, une représentation du danger de la configuration optique de l’environnement. En effet, plus le flux optique est important, dans une direction donnée, et plus le danger dû à la vitesse et à la proximité d’un obstacle se trouvant dans cette direction est important. Il faut évidemment prendre en compte la répartition du flux optique d’une translation pure (Fig. 1.1c, d). De plus, il est nécessaire de supprimer la composante de rotation du flux optique inutile pour la mesure du couple vitesse/distance (Fig. 1.1a, b). Cette composante de rotation peut être simplement supprimée en soustrayant les données inertielles issues d’un gyromètre aux mesures de flux optique [Zufferey and Floreano, 2004].

Au même titre que pour le contrôle d’attitude, plus l’information est disponible à haute fréquence (i.e., capture et traitement), plus les boucles d’asservissements seront exécutées fréquemment et meilleur sera le temps de réaction du microdrone. Le contrôle de position à haute fréquence permet d’augmenter les vitesses de déplacement et de diminuer les distances de sécurité

4. Incidence du changement de position de l’agent sur l’observation de son environnement.

5. Objectif à très courte focale et donc un angle de champ très grand.

avec les obstacles, dans la limite des capacités du contrôle d'attitude.

Contrôle de trajectoire et navigation : la navigation effectuée à l'aide de capteurs non-émisifs utilise communément des caméras de haute définition. Des processus lourds utilisent des systèmes monoculaires ou stéréoscopiques pour cartographier en 3 dimensions l'environnement qui permettent de se localiser à l'intérieur de celui-ci. Ce processus appelé SLAM⁶ existe aussi avec beaucoup de variantes, par exemple, en effectuant une fusion avec des données inertielles pour augmenter la précision [Nikolic et al., 2014].

Classiquement, dans l'approche du SLAM, l'environnement est perçu finement par une ou plusieurs caméras de hautes résolutions (e.g., plusieurs centaines de milliers de pixels). Cela permet de détecter les obstacles de manière précise et à longue distance. Une planification de trajectoire à long terme peut être ainsi faite, mais le flot de données généré par tous ces pixels implique une grande puissance de calculs pour traiter ces informations à haute vitesse. Un micro-drone ne peut pas embarquer des unités de calculs aussi puissantes, ce qui limite drastiquement la vitesse d'acquisition à quelques images par seconde pour que le flux de données soit traité correctement [Heng et al., 2014].

Pour diminuer le flot de données et augmenter la vitesse de traitement sur des micro-plateformes peu puissante, il est préférable de diminuer la résolution des capteurs. Par exemple, le capteur à vision stéréoscopique de 4 g utilisant 2 caméras de moins de 13 000 pixels chacune [McGuire et al., 2016a] permet un fonctionnement à 25 Hz. On obtient des contrôles de trajectoires à court terme sur de courtes distances, mais cette diminution de la résolution est indispensable pour aller vers une navigation avec des déplacements vifs, dans un environnement dans lequel de nombreux obstacles sont présents.

Pour un microdrone d'une puissance de calculs donnée, on peut arbitrairement différencier deux tendances dans la perception visuelle artificielle. La première tente d'optimiser l'acquisition d'informations riches au travers de capteurs visuels haute définition afin de planifier des stratégies de navigations à long terme. Cependant cette forte résolution se fait au détriment de la réactivité du microdrone, limitée par l'imposant flux de données à traiter. Ces contraintes de calculs limitent la miniaturisation d'un microdrone [Heng et al., 2011, Scaramuzza et al., 2014]. La deuxième tendance, moins souvent explorée, s'oriente vers des capteurs basses résolutions pour la planification de navigation à court terme, plus légère en puissance de calculs et autorisant la miniaturisation. La diminution de la résolution des capteurs visuels à leur minimum peut aussi permettre d'augmenter la fréquence de fonctionnement et la réactivité du système.

6. Simultaneous Localization And Mapping (localisation et cartographie simultanées)

Des expériences vont jusqu'à utiliser 4 capteurs de seulement 2 pixels pour une navigation en 2 dimensions [Roubieu et al., 2012].

Les recherches en microdrones autonomes restent peu nombreuses, mais théoriquement, les solutions avec une basse résolution permettront toujours une meilleure miniaturisation grâce à leur légèreté et à leur sobriété de fonctionnement (e.g., énergie et ressource calculatoire).

1.3 Les différents microdrones en robotique

De nombreuses réalisations provenant de laboratoires académiques de recherche tentent d'allier miniaturisation, autonomie et performance sur des plateformes robotisées aériennes. Ces réalisations peuvent être regroupées en 3 catégories de voilure : les microdrones à voilures fixes, ceux à voilures tournantes et ceux à ailes battantes.

Une particularité du vol est qu'il est holonome, ainsi toutes les translations et les rotations sont possibles, qu'elles soient subies (e.g., vent, turbulence, etc.) ou voulues (e.g., par des moteurs, ailerons, etc.). Toutefois, il est difficile d'actionner tous ces degrés de liberté. La plupart des modèles de robots aériens sont donc sous-actionnés car les translations et rotations ne sont pas indépendantes (il est nécessaire, par exemple, de tourner pour changer de direction de déplacement).

Nous pouvons citer, dans la catégorie des microdrones à voilure fixe, l'avion miniature Micro-Celine MC2 avec une masse de seulement 10 g qui lui permet de voler en intérieur à une vitesse $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ (Fig. 1.8a). Celui-ci est équipé d'un anémomètre et de capteurs de flux optique de quelques dizaines de pixels qui lui permettent de se déplacer en semi-autonomie dans une pièce texturée et d'éviter les collisions avec les murs [Zufferey et al., 2007a].

On peut également citer une aile volante équipée du pilote automatique *OptiPilot* (Fig. 1.8b). Cette aile est équipée d'un tube Pitot et de 7 capteurs de flux optique de 0.8 g basés sur des capteurs optiques de souris d'ordinateur pour naviguer et éviter les obstacles [Beyeler et al., 2009].

Les solutions à voilures fixes imposent une vitesse minimale pour voler, ce qui ne semble pas adapté aux milieux intérieurs exigus, même si le travail sur leur miniaturisation permet d'obtenir des vitesses de vol plus faibles et ainsi d'accéder plus facilement aux espaces intérieurs.

Pour les drones à voilures tournantes, on trouve par exemple un quadrirotor de 278 g (Fig. 1.9) équipé de 8 capteurs de flux optique permettant de stabiliser un vol et d'augmenter la précision des estimations de déplacement grâce à la fusion des données inertielles et des mesures de flux optique [Briod et al., 2016]. Il existe aussi un micro hélicoptère de 30 g à 2 rotors contre-

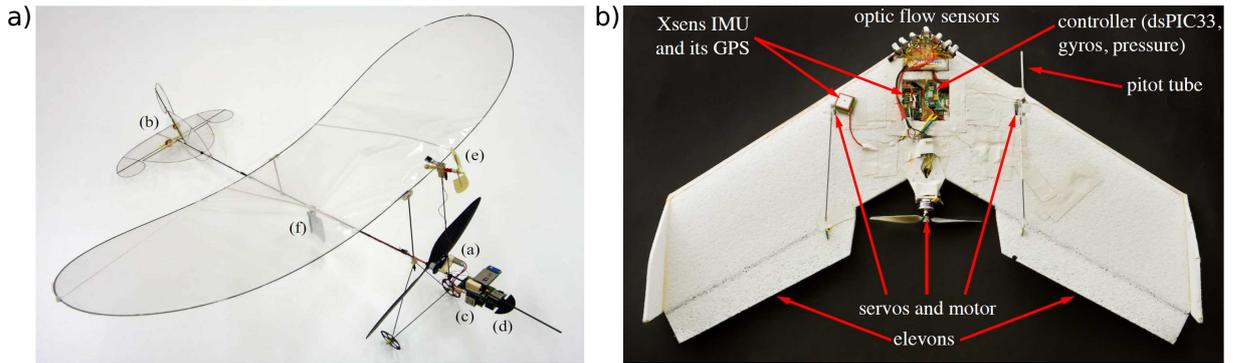


FIGURE 1.8: a) Avion miniature MicroCeline MC2, d'une masse de 10,3 g et dont l'autonomie peut atteindre 10 min en vol en intérieur. Moyenne de consommation de 1 W, en embarquant une batterie lithium polymère de 65 mAh, un microcontrôleur, un module Bluetooth, deux caméras CMOS 1D de 20 pixels chacune. Tirée de [Zufferey et al., 2007a]. b) Aile volante utilisant le pilote automatique *OptiPilot* pour une masse de 407 g et une envergure de 0,8 m. Il possède une vitesse maximum de 20 m.s^{-1} et une autonomie de 30 minutes. Tirée de [Beyeler et al., 2009].

rotatifs (Fig. 1.10) embarquant un capteur panoramique de flux optique dans le plan horizontal. Celui-ci permet de naviguer dans un corridor grâce à du traitement d'image et du calcul de flux optique [Moore et al., 2014]. Récemment, un capteur de 4 g permettant une vision stéréoscopique et la mesure de flux optique a été embarqué sur un microdrone de 40 g [McGuire et al., 2017a] (Fig. 1.11). Grâce à ce dispositif, le drone peut naviguer en environnement intérieur et éviter les obstacles se trouvant sur son chemin en utilisant moins de 25 000 pixels avec une très faible puissance de calculs pour exécuter un algorithme appelé Edge-FS [Moore et al., 2014].

L'inconvénient de ces plateformes autonomes est qu'elles sont limitées à des dynamiques de vol non agressives par la fréquence de rafraîchissement relativement faible de leurs capteurs de l'ordre de la dizaine de hertz. De plus, leur système visuel non découplé de la structure de propulsion se trouve perturbé par les rotations en roulis et tangage indispensables au drone pour se stabiliser et se déplacer.

Ces microdrones à voilures tournantes nécessitent généralement d'effectuer des rotations pour engager des translations. En effet, ces plateformes ne possèdent que 4 degrés de liberté commandables (i.e., roulis, tangage, lacet, axe vertical) sur les 6 existants. Par exemple, il est nécessaire d'actionner le roulis ou le tangage pour générer des translations sur les axes horizontaux. Des solutions sont en cours de développement pour proposer des plateformes permettant de découpler en partie les mouvements de rotation des mouvements de translation. Une première méthode consiste à actionner sur un axe horizontal les moteurs de la plateforme, permettant de modifier les axes de propulsion et par combinaison de ces axes, permettre à la plateforme des rotations indépendantes des translations [Ryll et al., 2016]. Ce système ajoute des contraintes mécaniques fortes à la structure et nécessite aussi un temps de réaction non négligeable lors de modifications

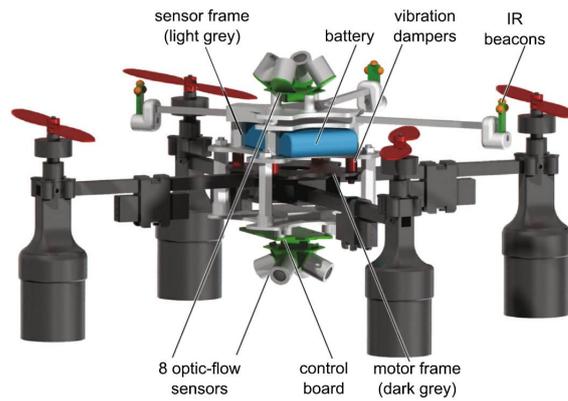


FIGURE 1.9: Quadrirotor de 278 g équipé de 8 capteurs de flux optique 2D de 0,65 g, échantillonnés à 25 Hz et d'une résolution de 30x30 pixels chacun (total de 7200 pixels). Tirée de [Briod et al., 2016].



FIGURE 1.10: Micro-hélicoptère de 30 g utilisant un capteur visuel omnidirectionnel de 2,6 g en forme d'anneau fonctionnant à 10 Hz. Celui-ci est composé de 8 caméras configurées pour délivrer des images de 16 x 16 pixels. Un total de 2048 pixels sont répartis sur un champ de vision de 360 x 60 degrés afin d'y calculer le flux optique. Tirée de [Moore et al., 2014].

de l'attitude en vol pour permettre aux rotors de changer de position angulaire. C'est pourquoi il est aussi proposé d'utiliser au moins 6 rotors déjà inclinés. Une telle configuration permet d'obtenir différentes orientations des poussées, ce qui est rendu possible en jouant sur l'amplitude des poussées pour découpler les différents degrés de liberté du drone [Rajappa et al., 2015].

Dans la catégorie des drones à ailes battantes, nous retrouvons le capteur stéréoscopique de 4 g qui était embarqué sur un quadrirotor de 40 g dans l'exemple précédent (Fig. 1.11), mais cette fois-ci, monté sur le DelFly Explorer [de Croon et al., 2012, De Croon et al., 2016, Fonville, 2016]. D'une masse de 30 g ce microdrone à ailes battantes peut décoller et voler en intérieur en parfaite autonomie jusqu'à 9 minutes.

Les capteurs visuels utilisés dans les exemples ci-dessus ont aussi un inconvénient majeur vis-à-vis de la luminosité ambiante. Ilsaturent facilement à de fortes variations lumineuses et

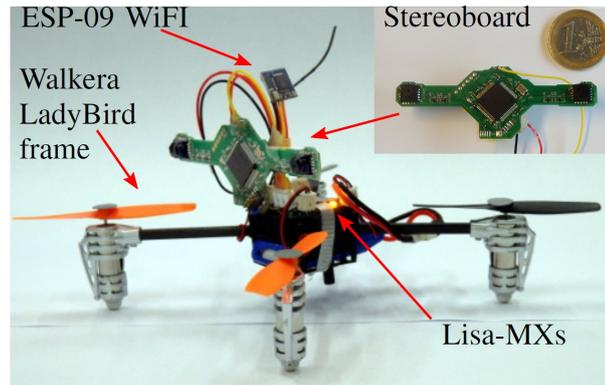


FIGURE 1.11: Quadrirotor de 40 g embarquant un capteur stéréoscopique de 4 g d’une résolution totale de moins de 25 000 pixels et fonctionnant à 20 Hz. Ce microdrone est capable d’effectuer des vols en intérieur de 2 minutes tout en évitement des obstacles. Tirée de [McGuire et al., 2017a].



FIGURE 1.12: Drone à ailes battantes Delfly explorer de 20 g capable de décoller et de naviguer de manière autonome en évitement des obstacles pendant 9 minutes. Tirée de [Fonville, 2016].

atteignent leurs limites rapidement face à l’obscurité. Récemment certains travaux ont tenté avec succès de contrôler des trajectoires en vol intérieur avec une vitesse de 1.7 m.s^{-1} (à 1 m de hauteur) dans un environnement obscur en utilisant une caméra à évènements [Vidal et al., 2018]. Toutefois, cette caméra de plus de 40 000 pixels fut utilisée sur un drone relativement volumineux et puissant en comparaison des solutions décrites précédemment.

L’utilisation d’un système visuel adapté à la plateforme volante est donc primordiale et nécessite d’être caractérisé le mieux possible pour en connaître toutes les possibilités et les limites.

Chapitre 2

Perception et calculs du flux optique

Sommaire

2.1	État de l'art	24
2.2	Perception par une rétine bio-inspirée auto-adaptative nommée M²APix	26
2.2.1	La rétine M ² APix	26
2.2.2	Calibration optique	27
2.3	Algorithmes de calculs de flux optique	30
2.3.1	Méthode par seuillage	31
2.3.2	Méthode par corrélation croisée	31
2.4	Performance des algorithmes et du capteur en présence de fortes perturbations lumineuses	33
2.4.1	Comparaison des méthodes sur bâches texturées défilantes	33
2.4.2	Comparaison en conditions de vol réel	39
2.5	Conclusion sur les apports pour les futures expériences de robotique bio-inspirée	44

2.1 État de l'art

Pour détecter et éviter les obstacles en environnement inconnu, les insectes volants utilisent principalement le flux optique [Srinivasan, 2011a]. Le flux optique est défini comme un champ de vecteurs de vitesses angulaires des points contrastés, de bords, ou de surfaces résultant du mouvement relatif entre l'observateur et les objets environnants [Gibson, 1950, Nakayama and Loomis, 1974]. Les stratégies des insectes volants basées sur le flux optique ont inspiré de nombreux développements d'auto-pilote intelligent pour les microdrones (ou MAV pour Micro-Air-Vehicles) [Srinivasan, 2011a, Franceschini et al., 2009, Serres and Ruffier, 2016] mais aussi pour les rétines artificielles capables de mesurer rapidement le flux optique [Moeckel and Liu, 2009, Expert et al., 2011, Roubieu et al., 2013, Floreano et al., 2013, Duhamel et al., 2013, Mafrica et al., 2015].

Les microdrones à l'échelle des insectes deviennent aussi une réalité [Duhamel et al., 2012, Kushleyev et al., 2013, Ma et al., 2013, Dunkley et al., 2014, Moore et al., 2014, Floreano and Wood, 2015] et devront dans un futur proche pouvoir embarquer des capteurs et des contrôleurs de vol leur permettant d'effectuer tout type de manœuvres en vol, incluant l'évitement d'obstacles, le suivi de parois, ainsi que l'atterrissage.

Les capteurs embarqués ne doivent pas seulement être non-émissifs pour permettre aux microdrones d'économiser leur énergie et augmenter leur autonomie de vol, mais aussi garantir un taux de rafraîchissement et une robustesse permettant des vols réactifs et sans incident. Le GPS est limité par ses résolutions spatiales ($\sim 1\text{ m}$) et temporelles ($\sim 7\text{ Hz}$), et ne permet que l'évitement d'obstacles répertoriés et immobiles. Les micros caméras sont souvent proposées dans les applications pour microdrones (e.g., camera PAL avec 720x576 pixels à 25 *fps* [Dunkley et al., 2014], ou camera CMOS avec 752x480 pixels à 80 *fps* [Liu et al., 2016]), souvent couplées à du traitement par SLAM (Simultaneous Localization And Mapping algorithms pour algorithmes de localisation et de cartographie simultanées).

Quelques caméras délivrent des informations fiables de flux optique et rapides mais restent encombrantes : (i) la camera CMOS PIX4FLOW qui avec ses 188x120 pixels délivre un vecteur de flux optique à une fréquence de 250 *fps* [Honegger et al., 2013], et (ii) la camera basée sur des événements (event-based) appelée Dynamic and Active-pixel VISION Sensor (DAVIS) dotée de 240x180 pixels délivre des mesures précises de flux optique de manière asynchrone [Brandli et al., 2014, Rueckauer and Delbruck, 2016]. L'inconvénient des caméras CMOS est qu'elles ont une mauvaise robustesse aux variations de conditions lumineuses (e.g., $\sim 600\text{ lux}$ dans [Honegger et al., 2013]) et leur nombre important de pixels demande des ressources calculatoires importantes.

Il est essentiel pour les microdrones d'utiliser des capteurs légers, à faible consommation et à haute vitesse pour répondre aux dynamiques de vols rapides et rester réactif dans des environnements imprévisibles. Les vols stationnaires requièrent une fréquence de rafraîchissement des mesures plus faible que des manœuvres d'évitement d'obstacles lors de vols à haute vitesse. Les centrales inertielles (IMU pour Inertial Measurement Units) sont utilisées pour stabiliser un microdrone en vol ou simplement faire du vol stationnaire avec des fréquences de rafraîchissement allant jusqu'à 500 Hz . Récemment, à la fois une IMU fonctionnant à 500 Hz et des mesures de flux optique faites à 25 Hz ont été fusionnées et utilisées avec un filtre de Kalman pour effectuer des vols stationnaires très robustes [Briod et al., 2016]. L'idée des auteurs était d'utiliser la direction du flux optique, sans son amplitude, pour corriger les dérives de l'IMU en particulier lors de changements de direction, et ainsi améliorer fortement la justesse du maintien de la position en vol stationnaire : cette stratégie permet de mettre à jour des boucles de contrôle d'attitude et de position à 100 Hz [Briod et al., 2016]. Dans une autre étude, un microdrone de 40 g effectue de l'évitement d'obstacles avec des valeurs de flux optique obtenues à une fréquence de 20 Hz [McGuire et al., 2016b]. Le taux de rafraîchissement des processus visuels semble un des paramètres clés pour effectuer des manœuvres de vol agressives avec des microdrones basées sur de la vision embarquée avec des capacités de réaction suffisante en environnement imprédictible [Falanga et al., 2016]. Plus généralement, les critères d'évaluation pour le potentiel des capteurs de flux optique pour microdrones incluent :

- la robustesse aux variations lumineuses, définie par le nombre de décades d'irradiance (en $W \cdot cm^{-2}$) dans lesquels le capteur visuel peut fonctionner,
- la gamme de vitesse angulaire de flux optique (ou amplitude) utilisable, définie par les valeurs minimales ω_{min} et maximales ω_{max} mesurées,
- la justesse et la précision, définies par l'erreur et le coefficient de variation C_v ,
- la fréquence de rafraîchissement des mesures de flux optique, définie par la fréquence de sortie instantanée f_{output} .

Récemment, un capteur de flux optique basé sur la rétine M²APix (Michaelis-Menten Auto-adaptive Pixel) a été développé au laboratoire et peut s'auto-adapter sur une gamme de 7 décades de luminosité et répond correctement à des variations instantanées d'éclairement jusqu'à 3 décades [Mafrica et al., 2016a]. Les pixels ne saturent pas grâce aux propriétés intrinsèques basées sur la normalisation de l'équation de Michaelis-Menten [Normann and Perlman, 1979]. C'est cette rétine aux propriétés inédites qui sera caractérisée, puis mise en œuvre à bord du robot.

2.2 Perception par une rétine bio-inspirée auto-adaptative nommée M²APix

2.2.1 La rétine M²APix

Dans la plupart des systèmes visuels de la faune, il a été observé que les photorécepteurs auto-adaptent leur réponse en fonction de la luminosité ambiante. Afin de suivre cette particularité biologique, la rétine choisie utilise ce même principe pour fonctionner dans la plus large gamme de luminosité possible et d'être robuste aux variations soudaines de luminosité.

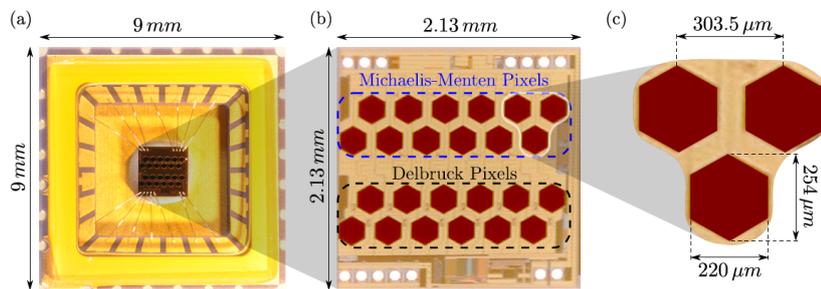


FIGURE 2.1: (a) Capteur M²APix dans son boîtier électronique. (b) Rétine composée de 12 pixels de Michaelis-Menten et 12 pixels additionnels de type Delbrück. (c) Vue de 3 pixels voisins. D'après [Mafrica et al., 2015]

Le capteur M²APix est une rétine composée de 2 groupes de pixels : 12 pixels de Michaelis-Menten et 12 pixels Delbrück (figure 2.1a,b). Ces deux groupes de pixels ont été à l'origine inclus dans le même package enfin d'effectuer une première expérimentation de comparaison de ces deux technologies à l'adaptation aux variations lumineuses [Mafrica et al., 2015]. Les 12 pixels Michaelis-Menten ayant obtenu de meilleurs résultats, ces derniers seront utilisés dans cette étude. Les 12 pixels sont répartis sur deux lignes de 6 pixels désalignées entre elles d'une demie distance inter-pixel (figure 2.1b).

L'adaptation des pixels est régie par l'équation de Michaelis-Menten [Michaelis and Menten, 1913] ce qui permet de normaliser la réponse des pixels par un signal qui est le résultat du filtrage passe-bas de la moyenne des 12 photorécepteurs. Un condensateur externe de 47 nF fixe la constante de temps d'adaptation des pixels qui, ici, est de 0.5 s.

Pour la suite de ce travail, la rétine M²APix sera utilisée en 1D dans la direction parallèle aux lignes de pixels, ce qui permet d'obtenir 10 mesures locales de flux optique (5 par ligne) notées OF_i sur la figure 2.2.

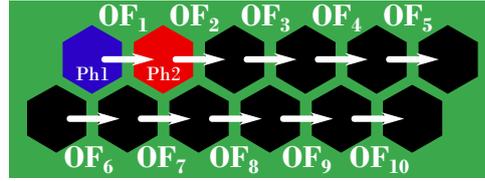


FIGURE 2.2: Représentation des 12 pixels de Michaelis-Menten de la figure 2.1b et des 10 mesures locales de flux optique correspondantes. D'après [Vanhoutte et al., 2017a].

2.2.2 Calibration optique

La rétine M²APix est insérée dans un boîtier sur lequel est montée une lentille prise d'une caméra Raspberry Pi d'une distance focale de 2 mm. Afin d'obtenir un filtrage spatial passe-bas semblable à celui observé chez certains insectes diurnes tels que l'abeille [Land, 1997], la lentille est volontairement défocalisée. Cette défocalisation entraîne la variation de deux paramètres : l'angle inter-pixel noté $\Delta\varphi$ et la largeur à mi-hauteur de la sensibilité angulaire gaussienne appelée angle d'acceptance $\Delta\rho$. Ces deux valeurs ont été ajustées grâce à un banc de calibration qui consiste à effectuer des rotations du capteur M²APix doté de sa lentille face à un contraste puis de mesurer la sensibilité et l'écart des réponses de chacun des pixels.

Les valeurs choisies pour les expériences de ce chapitre ont été : $\Delta\varphi = 4.3^\circ$ et $\Delta\rho = 3,0^\circ$, celles-ci respectent la règle établie pour l'échantillonnage visuel observé chez les insectes diurnes : $\frac{\Delta\rho}{\Delta\varphi} \leq 2$ [Land, 1997]. Dans cette configuration le capteur M²APix a un champ visuel de $32,8^\circ$ dans le plan horizontal et $13,4^\circ$ dans le plan vertical.

Données brutes

Les données utilisées pour la calibration proviennent d'un banc de test composé d'un contraste gris / noir situé à 40 cm du capteur, éclairé par un projecteur LED¹ (mesure radiomètre : gris = $6 \cdot 10^6 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ et noir = $8 \cdot 10^5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$). Le capteur M²APix est échantillonné à 2.61 kHz, monté sur un moteur pas à pas avec des rotations aller/retour à une vitesse de $225^\circ/\text{s}$.

Les données des pixels sont ensuite filtrées passe-bas avec une fréquence de coupure de 60 Hz pour retirer le bruit de mesure sans modifier la dynamique des signaux correspondant aux passages du contraste. Cela permet par la suite, après dérivation des signaux, d'obtenir des gaussiennes bien formées pour la mesure des angles $\Delta\rho$ et $\Delta\varphi$.

L'ensemble des transitions de contraste sont sélectionnées et sont ensuite dérivées. Nous obtenons les gaussiennes d'où peuvent être extraites les caractéristiques optiques ($\Delta\rho$ et $\Delta\varphi$) de chaque pixel.

1. Lampe à diode électroluminescente, abréviation de l'anglais Light-Emitting Diode

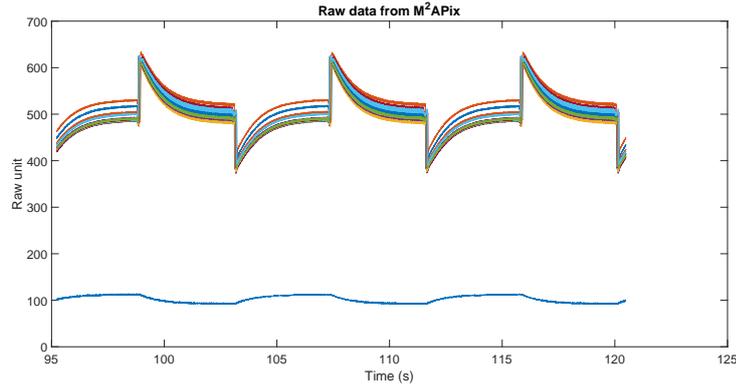


FIGURE 2.3: Données brutes retournées par le capteur M²APix composées des valeurs des 12 pixels et d'une valeur représentative de la luminosité globale perçue (courbe bleue aux environs de 100). Les hautes valeurs correspondent aux basses luminosités et inversement.

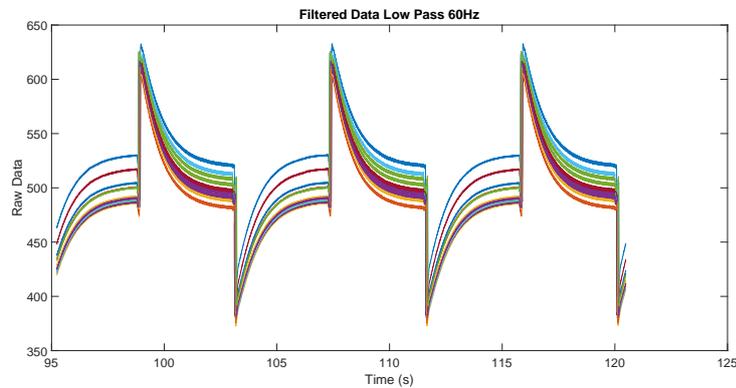


FIGURE 2.4: Valeurs des 12 pixels sur 25 secondes lors de 6 passages (3 aller-retour) face au contraste noir / gris.

La distance entre les sommets des gaussiennes de pixels voisins d'une même ligne donne l'angle $\Delta\varphi$, c'est cet angle qu'il est essentiel de caractériser précisément pour ensuite obtenir des mesures de flux optique justes.

Les angles $\Delta\varphi$ mesurés (figure 2.7), varient au cours des multiples passages de $\pm 0.1^\circ$ et les médianes obtenues vont de $4,2^\circ$ à $4,4^\circ$. Les fortes variations inter-essais proviennent de la sensibilité non symétrique du capteur entre les passages de contraste gris vers noir et noir vers gris qui sont effectués en alternance dans cette phase de calibration. l'angle $\Delta\rho$ est une mesure représentative du filtrage spatial passe-bas, il permet ainsi de réduire l'impact des petits détails et de concentrer la détection sur les contrastes plus marqués. À ce filtrage spatial vient s'ajouter un filtrage temporel passe-bas numérique qui dans cette phase à une fréquence de coupure de 60 Hz, mais qui pourra être modifiée dans les prochaines expériences.

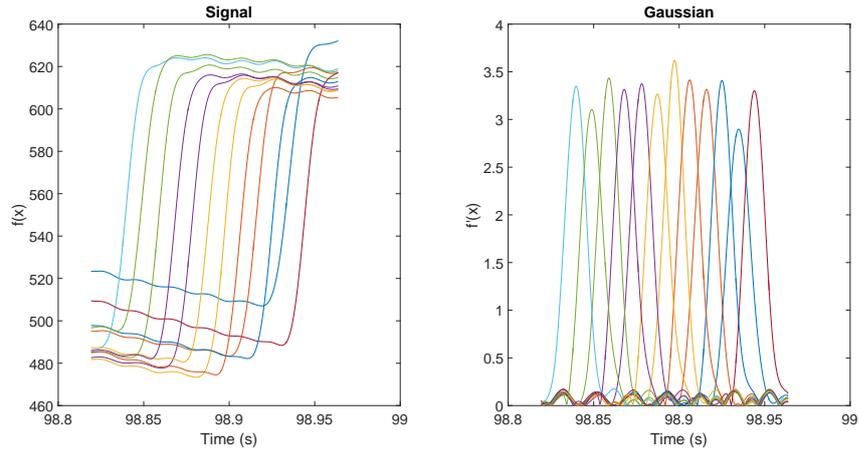


FIGURE 2.5: À gauche un grossissement des signaux des pixels du premier contraste (gris vers noir). À droite leur dérivée.

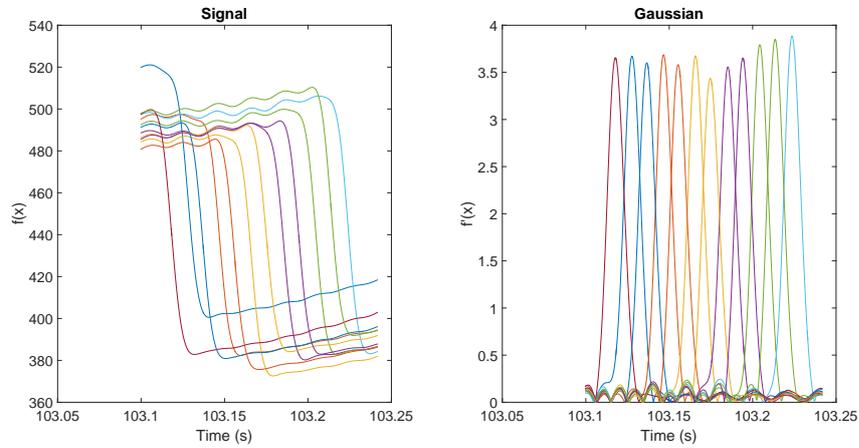


FIGURE 2.6: À gauche un grossissement des signaux des pixels du deuxième passage de contraste (noir vers gris). À droite leur dérivée.

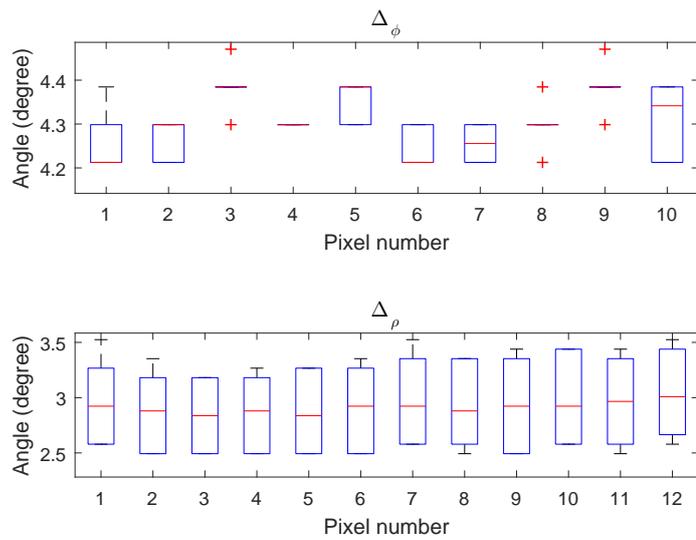


FIGURE 2.7: Mesure des $\Delta\phi$ par pair de pixels et des $\Delta\rho$ de chaque pixel avec une résolution de $0,1^\circ$.

2.3 Algorithmes de calculs de flux optique

Le calcul du flux optique utilisant une rétine, qu'elle soit composée de quelques pixels ou de plusieurs millions de pixels reste une mesure de vitesse angulaire qui repose sur le même principe mathématique (Eq. 2.1) : le décalage temporel, Δt , nécessaire à un contraste pour passer d'un point "A" à un point "B" dans le champ visuel, "A" et "B" étant séparés par un angle $\Delta\varphi$. Les systèmes visuels avec lentille télécentrique² sont donc incapables d'effectuer ce type de mesure, car insensibles à la parallaxe.

$$OF_i = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t_i} \quad (2.1)$$

Pour mesurer cette grandeur qu'est le flux optique local OF_i , deux approches peuvent être distinguées. La première approche repose sur une mesure principalement spatiale, elle implique d'avoir un capteur d'une grande résolution spatiale (plusieurs milliers voir millions de pixels) au détriment d'une plus faible résolution temporelle (fréquence de rafraîchissement de quelques dizaines de hertz). On cherche alors à mesurer l'angle parcouru d'un même contraste sur deux images successives prises à intervalle fixe (constante temporelle), c'est cette approche qui est utilisée dans le domaine du traitement d'image.

La deuxième approche est temporelle et implique ici d'avoir un capteur d'une haute résolution temporelle (de l'ordre du millier de hertz) et la résolution spatiale peut être plus grossière. Cette fois-ci c'est le temps qui va être mesuré entre le passage d'un même contraste d'un pixel à un autre (constante spatiale), c'est une approche plutôt liée au domaine du traitement du signal qui sera appelée ici méthode du temps de déplacement ou *Time-Of-Travel*.

Dans ces deux approches, la quantité de données à traiter par seconde peut, bien-sûr, être équivalente : plusieurs milliers de pixels à une fréquence de plusieurs dizaines de hertz ou plusieurs dizaines de pixels à une fréquence de plusieurs milliers de hertz. Le flux de données reste tout aussi chargé. Mais en pratique une différence est bien présente : par exemple, pour une caméra monochrome classique à 30 images/s de 640x480 pixels, nous obtenons $640 \times 480 \times 30 = 9216000$ données de pixels par seconde à traiter. Alors que pour une rétine de 12 pixels à 1000 Hz, nous avons 12000 données de pixels par seconde à traiter. Le rapport de charge entre ces deux approches est, dans notre exemple, de l'ordre de 10^3 .

2. lentille fournissant une image sans déformation de perspective grâce à une projection orthographique, tous les rayons lumineux traversant la lentille sont parallèles

2.3.1 Méthode par seuillage

La méthode de calculs de flux optique par seuillage est basée sur des études électrophysiologiques [Franceschini et al., 1989]. L'algorithme représenté sur la figure 2.8 permet de calculer le délai Δt par un principe de seuillage des signaux venant de chaque pixel. Pour effectuer ce seuillage, les signaux des pixels passent par un filtrage numérique passe-bande de fréquence de coupure 3 Hz et 30 Hz. Chaque paire de signaux adjacents passe ensuite par un seuillage à hystérésis afin de mesurer le délai Δt qui les sépare. Un compteur est démarré lorsque le signal du premier pixel (en bleu sur la figure 2.8b) atteint le seuil, et est stoppé lorsque le signal du deuxième pixel atteint ce même seuil (signal rouge sur la figure 2.8b). Finalement, l'amplitude du flux optique est calculée grâce à l'équation 2.1.

Le paramètre clé de cet algorithme est donc la valeur de ce seuil. Un seuil trop haut du signal permettra de détecter que les fortes variations d'amplitudes des signaux induites par des contrastes marqués. On perd donc l'information apportée par les plus faibles contrastes. À contrario, un seuil trop bas apportera des franchissements parasites de seuil ce qui induira des valeurs de flux optique erronées. La valeur de ce seuil est donc ajustée manuellement dans l'objectif d'obtenir le meilleur équilibre entre le maximum de fréquence de mesures de flux optique et le minimum de valeurs erronées.

Dans l'expérience présentée ici, la valeur du seuil (valeur haute de l'hystérésis) a été fixée à environ 5% du maximum d'amplitude du signal. La valeur basse de l'hystérésis est fixée à la moitié de la valeur haute. Tous les délais Δt mesurés en dehors d'une certaines gammes sont exclus (Δt de 4 ms à 717 ms ce qui correspond à un flux optique compris entre $6^\circ/s$ et $1145^\circ/s$ pour $\Delta\varphi = 4,3^\circ$). L'algorithme fonctionne à la fréquence d'échantillonnage des pixels appelée F_e , qui selon les expériences, sera fixée à une valeur située entre 100 Hz et 1 kHz. Le flux optique est ensuite calculé grâce à l'équation 2.1, où Δt est un multiple de T_e . La résolution du flux optique ΔOF de cette méthode est non-constante, mais suit une fonction inverse (Eq. 2.1) très nettement observable sur les résultats de la figure 2.10.

2.3.2 Méthode par corrélation croisée

Cet algorithme est inspiré du modèle de corrélation [Hassenstein and Reichardt, 1956, Albus and Hong, 1990] et est basé sur la corrélation croisée des signaux des pixels (figure 2.8c), comme présenté dans [Mafrica et al., 2016b]. Les signaux sont tout d'abord filtrés par le même filtre passe-bande utilisé pour l'algorithme par seuillage. Puis, un des deux signaux de chaque paire de pixels adjacents est retardé par un certain nombre de pas de temps Δt_i , et le coefficient de

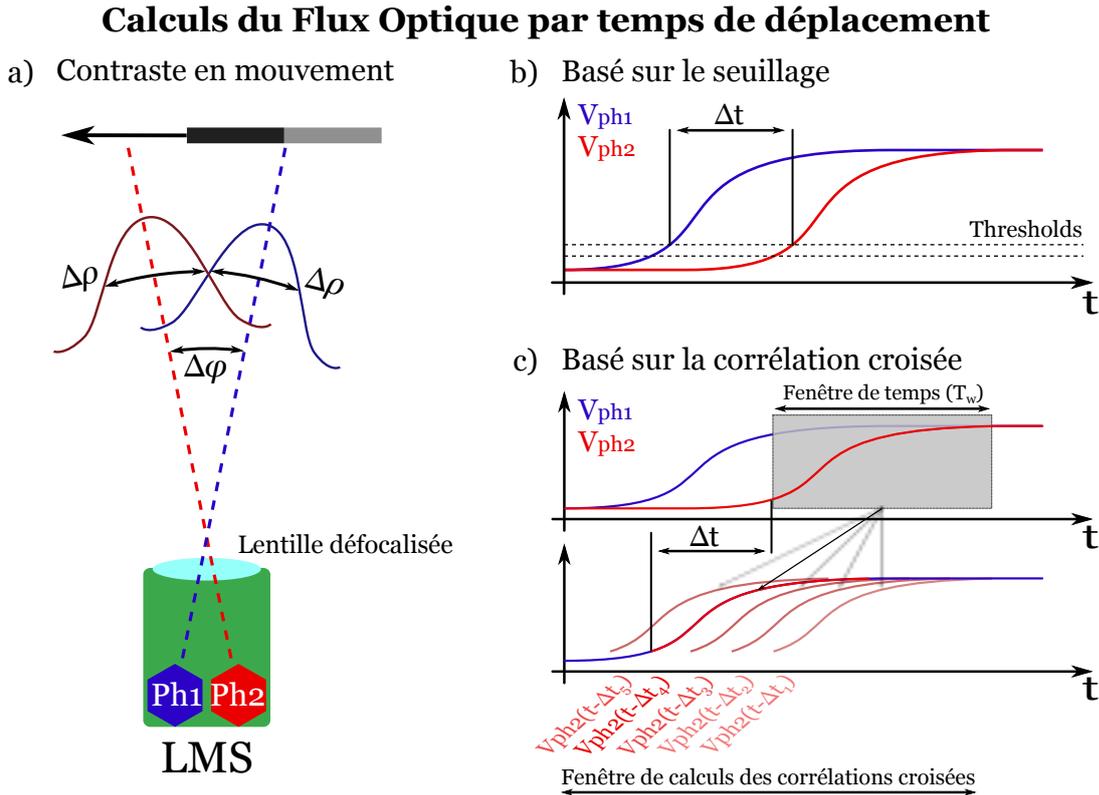


FIGURE 2.8: a) Géométrie optique d'un capteur de mouvement local (LMS pour "Local Motion Sensor"). La défocalisation de lentille (d'une longueur focale $f = 2$ mm) fait varier l'angle $\Delta\varphi$ entre les axes optiques des deux pixels $Ph1$ (bleu) et $Ph2$ (rouge). Celle-ci permet aussi de définir l'angle d'acceptance $\Delta\rho$ donné par la largeur à mi-hauteur de la sensibilité angulaire gaussienne. b) Principe de calculs de flux optique Time-Of-Travel par seuil : le délai Δt est calculé lorsque les deux signaux atteignent un seuil à hystérésis [Franceschini et al., 2009, Expert et al., 2011, Roubieu et al., 2013, Sabiron et al., 2013]. d) Principe de calculs de flux optique Time-Of-Travel par corrélation croisée : le délai Δt est calculé comme étant le délai qui donne, lors d'une corrélation croisée entre les deux signaux, le maximum du coefficient de Pearson ρ . Pour simplifier la situation, les principes de calculs de flux optique par temps de déplacement sont présentés ici sur les signaux bruts V_{ph1} et V_{ph2} , mais en réalité ces opérations sont effectuées après un filtrage passe-bande des signaux. D'après [Vanhoutte et al., 2017a]

corrélation croisée de Pearson ρ_i est ensuite calculé entre le signal retardé et le signal non retardé dans une fenêtre de temps T_w . Le délai Δt_m donnant le coefficient maximum ρ_m est utilisé pour calculer le flux optique en utilisant l'équation 2.1 aussi longtemps que ρ_m est plus grand qu'un seuil de confiance notée ρ_{thr} . Ce seuil de confiance du coefficient de corrélation croisée est fixé à 0,99 pour éviter toute erreur de mesure de flux optique. En accord avec la bande passante donnée par le filtre passe-bande (3-30 Hz), la fenêtre T_w est fixée à une taille de 0,14s, on a donc bien $3 \text{ Hz} \leq \frac{1}{T_w} \leq 30 \text{ Hz}$. Cette fenêtre de corrélation croisée est aussi définie par $T_w = N \cdot T_e$, avec N le nombre de pas dans la fenêtre de temps. Par conséquent, pour une fréquence d'échantillonnage $F_e = 500 \text{ Hz}$ on a $N = 70$, pour $F_e = 250 \text{ Hz}$, on a $N = 35$ et ainsi de suite.

Pour calculer le coefficient de corrélation croisée de Pearson ρ_i , la fenêtre de signal T_w peut être

retardée par des pas de temps Δt_i qui sont calculés pour des valeurs de flux optique désirées OF_i en utilisant la fonction inverse donnée dans l'équation 2.1. Ceci est appliqué en prenant des pas de temps Δt_i entre 2 pas d'échantillonnage consécutifs (nT_e et $(n+1)T_e$) après une interpolation linéaire des signaux échantillonnés. Ainsi, en choisissant les valeurs de flux optique désirées OF_i à pas constant, le flux optique calculé aura une résolution à pas constant, contrairement à l'algorithme basé sur la méthode par seuillage.

2.4 Performance des algorithmes et du capteur en présence de fortes perturbations lumineuses

Pour comprendre la nécessité de ces phases de tests conséquentes, il est important de rappeler le but de ces recherches : l'objectif principal est d'arriver à valider des hypothèses sur différents comportements de vols observés chez des insectes (i.e. abeilles) par rapport à la perception de leur environnement qui se fait principalement par la mesure du flux optique. Dans un premier temps, il est donc nécessaire d'avoir accès à des informations de flux optique semblable à ce que l'insecte est amené à mesurer, c'est-à-dire une vitesse de flux optique élevée de l'ordre du millier de degrés par seconde, fiable et réactive pour des manœuvres agressives, robustes aux variations lumineuses, et enfin permettant à l'unité de calculs embarquée d'effectuer les calculs de flux optique tout en assurant le pilotage du robot volant.

2.4.1 Comparaison des méthodes sur bâches texturées défilantes

A - Protocole expérimental

Dans cette expérience, la rétine M²APix est fixée perpendiculairement à une bâche texturée motorisée pouvant être contrôlée à vitesse variable. La lumière provient de trois sources : la lumière du jour à travers des fenêtres pouvant être occultées par des volets, des tubes fluorescents fixés au plafond et un projecteur LED mobile utilisé pour les fortes luminosités. La rétine M²APix est ainsi confrontée à des translations pures allant de 0 à $1,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, qui, selon la distance choisie entre la bâche et le capteur M²APix, permet d'obtenir une gamme de flux optique allant de $25 \text{ }^\circ/\text{s}$ à $1000 \text{ }^\circ/\text{s}$. Le capteur et les algorithmes sont aussi testés sous différentes conditions lumineuses allant de $6 \cdot 10^{-7} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ à $1,6 \cdot 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ ce qui dans le spectre visible de la vision humaine correspondrait à une gamme de 0,2 lux à 12000 lux.

L'expérience de la bâche défilante est séparée en deux parties : dans la première partie, le capteur M²APix est placé à une distance de $d = 40 \text{ cm}$ la bâche et à la fois les conditions

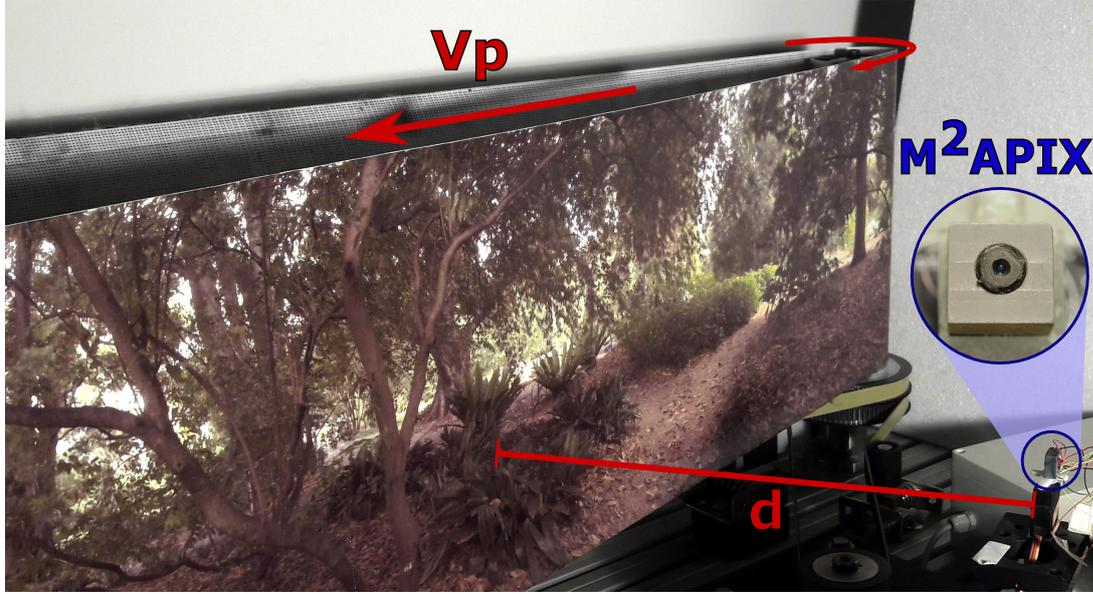


FIGURE 2.9: Expérience utilisant une texture défilante pour tester les algorithmes de flux optique avec le capteur M²APix à la fois dans des gammes de flux optique et de conditions de luminosités variables. La vitesse V_p de la bâche texturée varie entre 0 et $1,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, le capteur M²APix est placé perpendiculairement à la bâche défilante à une distance d allant de 8 cm à 40 cm. D’après [Vanhoutte et al., 2017a].

d’éclairage et de vitesse sont modulées. Dans la seconde partie, seule la vitesse de la bâche V_p est modifiée pour créer de longs paliers constants de vitesse. Pour atteindre la plus haute gamme de flux optique souhaitée, le capteur M²APix est approché de la bâche à une distance $d = 8 \text{ cm}$.

Durant la première partie, chacun des deux algorithmes est testé dans cinq niveaux de luminosités. Pour chaque niveau de luminosité, la vitesse de la bâche défilante $OF_{pattern}$ varie sur dix périodes via une fonction sinusoïdale de pulsation $\omega = 0,2\pi \text{ rad/s}$ et d’amplitude de vitesse V_p allant de $V_{pmin} = 0,18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ à $V_{pmax} = 1,22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Eq. 2.2). Avec le capteur M²APix placé à une distance $d = 40 \text{ cm}$ (Fig. 2.9, la bâche défilante génère une gamme de flux optique allant de $25 \text{ }^\circ/\text{s}$ à $175 \text{ }^\circ/\text{s}$ (ligne verte dans la figure 2.10b-c), en accord avec l’équation suivante :

$$OF_{pattern} = \frac{180}{\pi} \left(\frac{V_{pmax} - V_{pmin}}{2d} \cdot \cos(2\pi ft + \pi) + \frac{V_{pmax} + V_{pmin}}{2d} \right) \quad (2.2)$$

Durant la deuxième expérience, le niveau de luminosité est fixé à $7 \cdot 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ et les deux algorithmes sont utilisés pour calculer une large gamme de flux optique allant de $25 \text{ }^\circ/\text{s}$ à $1000 \text{ }^\circ/\text{s}$. Pour obtenir la gamme de flux optique allant de $25 \text{ }^\circ/\text{s}$ à $200 \text{ }^\circ/\text{s}$ la distance d est fixée à 40 cm et la vitesse de la bâche varie de $0,18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ à $1,34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Pour obtenir la gamme de flux optique allant de $250 \text{ }^\circ/\text{s}$ à $1000 \text{ }^\circ/\text{s}$ la distance d est fixée à 8 cm et V_p varie de $0,35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ à $1,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Ces deux expériences nous permettent de comparer la précision et la fréquence de mesure de flux optique pour les deux algorithmes de type temps de déplacement en utilisant une rétine auto-adaptative telle que le capteur M²APix dans une large gamme de flux optique (1,6 décade, figure 2.11) et une large gamme de luminosité (5 décades, figure 2.10).

Les deux algorithmes sont destinés à être embarqués sur un microdrone, ils sont donc exécutés à des fréquences définies pour maintenir au moins 40% de la charge de calculs du CPU³ libre pour le contrôle du vol et les tâches de navigation du robot. Ainsi, l'algorithme basé sur le seuillage des signaux est exécuté à une fréquence de 1000 *Hz*, et l'algorithme basé sur la corrélation croisée des signaux est exécuté à 500, *Hz* car cette méthode est plus lourde en charge CPU.

B - Résultats de l'expérience

La figure 2.10 présente les mesures de flux optique et la fréquence de sortie instantanée de celles-ci lorsqu'elles sont obtenues avec la méthode par seuillage (Fig. 2.10b) et avec la méthode par corrélation croisée (Fig. 2.10c) avec cinq niveaux de luminosité différents (correspondant aux cinq colonnes colorées dans la figure 2.10a-c). Les mesures de flux optique correspondant aux cinq niveaux de luminosités ont été obtenues durant cinq tests distincts (d'où la présence d'un segment noir oblique séparant chaque test à 5, 10, 15 et 20 *s* sur la figure 2.10b,c). Pour chaque niveau de luminosité (chaque colonne/période sinusoïdale dans la figure 2.10b,c), les 10 mesures locales de flux optique obtenues durant dix périodes sinusoïdales du défilement de la bache texturée sont confondues en une seule sinusoïde afin d'afficher l'ensemble des mesures sur la figure 2.10. Les fréquences de rafraîchissement des mesures de flux optique dans la partie basse dans la figure 2.10b,c sont calculées en filtrant le nombre moyen de mesures de flux optique obtenues à chaque pas de temps sur l'ensemble des 3 derniers et des 3 suivants (filtre numérique passe-bas moyenné sur 6 valeurs centrées). Les erreurs de mesures de flux optique sont calculées comme une différence entre les mesures de flux optique et leurs vérités terrain (respectivement points bleus et lignes vertes sur la figure 2.10b,c). Les boîtes à moustaches et les distributions de ces erreurs présentées figure 2.10d sont calculées avec une résolution de 1 °/*s* et une gamme de $[-150^\circ/s; 150^\circ/s]$.

Le nombre de valeurs aberrantes est moins important pour la méthode par corrélation croisée (Fig. 2.10c) que pour la méthode par seuillage (Fig. 2.10b). Tandis que les deux distributions (Fig. 2.10d) ont un écart type équivalent, les boîtes à moustaches montrent une différence notable sur le nombre de valeurs aberrantes (Fig. 2.10).

3. Processeur, unité centrale de traitement ou en anglais, Central Processing Unit

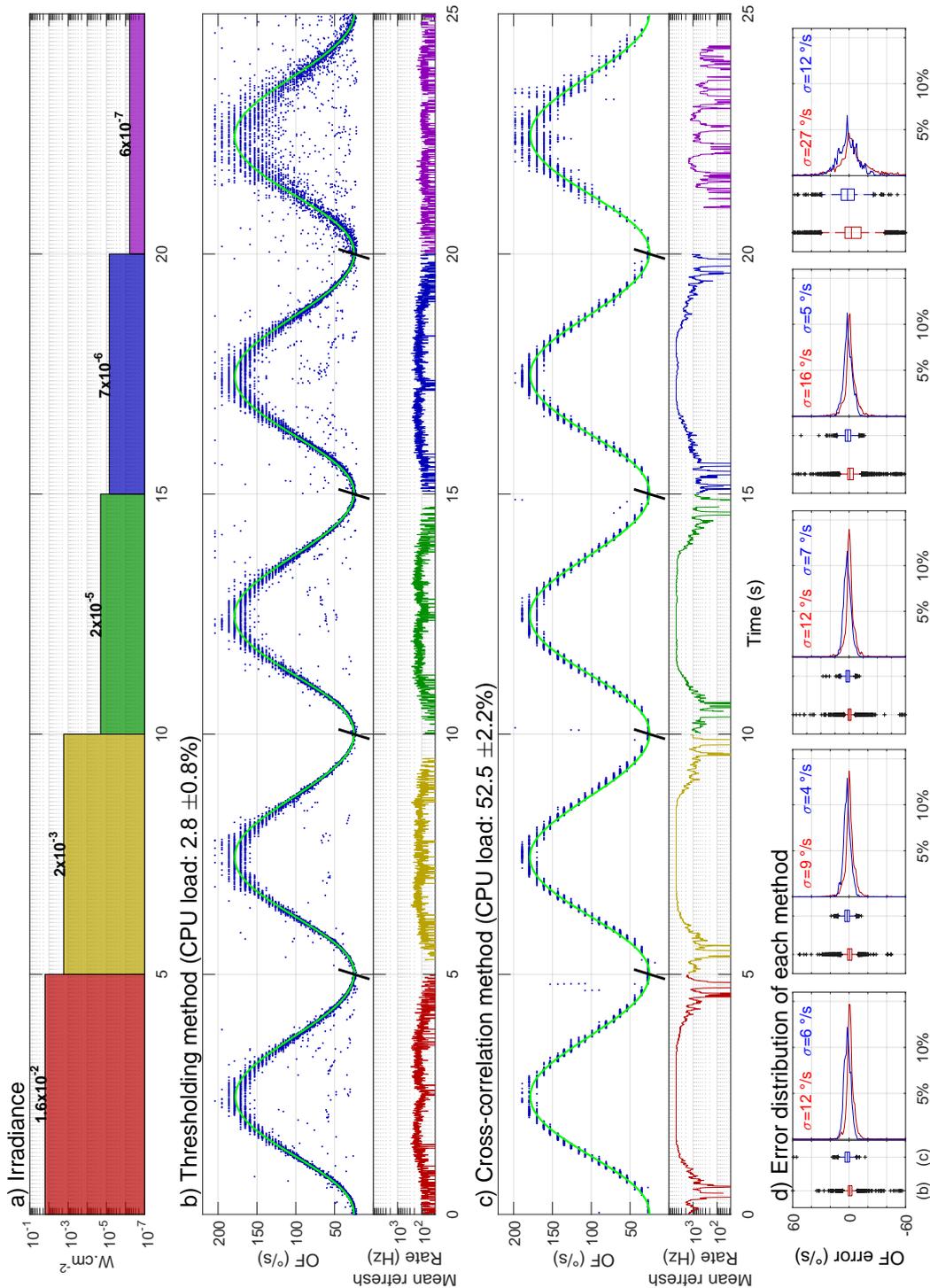


FIGURE 2.10: a) Les 5 niveaux d'irradiance de $6 \cdot 10^{-7} W \cdot cm^{-2}$ à $1,6 \cdot 10^{-2} W \cdot cm^{-2}$ (*i.e.*, de 0,2 lux à 12 000 lux pour la vision humaine) utilisés pendant la première partie de l'expérience (voir le banc d'essai de la figure 2.9). b), c) Mesures de flux optique obtenues avec le capteur M²APix en utilisant en b) la *méthode par seuillage* ($F_e = 1 kHz$) et en c) la *méthode par corrélation croisée* ($F_e = 500 Hz$) pour les 10 mesures locales de flux optique pendant 10 périodes en vitesse de la texture défilante. Les tests ont été faits séparément pour chacune des 5 conditions lumineuses. Chaque point bleu représente une mesure de flux optique local ; Ainsi, la moyenne du taux de rafraîchissement est le nombre de mesures de flux optique local sur 1 s. La ligne verte représente le flux optique théorique calculé grâce à l'équation 2.2. d) Distribution de l'erreur de chaque méthode par temps de déplacement : *seuillage* en rouge et *corrélation croisée* en bleu. D'après [Vanhoutte et al., 2017a].

La méthode par seuillage fonctionnant à 1 kHz (Fig. 2.10b) est vraiment légère en termes de charge CPU ($2,8 \pm 0,8\%$) et délivre une bonne justesse et précision de mesures de flux optique jusqu'à un niveau de luminosité de $7 \cdot 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ (colonne bleue dans la figure 2.10), malgré un nombre de valeurs aberrantes bien supérieur aux résultats obtenus avec la méthode par corrélation croisée. Le taux de rafraîchissement des mesures de flux optique est quant à lui relativement bas (moyenne de 97 Hz et maximum de 607 Hz sur les 10 mesures locales de flux optique cumulées). À très basse luminosité, i.e. $6 \cdot 10^{-7} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$, à la fois la précision et le taux de rafraîchissement des mesures de flux optique sont fortement dégradés (voir colonne violette dans la figure 2.10)

En comparaison, la méthode par corrélation croisée exécutée à 500 Hz donne moins de valeurs aberrantes (boîte à moustache figure 2.10d) et un plus fort taux de rafraîchissement des valeurs de flux optique (moyenne de 2326 Hz et maximum de 5000 Hz sur les 10 mesures locales de flux optique cumulées), mais cet algorithme implique une charge de calculs CPU conséquente ($52,5 \pm 2,2\%$). Comme pour la méthode par seuillage, à très bas niveau de luminosité, i.e. $6 \cdot 10^{-7} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$, le taux de rafraîchissement est dégradé, en particulier lors des faibles amplitudes de flux optique. En ce qui concerne la précision, la méthode par corrélation croisée reste dans ce cas, meilleure que la méthode par seuillage (écart type $\sigma = 12 \text{ }^\circ/\text{s}$ contre $\sigma = 27 \text{ }^\circ/\text{s}$ pour la méthode par seuillage dans les mêmes conditions expérimentales).

Dans la deuxième expérience, différents niveaux de flux optique sont testés de $25 \text{ }^\circ/\text{s}$ à $1000 \text{ }^\circ/\text{s}$ par pas de $50 \text{ }^\circ/\text{s}$ (sauf le premier pas) avec une irradiance constante de $7 \cdot 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$. Pour chaque pas, le flux optique moyen μ , l'écart type σ , ainsi que le coefficient de variation $\frac{\sigma}{\mu}$ sont calculés pour les deux algorithmes, les résultats sont représentés sur la figure 2.11.

L'analyse de la figure 2.11 révèle une bonne justesse des deux algorithmes (cercles bleus Fig. 2.11). Par contre, l'écart type σ (barres verticales bleues Fig. 2.11), ainsi que le coefficient de variation $C_V = \frac{\sigma}{\mu}$ (courbe rouge Fig. 2.11), sont plus importants avec la méthode par seuillage ($C_V > 0,1$ Fig. 2.11a) qu'avec la méthode par corrélation croisée ($C_V < 0,1$ Fig. 2.11b), mis à part pour les très faibles vitesses de flux optique, i.e. $25 \text{ }^\circ/\text{s}$, où la précision est sensiblement la même.

L'augmentation du coefficient de variation avec la méthode par seuillage à faible vitesse de flux optique s'explique principalement par la réponse auto-adaptative du capteur M²APix suivant une constante de temps de $0,5 \text{ s}$ sur la moyenne de la lumière perçue par l'ensemble des pixels du capteur. Par conséquent, plus la vitesse angulaire perçue est faible plus il y a de valeurs aberrantes, car la constante de temps de l'auto-adaptation est proche de la dynamique du signal. L'ensemble des signaux des pixels Ph_i du capteur ne franchissent pas tous le seuil lors du passage d'un même contraste, car leur sensibilité varie de manière trop importante durant le

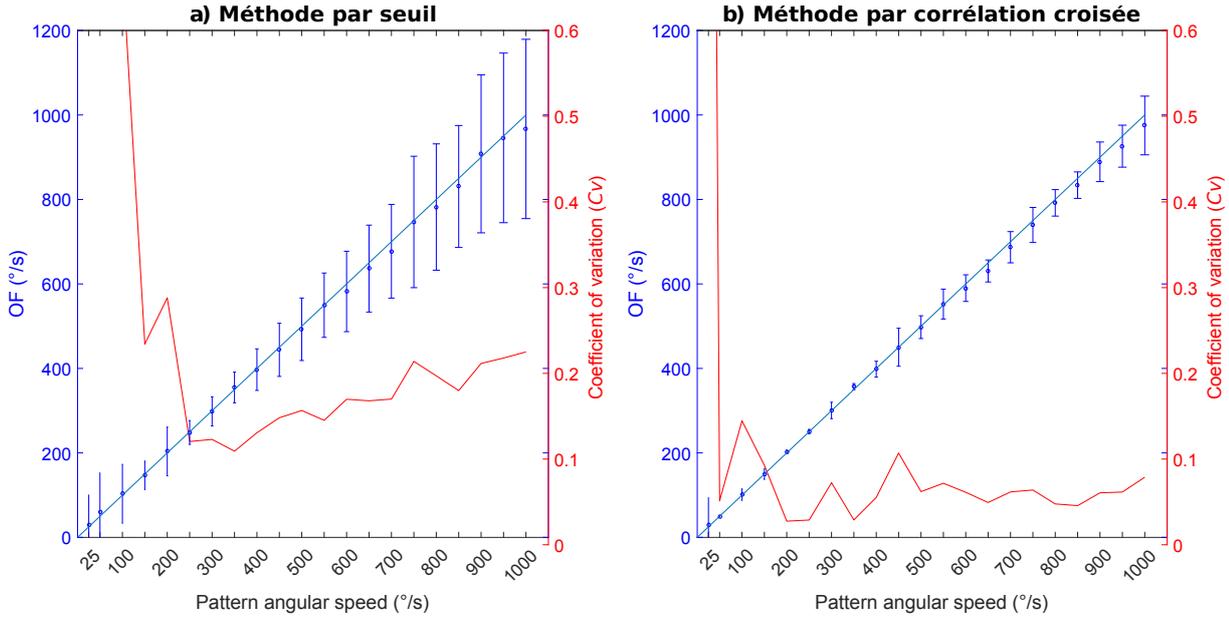


FIGURE 2.11: Précision des mesures de flux optique avec le capteur M²APix en utilisant : a) l’algorithme par temps de déplacement basé sur le seuillage des signaux avec $F_e = 1 \text{ kHz}$, et b) l’algorithme basé sur la corrélation croisée des signaux avec $F_e = 500 \text{ Hz}$. Les tests ont été effectués à un niveau constant d’irradiance ($7 \cdot 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$), et le flux optique généré par la bache défilante varie de 25 °/s à 1000 °/s par pas de 50 °/s (excepté pour le premier pas). Chaque graphique présente la moyenne μ (cercles bleus), l’écart type σ (barres bleues verticales) et le coefficient de variation $\frac{\sigma}{\mu}$ (lignes rouges) des mesures de flux optique par rapport au flux optique théorique (1^{ère} bissectrice bleue). D’après [Vanhoutte et al., 2017a].

passage d’un pixel à l’autre. Cette situation n’apparaît normalement pas avec la méthode par corrélation croisée, car le flux optique est calculé en considérant une fenêtre de temps comprenant N échantillons (voir partie 2.3.2).

Pourtant avec l’algorithme par corrélation croisée le coefficient de variation augmente brusquement à une valeur d’environ 25 °/s . Si les signaux d’un même contraste provenant d’une mesure locale de flux optique sont trop différents (dû au processus d’auto-adaptation), alors le seuil minimum du coefficient de corrélation (fixé à $\rho_i = 0,99$) n’est plus atteint et aucune valeur de flux optique n’est générée. De plus, les faibles dynamiques de vitesse de flux optique sont proches de la taille de la fenêtre fixée à $T_w = 0,14 \text{ s}$, des signaux provenant de différents contrastes peuvent alors paraître semblables à travers cette fenêtre et ainsi générer de mauvaises correspondances.

Pour ce qui est des hautes vitesses angulaires, le délai Δt entre chaque signal de photorécepteurs approche la période d’échantillonnage du capteur M²APix $T_e = \frac{1}{F_e}$. Le calcul du flux optique devient donc moins précis en particulier pour la méthode par seuillage pour laquelle la précision dépend directement de la fréquence d’échantillonnage F_e .

Dans l’expérience présentée dans cette section, le capteur M²APix était fixé face à une bache

texturée défilante générant une large gamme de flux optiques avec des niveaux de luminosité très différents. Cependant, les conditions de vol réel peuvent générer des perturbations dues aux vibrations, aux mouvements du contrôle d'attitude, ou à des conditions de luminosité non contrôlées qui peuvent changer brutalement durant le vol. Ainsi, pour tester les deux algorithmes en conditions de vol réel, un capteur M²APix orienté vers le sol est fixé sous un microdrone de 350 grammes pour mesurer le flux optique généré par le défilement du sol.

2.4.2 Comparaison en conditions de vol réel

A - Protocole de l'expérience

Dans cette expérience, les deux algorithmes de calculs de flux optique sont exécutés sur les données provenant d'un capteur M²APix en condition de vol réel, en présence de vibrations, de mouvements perturbateurs (dus à la stabilisation en attitude du microdrone) et à des variations de luminosité. Pour cela le capteur M²APix est fixé sous un microdrone de 350 grammes de type X4-MaG [Manecy et al., 2015], aligné sur la direction orthogonale au déplacement du microdrone. Plus d'informations concernant la plateforme et le choix de celle-ci seront présentées dans la partie 4.2. Dans cette configuration, le flux optique n'est influencé que par la composante du vecteur de vitesse linéaire du microdrone et ses mouvements de rotation en tangage. La luminosité est mesurée par une photodiode ayant la même sensibilité spectrale que le capteur M²APix embarqué et orientée dans la même direction. Pour obtenir le flux optique théorique pendant le vol avec une grande précision, le microdrone X4-MaG effectue ses vols dans l'arène de vol de la Méditerranée⁴ qui est équipée de 17 caméras de capture du mouvement dans un volume de $6 \times 8 \times 6$ m. Le quadrirotor X4-MaG suit une trajectoire 3D prédéfinie en utilisant les données issues du système de localisation VICON™ (Oxford, UK).

La trajectoire choisie pour cette expérience est en forme de demi-cercle à hauteur constante (0,4 m) au-dessus d'un sol texturé (Fig. 2.12). Le X4-MaG est contrôlé en boucle fermée pour avancer sur le demi-cercle à une vitesse constante de $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Pendant le segment rectiligne de la trajectoire, la vitesse du microdrone augmente progressivement de 0 à $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ puis retombe à $0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Entre ces deux segments de trajectoire, le X4-MaG garde sa position, le temps d'effectuer une rotation pure en lacet afin d'enchaîner sur le segment suivant. Comme le vecteur vitesse du microdrone est tangentiel à sa trajectoire, la forme en demi-cercle confronte le capteur M²APix à trois types de mouvements différents : translation, rotation et une combinaison de translation et de rotation.

4. <http://www.flying-arena.eu>

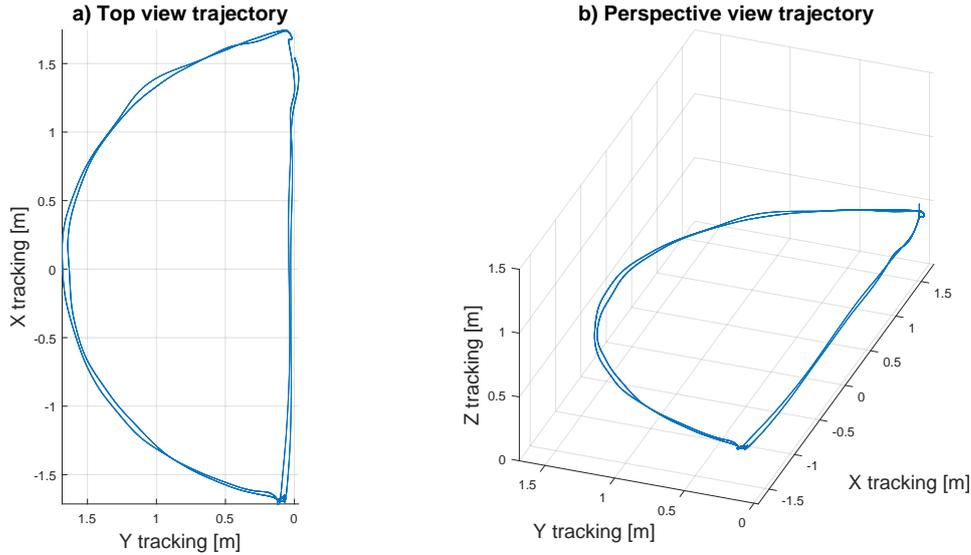


FIGURE 2.12: Trajectoires du quadrirotor X4-MaG. (a) vu du dessus ; (b) vue en perspective. Les deux tours sont effectués à une hauteur de 0,4 m. D’après [Vanhoutte et al., 2017a].

Durant l’expérience, la lumière est apportée par trois sources différentes : la lumière du jour provenant des fenêtres, des tubes fluorescents du plafond, et de la lumière infra-rouge émise par le système de capture du mouvement pulsée à 500 Hz. La lumière du soleil passant par la fenêtre permet, en modulant l’ouverture des volets, de créer sur les textures au sol de fortes variations de luminosité (Fig. 2.13). L’éclairage des tubes fluorescents peut être ajusté manuellement grâce à un variateur DALI⁵. Mais l’éclairage infra-rouge émis par les caméras du système VICONTM ne peut être modifié sous peine d’altérer les performances du suivi du drone.

B - Résultats de l’expérience

Deux tours en vol de la trajectoire en demi-cercle ont été enregistrés, pendant lesquels la lumière a été arbitrairement modulée. Pendant le premier tour, les volets sont laissés ouverts pour laisser entrer les rayons du soleil provoquant des bandes très lumineuses sur le sol texturé (Fig. 2.13) que le drone survole entre la 3^{ème} et la 8^{ème} seconde de l’expérience (Fig. 2.14a). Ainsi la luminosité durant le premier tour varie entre $10^{-3} \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ et $10^{-1} \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$. Les volets sont ensuite baissés (à 10 s dans la figure 2.14). Durant le deuxième tour la modulation manuelle de l’éclairage des tubes fluorescents induit des variations lumineuses allant de $9 \cdot 10^{-5} \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ à $2 \cdot 10^{-3} \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$.

Dans les figures 2.14b1,c1, les zones blanches correspondent aux périodes d’avance du micro-drone. Les zones grisées correspondent aux phases où le X4-MaG reste sur place pour effectuer une rotation en lacet de 90° l’orientant dans la direction du prochain segment de trajectoire.

5. Digital Addressable Lighting Interface

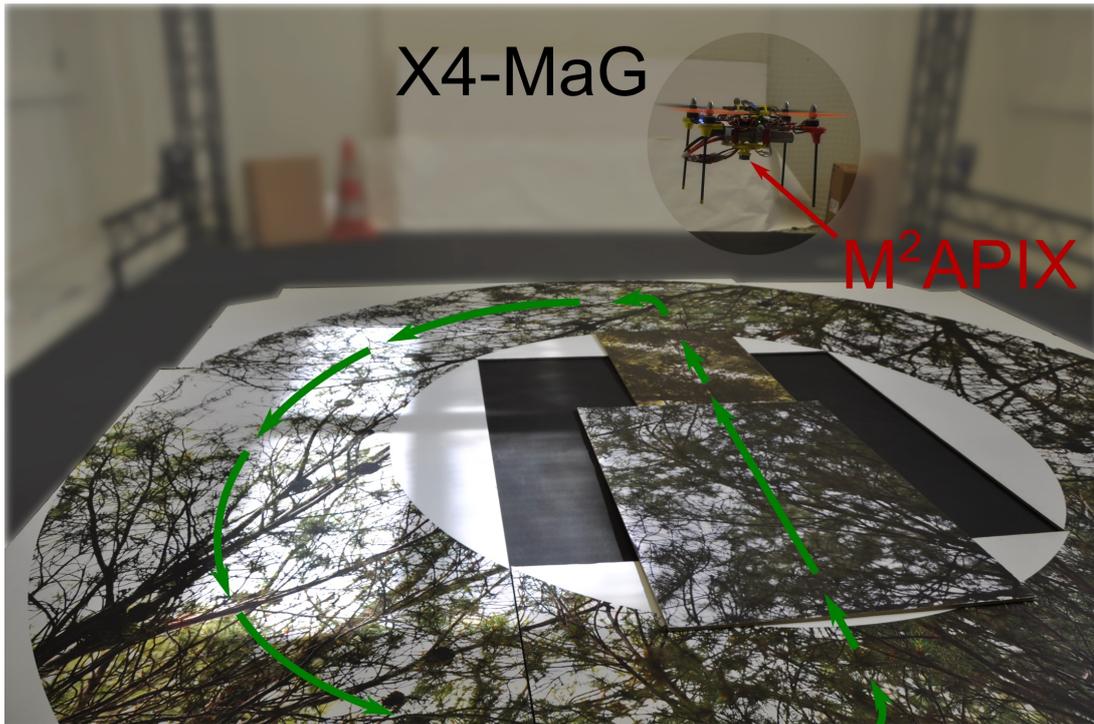


FIGURE 2.13: Le microdrone X4-MaG volant à 1,2 m au-dessus d'un sol d'une texture naturelle dans l'arène de vol. La trajectoire en demi-cercle est représentée en vert. Le capteur M²APix est embarqué sous le microdrone regardant vers le sol pour mesurer le flux optique généré par le défilement du sol. D'après [Vanhoutte et al., 2017a].

Les segments en demi-cercle sont identifiés comme étant les deux zones blanches les plus larges (entre 0 et 10 s et entre 18 et 28 s). Les zones blanches plus étroites correspondant aux segments rectilignes (entre 13 et 16 s et entre 31 et 34 s).

Pour une trajectoire à 0,4 m de hauteur avec une gamme de vitesse allant de 0,5 à 1,5 m·s⁻¹ sans rotation en tangage, le flux optique théorique varie entre 72 et 215 °/s.

Les oscillations des valeurs de flux optique mesurées pendant la partie en demi-cercle de la trajectoire sont principalement dues à la stabilisation du drone en attitude, ce qui engendre des rotations en tangage. En effet, ces rotations étant dans le même axe que celui du capteur M²APix, elles engendrent des perturbations de flux optique en ajoutant une composante de rotation.

L'analyse de la figure 2.14b révèle que la méthode par seuillage génère des valeurs de flux optique virtuellement ininterrompu. On observe une certaine variabilité sur l'ensemble de la trajectoire comme le montre l'écart type (σ) des mesures (excluant les zones grisées) qui est de 43 °/s. Durant les phases de mouvement (zones blanches) le rafraîchissement des mesures de flux optique atteint une moyenne de 99 Hz sur les dix mesures locales de flux optique cumulées. La méthode par corrélation croisée (voir figure 2.14c) a des difficultés à obtenir des valeurs de flux optique sur certaines zones notamment lors de fortes accélérations qui induisent une déformation

des signaux issus des pixels (voir figure 2.14c à l'instant $t = 13$ s). Néanmoins, comparé à la méthode par seuillage, l'écart type des mesures est bien moindre $\sigma = 16$ °/s et le taux de rafraîchissement des mesures de flux optique est bien supérieur en atteignant une moyenne de 1195 Hz pour les dix mesures locales de flux optique cumulées.

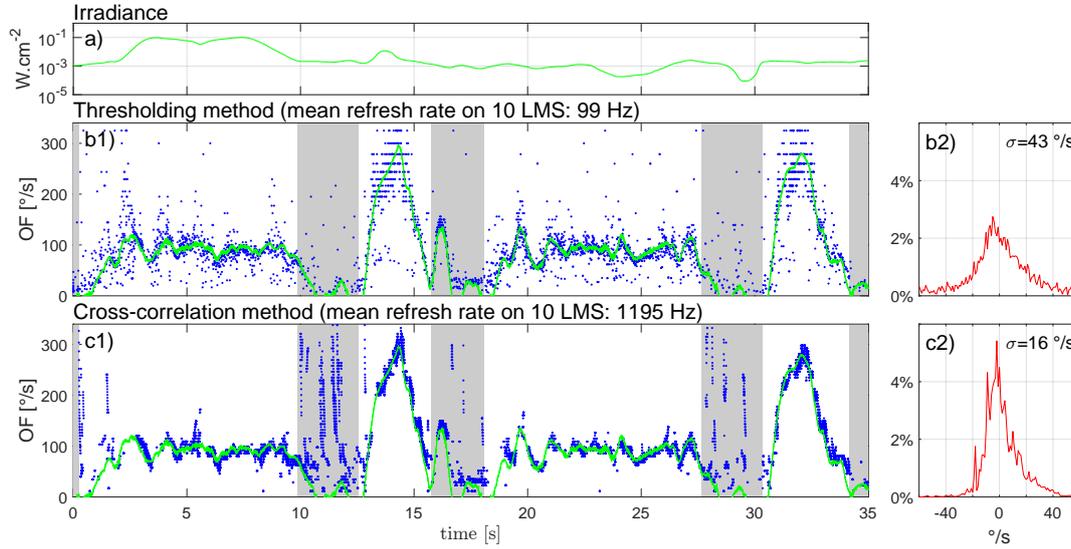


FIGURE 2.14: (a) L'irradiance mesurée en $W.cm^{-2}$ par une photodiode orientée dans la même direction que le capteur M²APix embarqué sous le microdrone X4-MaG ; (b,c) Dans la partie gauche (b1,c1), les points bleus représentent les valeurs de flux optique calculées par une des mesures locales de flux optique ; la ligne verte est la valeur théorique calculée grâce au système de capture du mouvement *Vicon*TM. La partie de droite (b2,c2) la distribution de l'erreur des mesures de flux optique, avec une résolution 1°/s dans la gamme [-300°/s ; 300°/s], en fonction de la valeur théorique au cours de l'avancement du drone (zones blanches dans les panneaux de gauche). Les zones exclues (en gris) correspondent aux périodes de rotation pure en lacet du X4-MaG. Voir la vidéo de l'expérience <https://youtu.be/82oG7HUHwpM>. LMS pour Local Motion Sensor ou capteur local de flux optique. D'après [Vanhoutte et al., 2017a].

Ces résultats apportent des informations permettant de mieux cerner les capacités des deux méthodes dans différentes situations. Ainsi, la méthode par corrélation croisée apporte de meilleurs résultats en termes de précision, de robustesse, de gamme de fonctionnements et de taux de rafraîchissement, mais ces avantages sont fortement contre-balançés par la charge CPU nécessaire à cet algorithme qui risque de mettre en péril le bon fonctionnement d'un microdrone en plein vol. Comme présentée dans la partie 2.3, pour un seul capteur M²APix, la méthode par corrélation croisée fonctionnant à $F_e = 500$ Hz, donne une charge CPU d'environ 52.5%, alors que pour la méthode par seuillage fonctionnant à $F_e = 1000$ Hz, la charge CPU n'est que de 3%. Une solution incluant un sous-échantillonnage va être ensuite testée afin de réduire la charge CPU et comparer l'impact des résultats sur les mesures du flux optique.

C - Résultats de l'expérience sous-échantillonnées

Les données qui ont été enregistrées en vol et présentées figure 2.14 sont sous-échantillonnées pour être ensuite ré-exécutées avec les deux algorithmes ; les résultats hors-ligne des calculs de flux optique sont présentés sous le même format dans la figure 2.15 avec $F_e = 250$ Hz et dans la figure 2.16 avec $F_e = 100$ Hz.

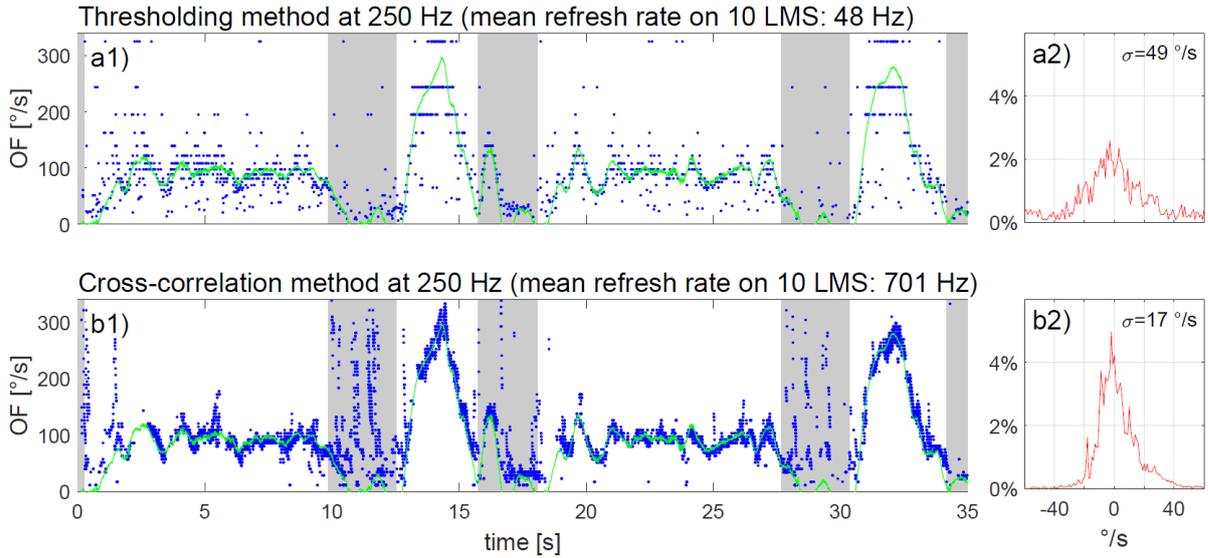


FIGURE 2.15: Flux optique calculé avec (a) la méthode par seuillage et (b) la méthode par corrélation croisée après avoir sous-échantillonné les données présentées en Fig. 2.14 à $F_e = 250$ Hz. LMS pour Local Motion Sensor ou capteur local de flux optique. D'après [Vanhoutte et al., 2017a].

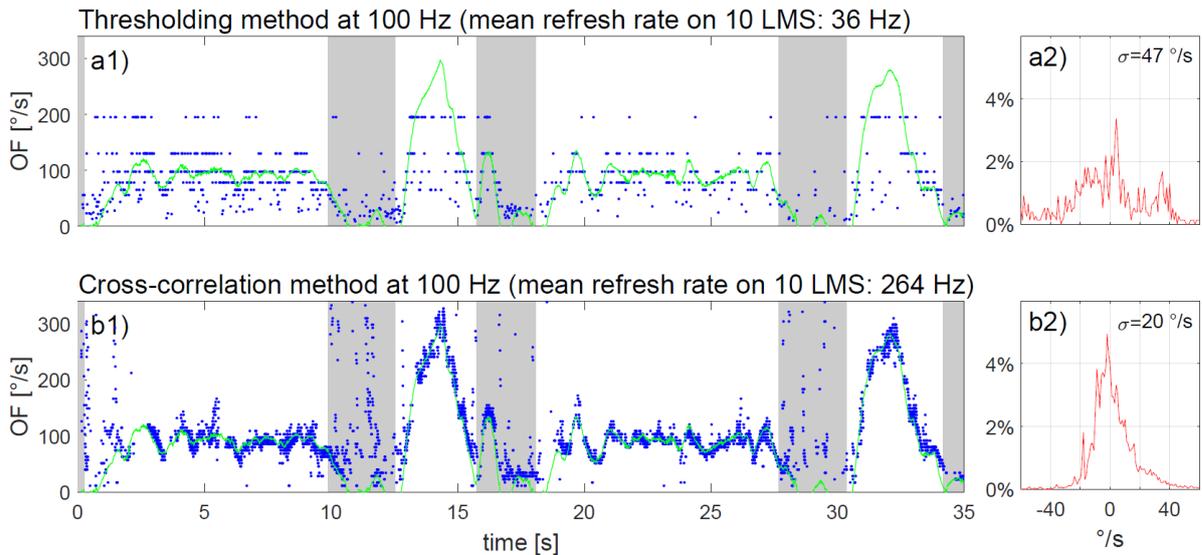


FIGURE 2.16: Flux optique calculé avec (a) la méthode par seuillage et (b) la méthode par corrélation croisée après avoir sous-échantillonné les données présentées en Fig. 2.14 à $F_e = 100$ Hz. LMS pour Local Motion Sensor ou capteur local de flux optique. D'après [Vanhoutte et al., 2017a].

La comparaison des figures 2.14, 2.15 et 2.16 (voir aussi le tableau 2.1) révèle que pour la méthode par seuillage, la réduction de la fréquence de fonctionnement augmente fortement la quantification du flux optique (spécialement visible à forte amplitude de flux optique), accompagnée par une baisse significative du taux de rafraîchissement des mesures de flux optique (de 99 Hz à $F_e = 1000$ Hz à 36 Hz à $F_e = 100$ Hz) et d'un élargissement de la distribution de l'erreur.

Pour la corrélation croisée, la réduction de la fréquence d'échantillonnage n'affecte pas de façon notable la distribution de l'erreur, par contre le taux de rafraîchissement des valeurs de flux optique décroît proportionnellement à la fréquence de rafraîchissement (de 1195 Hz à $F_e = 500$ Hz à 264 Hz à $F_e = 100$ Hz).

Méthode	par seuillage				corrélation croisée			
Fréquence F_e (Hz)	1000	500	250	100	1000	500	250	100
Charge CPU (%)	2.8	1.1 *	< 1 *	< 1 *	surcharge	52.5	26.3 *	10.5 *
Précision σ (°/s)	43	44	49	47	-	16	17	20
rafraîchissement (Hz/10 LMSs)	99	51	48	36	-	1195	701	264

* Valeur théorique, car le test a été effectué hors-ligne.

Tableau 2.1: Comparaison entre les résultats obtenus avec les deux algorithmes de type temps de déplacement. D'après [Vanhoutte et al., 2017a]. LMS pour Local Motion Sensor ou capteur local de flux optique

2.5 Conclusion sur les apports pour les futures expériences de robotique bio-inspirée

Les expériences ont été menées afin de tester deux algorithmes de calculs de flux optique par temps de déplacement avec un prototype de rétine auto-adaptative bio-inspirée, appelé M²APix [Mafrica et al., 2015], conçu pour la micro-robotique et particulièrement adapté à la micro-robotique aérienne. Ce prototype est un capteur optique composé de 12 pixels auto-adaptatifs qui sont utilisés sous forme de 10 mesures locales de flux optique. Les pixels auto-adaptatifs permettent d'évaluer chaque algorithme de flux optique indépendamment des larges variations des conditions lumineuses. Dans le domaine de la robotique, travailler dans une gamme de 7 décades d'irradiance est un atout, car les robots peuvent être amenés à naviguer dans des environnements sujets à d'importantes variations lumineuses, comme dans une forêt d'obstacles, un canyon urbain ou bien encore en intérieur.

Dans la première expérience, représentée par la Fig. 2.10, la lumière est contrôlée sur une gamme de 5 décades d'irradiance. La limite basse d'irradiance atteinte était d'environ $10^{-6} W.cm^{-2}$, lorsque le capteur M²APix associé aux différents algorithmes n'était plus capable de délivrer des

mesures fiables.

Comme le montre la Fig. 2.11, les résultats révèlent que les algorithmes sont justes pour toutes les vitesses optiques testées. Par contre, la précision de celles-ci varie en fonction des vitesses optiques. La précision de la méthode par corrélation croisée ($Cv < 0,1$ dans la figure 2.11b) est bien meilleure que la méthode par seuillage ($Cv > 0,1$ dans la figure 2.11a) sur une large gamme de flux optique. À la plus basse vitesse de flux optique ($25^\circ/s$), les deux méthodes ont une forte perte de précision, en partie due à l'auto-adaptation et à la faible dynamique des signaux visuels inhérent au capteur M²APix en pareille situation. En effet, le processus d'auto-adaptation, dont la constante de temps est de $0,5s$, peut affecter les mesures de flux optique lorsque les délais Δt sont proches de $0,5s$. En principe, il est difficile de mesurer à la fois des amplitudes de flux optique faibles ou importantes avec un même angle inter-pixel $\Delta\varphi$. Avec $\Delta\varphi = 1,5^\circ$, la méthode par seuillage permettrait de mesurer du flux optique dans une gamme de $[1,5^\circ/s; 25^\circ/s]$ en condition de vol réel [Sabiron et al., 2013]. Moduler la caractéristique optique $\Delta\varphi$ en fonction de la gamme de flux optique attendue serait une des seules solutions qui permettrait de mesurer du flux optique sur une gamme de 3 décades ou plus (e.g., $[1^\circ/s; 1000^\circ/s]$) avec des algorithmes de flux optique par temps de déplacement.

Les expériences avec la bache défilante et en condition réelle de vol démontrent que dans des conditions lumineuses variables, les deux algorithmes de calculs de flux optique (seuillage et corrélation croisée) ont une très bonne justesse par rapport à la vérité terrain (flux optique théorique). La méthode par corrélation croisée paraît néanmoins plus précise et offre un plus haut taux de rafraîchissement des mesures que la méthode par seuillage. Mais pour des applications aériennes en micro-robotique, la méthode par corrélation croisée requiert 18 fois plus de ressources calculatoires que la méthode par seuillage (Tab.2.1). La méthode par corrélation croisée a été ensuite testée hors-ligne avec un sous-échantillonnage ($250\ Hz$ Fig. 2.15b1, $100\ Hz$ Fig. 2.16b1) et montre de très bons résultats malgré quelques absences de mesures lors d'accélération où le flux optique va au-delà de $260^\circ/s^2$ (e.g., Fig. 2.15b1). La méthode par seuillage, quant à elle, fonctionne convenablement à hautes fréquences d'échantillonnages ($1\ kHz$ Fig. 2.14b1); les résultats sont très mauvais lorsque les signaux sont sous-échantillonnés ($250\ Hz$ Fig. 2.15a1 ou $100\ Hz$ Fig. 2.16a1). Pour des prochains travaux, il serait intéressant d'explorer un algorithme hybride combinant l'algorithme de flux optique par seuillage à $1\ kHz$ et l'algorithme de corrélation croisée à $250\ Hz$ (ou même $100\ Hz$) pour ainsi profiter des avantages de chacune des deux méthodes sans surcharger le microprocesseur.

Les résultats présentés dans le tableau 2.1 permettront pour de futurs travaux de recherche de choisir entre ces deux algorithmes de calcul de flux optique par temps de déplacement en

fonction des ressources calculatoires disponibles. Si un algorithme à faible charge CPU est requis (e.g. pour calculer des douzaines voire des centaines de mesures locales de flux optique sur une même cible embarquée), la méthode par seuillage sera plus adaptée. En ajoutant un filtre médian, les mesures erronées seront moins fréquentes [Roubieu et al., 2013], et la méthode par seuillage pourra ainsi devenir plus précise. Sa résolution temporelle peut, dans une certaine mesure, être améliorée en cas de sous-échantillonnage ($200 \text{ Hz} \leq F_e < 1 \text{ kHz}$) par une interpolation linéaire sur les signaux issus des photorécepteurs [Expert et al., 2012]. La méthode de corrélation croisée permet d’obtenir des mesures de flux optique justes, précises et un taux de rafraîchissement élevé (qui est proportionnel au taux d’échantillonnage F_e), mais implique une plus lourde charge de calculs, ce qui limite le nombre de mesures locales de flux optique pouvant être faites sur une même cible. Cette lourde charge CPU pourrait, dans le cas de la corrélation croisée, être largement prise en charge par une puce DSP (Digital Signal Processing) spécialisée dans ce type de traitement.

Finalement, d’un point de vue robotique, notre drone X4-MaG de 350 g est équipé d’une IMU fonctionnant à 250 Hz pour stabiliser son attitude et d’un capteur de flux optique orienté vers le bas, composé de 10 mesures locales de flux optique permettant une fréquence de mesure de flux optique proche de la fréquence de mesure de l’IMU. Une haute fréquence de rafraîchissement, aussi bien pour un capteur inertiel que pour un capteur visuel, sera dans un futur proche un réel atout permettant aux microrobots aériens d’avoir une forte réactivité en environnements imprévisibles. De plus, cette étude a démontré que les algorithmes de type temps de déplacement associés avec un capteur M²APix permettent de mesurer de manière précise une large gamme de flux optique [$25^\circ/\text{s}$; $1000^\circ/\text{s}$] et ainsi de permettre aux drones de voler à proximité d’obstacles à haute vitesse dans des conditions lumineuses variées. Les caractéristiques du capteur visuel M²APix étant maintenant bien définies, nous allons l’exploiter pour mettre en œuvre des stratégies de navigation basées sur le flux optique en simulation numérique.

Chapitre 3

Simulation des stratégies de navigation bio-inspirées des abeilles

Sommaire

3.1	Environnement et stratégies de navigation inspirées de l'abeille . . .	48
3.2	Simulation de la perception de l'abeille pour la mesure de flux optique	49
3.2.1	Analyse du besoin et des solutions de simulations existantes	49
3.2.2	Modification du simulateur MORSE	51
3.3	Simulation par contrôleurs évènementiels de trajectoires guidées par flux optique	54
3.3.1	Protocole de la simulation	54
3.3.2	Expérience en tunnel avec réduction centrale symétrique	57
3.3.3	Expérience en tunnel avec changement brutal de largeur	59
3.4	Conclusion sur le simulateur et les stratégies simulées	62

3.1 Environnement et stratégies de navigation inspirées de l'abeille

Voler à grande vitesse à proximité d'obstacles représente un véritable défi pour les microdrones. Pour effectuer de telles tâches, les abeilles utilisent principalement le flux optique [Serres et al., 2008b, Baird et al., 2011, Goulard et al., 2015, Goulard et al., 2016, Serres et al., 2017]. Via cette perception visuelle, celles-ci peuvent voler à proximité de parois et ajuster leur vitesse en environnement exigü. En effet, certaines expériences ont observé l'adaptation du comportement de vol de l'abeille dans des tunnels de largeurs variables [Portelli et al., 2011, Srinivasan, 2011b]. D'autres expériences ont également montré ce même comportement de vol dans des tunnels comportant des changements abrupts de largeur [Baird et al., 2010] ou bien encore des variations soudaines du flux optique latéral en manipulant le type de texture [Linander et al., 2015]. Cette perception du flux optique permet ainsi un vol rapide et fiable en environnement exigü. De ce fait, différentes recherches s'appuient sur cette stratégie de vol afin de concevoir des autopilotes bio-inspirés pour des microdrones [Beyeler et al., 2009, Shoemaker et al., 2011, Roubieu et al., 2014, Expert and Ruffier, 2015a, Serres et al., 2017].

Des travaux ont observé un comportement de vol particulier chez l'abeille, basé sur le suivi de mur dans un corridor [Serres et al., 2008b]. L'abeille préférerait voler en prenant une référence de flux optique d'une des parois latérales plutôt que simplement se centrer dans un large corridor. L'autopilote ALIS¹ [Portelli et al., 2010] a été développé en 2010 dans l'équipe Biorobotique afin de mimer ce comportement dans un tunnel texturé. Il consiste à maintenir une trajectoire permettant de garder un contact visuel avec une paroi et à ajuster sa vitesse de déplacement en prenant en compte l'ensemble des mesures de flux optique. Cet autopilote s'appuie sur 4 mesures locales du flux optique (gauche, droite, haut et bas) et utilise la paroi la plus proche comme critère de suivi pour ensuite ajuster sa position à proximité de celle-ci et ajuste sa vitesse en fonction de la section la plus étroite (largeur ou hauteur) du tunnel.

Dans l'expérience présentée dans ce chapitre, l'autopilote ALIS est repris dans une simulation et amélioré pour une meilleure anticipation des obstacles en utilisant un plus grand nombre de mesures locales de flux optique dans différentes directions. Les orientations des mesures locales et leurs paramètres optiques sont choisis afin de correspondre à ce qui pourrait être envisagé avec les capteurs M²APix labelsec :mapix pour leur future utilisation à bord d'un microdrone.

1. ALIS : AutopiLot using an Insect-based vision System

3.2 Simulation de la perception de l'abeille pour la mesure de flux optique

3.2.1 Analyse du besoin et des solutions de simulations existantes

Les expériences de simulation menées avec l'autopilote ALIS, en 2010, étaient effectuées entièrement sous l'environnement MATLAB / Simulink[©] y compris la simulation des caractéristiques optiques de la perception de l'abeille. Le rendu des perspectives y est plus complexe ainsi que la gestion de la lumière (variation de lumière, réflexion...). De plus, la simulation 3D est lourde à mettre en œuvre (construction de l'environnement 3D) et l'ensemble est extrêmement lent. Il est donc nécessaire d'utiliser des outils mieux adaptés à la simulation d'environnement visuel 3D pour obtenir des résultats de simulation plus réalistes, plus rapidement en y incluant le plus de souplesse possible. Les critères de choix du logiciel de simulation sont :

- Avoir la possibilité d'utiliser les modèles de contrôle MATLAB / Simulink[©] pour permettre l'utilisation de travaux de recherche déjà existants, sachant que ces modèles de contrôle sont aussi directement utilisés sur les plateformes robotiques du laboratoire (e.g., drone, rover, etc.).
- Faciliter la mise en place d'environnements 3D simples ou complexes avec un rendu visuel réaliste (e.g., perspective, lumière, etc.),
- Possibilité d'interfacer la simulation 3D avec les modèles MATLAB / Simulink[©],
- Permettre la création de capteurs optiques hautement personnalisables pour simuler la perception visuelle de l'abeille,
- Permettre une simulation à haute fréquence, de plusieurs centaines, voir milliers de hertz,
- Obtenir une vitesse de simulation acceptable pour éviter qu'elle soit fastidieuse et chronophage.

Après études de plusieurs solutions existantes de simulateurs comme SIMBAD², GAZEBO³, Webots⁴, JBullet⁵, ROS⁶ ou MORSE⁷, c'est finalement le simulateur MORSE qui a été sélectionné.

MORSE, pour Modular OpenRobots Simulation Engine, est un simulateur générique open-source conçu pour les recherches académiques en robotique. Principalement développé au LAAS-

2. simbad.sourceforge.net

3. gazebo.org

4. cyberbotics.com

5. jbullet.advel.cz

6. ros.org

7. openrobots.org/morse

CNRS à Toulouse, il est aujourd'hui soutenu et développé par de nombreux laboratoires de recherche. Il a été pensé pour éviter aux chercheurs de développer intégralement un nouveau simulateur pour chaque nouveau besoin de simulation en robotique. Il permet une simulation 3D réaliste de petits ou larges environnements, qu'ils soient intérieurs ou extérieurs (Fig. 3.1).

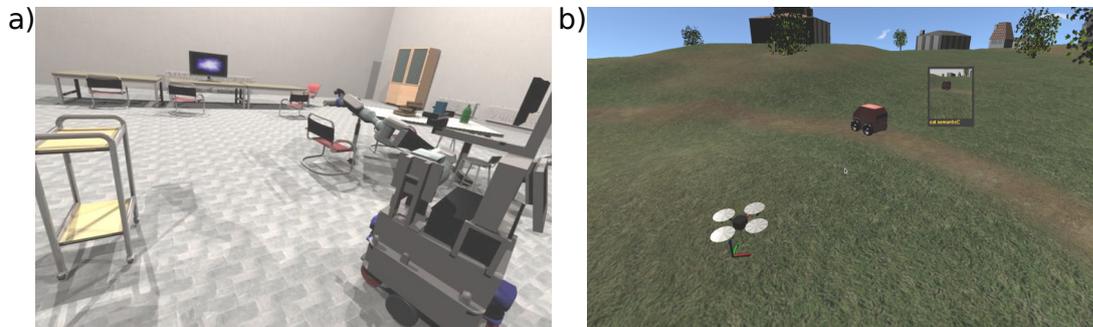


FIGURE 3.1: Rendu visuel du simulateur MORSE. a) scénario en intérieur avec un robot équipé d'un bras articulé. b) scénario extérieur avec un quadrirotor équipé d'une caméra suivant un robot roulant.

Ce simulateur est entièrement contrôlable par ligne de commande et les paramètres des scènes simulées sont générés par des scripts en Python permettant la conception rapide de scénarios. Le rendu graphique est basé sur Blender Game Engine⁸ (BGE) basé lui-même sur Open-GL. Il supporte la génération de "shader" (absorption et diffusion de la lumière, réflexions, réfractions et ombrage des textures) le "multi-texturing" et des options avancées de lumière. Le moteur physique "Bullet" est aussi embarqué pour permettre la simulation physique des collisions. Le simulateur peut s'interfacer avec des logiciels tiers grâce à différents protocoles notamment avec le protocole réseau TCP/IP (via Wifi ou Ethernet). Par défaut, le simulateur MORSE propose déjà une grande variété de simulations d'équipements :

- Capteurs conventionnels : caméras, scanner laser (LIDAR), GPS, odomètre...
- Actionneurs : contrôleur de vitesse, contrôleur haut-niveau de points de passage...
- Plateformes robotiques de base : quadrirotor, robot à 4 roues, robot terrestre avec bras articulé, sous-marin...

Enfin, il est possible de créer et d'ajouter ses propres actionneurs, capteurs et plateformes. Étant basé sur le logiciel d'édition 3D Blender, MORSE est aussi compatible avec de nombreux formats de fichier 3D.

Le simulateur MORSE fournit un environnement déjà très complet et possède des capacités de personnalisation indispensables pour nos simulations de stratégies de navigations inspirées des insectes volants.

8. fr.wikipedia.org/wiki/Blender_Game_Engine

3.2.2 Modification du simulateur MORSE

Les simulations déjà effectuées au sein du laboratoire en automatique pour la perception et la navigation ont été faites principalement sous MATLAB / Simulink[©] et utilisées sous Windows. Or, le simulateur MORSE a un fonctionnement stable seulement sous un système Linux. Néanmoins, cela ne pose pas de problème puisque ces deux logiciels ont la capacité de communiquer via le protocole réseau TCP/IP, ils pourront donc être interfacés tout en étant exécutés sur deux PC différents (ou sur un seul et même ordinateur avec l'utilisation d'une machine virtuelle).

L'utilisation de ce simulateur doit apporter aux modèles de contrôle déjà utilisés sous MATLAB / Simulink[©] de l'information visuelle, réaliste en termes de lumière, de texture et de perspective. Ainsi, la première chose à faire fut de créer un capteur virtuel simulant les caractéristiques optiques de la vision floue de l'abeille.

Pour imiter le flou gaussien présent sur chaque photorécepteur, un capteur virtuel de type camera incluant un rendu de la scène 3D sous forme d'une image de 100x100 pixels avec le champ visuel voulu fut choisi. Il a fallu ensuite calculer la somme des multiplications terme à terme de cette matrice de 100x100 pixels avec un filtre gaussien de même taille comme schématisé sur la Fig. 3.2.

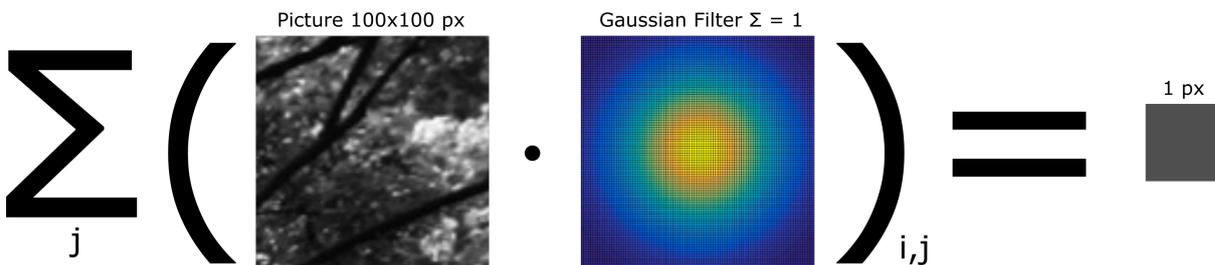


FIGURE 3.2: Filtrage d'une image de 100x100 pixels acquise dans le simulateur MORSE afin de simuler la perception d'un photorécepteur de l'œil composé de l'insecte.

Le calcul du flux optique par temps de déplacement (voir section 2.3) se fait au minimum avec deux photorécepteurs d'une sensibilité angulaire gaussienne se recouvrant en partie. Ici, le recouvrement choisi est de 50% (i.e., $\Delta\varphi \approx \Delta\rho$ comme observé chez les insectes diurnes [Land, 1997]). Pour simuler cette caractéristique, l'image acquise dans la simulation est faite avec une résolution de 100x150 pixels et un champ visuel déterminé selon le $\Delta\varphi$ et le $\Delta\rho$ choisis. Le filtrage gaussien décrit précédemment (Fig. 3.2) est appliqué sur la partie gauche de l'image ce qui donnera la valeur simulée du photorécepteur 1 (ph1) et de même avec la partie droite de l'image qui donnera la valeur du photorécepteur 2 (ph2) (Fig. 3.3). Pour chaque image acquise, ce processus est effectué afin d'obtenir les signaux temporels respectifs de ces deux photorécepteurs formant ainsi l'élément de base d'un capteur de mouvement local.

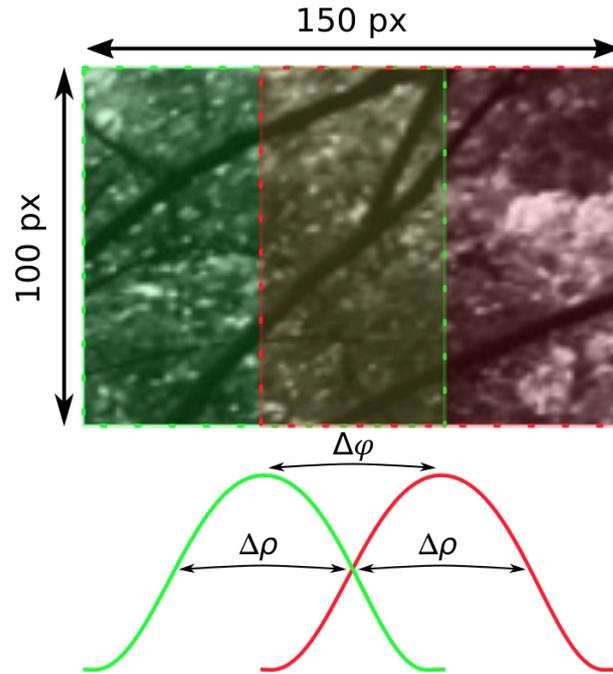


FIGURE 3.3: Image de 100x150 pixels sur laquelle le filtre gaussien de 100x100 est appliqué deux fois avec un recouvrement de 50% afin de simuler deux photorécepteurs voisins.

L'inconvénient d'effectuer ce traitement d'image réside dans le langage de programmation du simulateur (Python) qui est relativement lent. En effet, Python est un langage interprété et appliquer ce flou gaussien sur une dizaine de matrices de 100x100 pixels induit un temps de traitement de plusieurs dizaines de millisecondes. En simulant la vue de l'insecte, il est souhaitable d'effectuer l'échantillonnage de ces photorécepteurs à plusieurs centaines voir milliers de hertz. Si le traitement de l'ensemble des photorécepteurs prend 100 ms et qu'ils sont échantillonnés à 1000 Hz, alors il faudra 100 secondes pour simuler 1 seconde. Il y a donc un facteur 100 entre le temps écoulé réellement et le temps écoulé dans la simulation. Pour répondre à ce problème de praticité et accélérer la simulation, le traitement permettant d'effectuer le flou gaussien est écrit en Cython⁹, ce qui permet à cette portion de code d'être compilée puis de pouvoir être appelée par le reste du code Python. Le résultat de cette compilation permet d'obtenir le même traitement d'image, mais exécuté bien plus rapidement puisque le flou gaussien pour un photorécepteur est appliqué en moins de 0.4 ms alors qu'il l'était en plus de 20 ms sans cette optimisation.

L'ensemble de ce processus est intégré au sein d'un capteur à part entière dans le simulateur MORSE. Le capteur peut être ainsi embarqué sur n'importe quel robot de la simulation avec une position et une orientation voulue sur le robot mobile. Ainsi, le simulateur MORSE modifié permet l'utilisation de capteurs visuels de deux photorécepteurs simulant les caractéristiques

9. Cython : Langage de programmation et compilateur qui simplifient l'écriture d'extensions compilées pour Python, cela permet d'augmenter les performances d'un code jusqu'à un facteur 100.

optiques de l'œil composé de l'insecte. Le capteur est aussi équipé d'une interface TCP/IP qui lui est propre, comme la plupart des autres éléments de la simulation, afin de transmettre les données acquises en réseau.

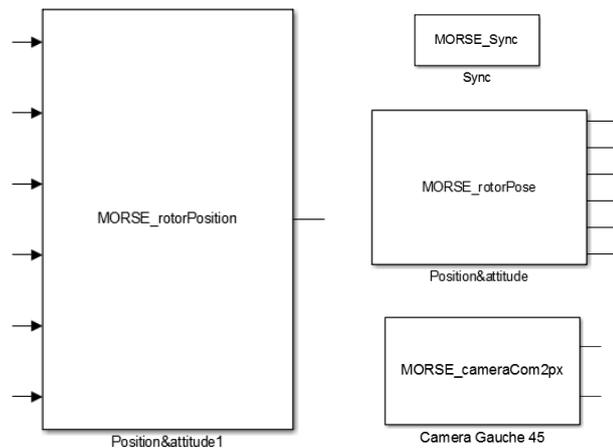


FIGURE 3.4: Exemple de bloc MATLAB / Simulink[®] permettant d'interfacer le modèle de contrôle avec la simulation 3D MORSE.

Pour interfacer MATLAB / Simulink[®] avec MORSE, son environnement, les robots, les actionneurs et les capteurs qu'il simule, il a aussi été nécessaire de créer une librairie pour MATLAB / Simulink[®] permettant les échanges via le réseau TCP/IP. Pour être intégrés à un modèle Simulink, différents blocs ont été créés pour permettre, par exemple, l'envoi de la position et de la vitesse de déplacement au robot simulé, ou bien la réception des signaux de photorécepteurs simulés dans MORSE tel que la camera de 100x150 pixels retournant les valeurs des deux photorécepteurs après application du flou gaussien (Fig. 3.4). Un bloc de synchronisation (MORSE_Sync, Fig. 3.4) permet de s'assurer que le simulateur MORSE et la simulation Simulink soient bien en phase. Ce bloc de synchronisation permet aussi au besoin de simuler une latence entre les boucles de contrôle exécutées dans Simulink et les capteurs/actionneurs simulés dans MORSE.

3.3 Simulation par contrôleurs évènementiels de trajectoires guidées par flux optique

Pour ce travail de simulation, la gestion des trajectoires et des boucles de contrôle est prise en charge par MATLAB / Simulink[®] ; la simulation de l'environnement 3D, les rendus visuels et la détection de collisions sont gérés par le simulateur MORSE (Fig. 3.5). Cette partie représente de manière synthétique une collaboration interne de l'équipe Biorobotique portant sur le contrôle évènementiel. Ainsi, l'autopilote initial ALIS [Portelli et al., 2010] repris dans cette simulation a été aussi modifié pour avoir ce type de contrôle dont l'objectif est de réduire la charge de calculs au niveau de la commande des dynamiques de vols tout en exploitant le caractère évènementiel de l'information visuelle. Cet aspect ne sera abordé que de façon brève, pour plus de détails à ce sujet se référer à l'article [Serres and Ruffier, 2016, Raharijaona et al., 2017].

3.3.1 Protocole de la simulation

Le but ici est d'expérimenter au travers d'une abeille simulée la manière dont elle contrôle sa vitesse et évite les collisions avec les murs dans un environnement de type tunnel. Chaque axe de translation du modèle dynamique de l'abeille simulée est découplé, comme c'est le cas pour un quadrirotor.

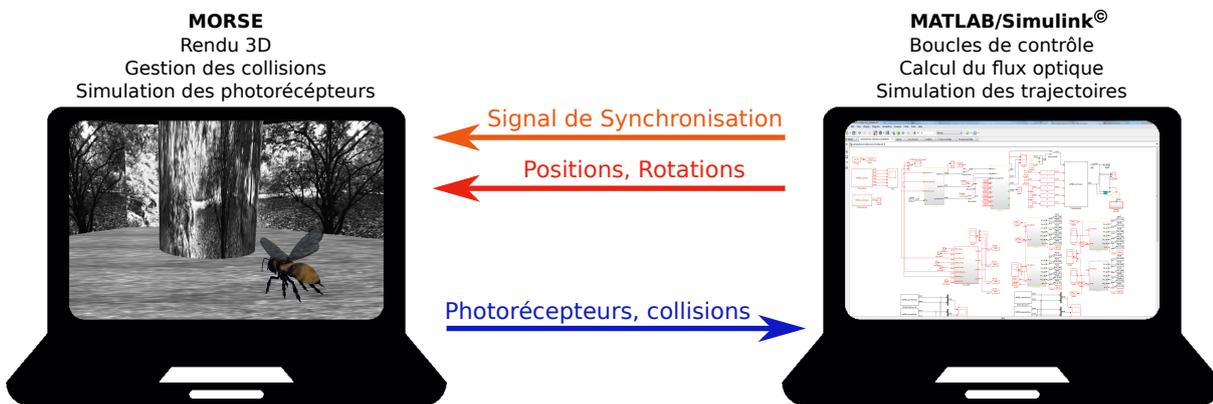


FIGURE 3.5: Représentation de la communication réseau (TCP/IP) entre la simulation MORSE (à gauche) et MATLAB / Simulink[®] (à droite). MORSE génère l'environnement 3D, la gestion des collisions et la perception au travers de capteurs simulant les caractéristiques du système visuel de l'abeille, alors que MATLAB / Simulink[®] gère l'exécution des boucles de contrôle, le calcul du flux optique et la dynamique de l'agent simulé. Un signal de synchronisation permet de faire en sorte que les deux simulations soient temporellement synchrones.

L'abeille simulée est équipée de 10 capteurs locaux de flux optique composés chacun de

2 photorécepteurs, 6 capteurs dans le plan horizontal pour mesurer le flux optique des parois latérales et 4 capteurs dans le plan vertical pour mesurer le flux optique du sol et du plafond (Fig. 3.6). L'angle inter-photorécepteur $\Delta\varphi$ et la sensibilité angulaire gaussienne $\Delta\rho$ d'un capteur de flux optique local orienté perpendiculairement à l'axe de déplacement (axe T sur la Fig. 3.6) sont choisis pour que $\Delta\varphi = \Delta\rho = 4^\circ$. Les autres capteurs orientés à 45° ou 135° ont un angle inter-photorécepteur et une sensibilité gaussienne inférieures due à leurs orientations par rapport à l'axe de déplacement : $\Delta\varphi_{45^\circ} = \Delta\varphi_{90^\circ} \times \sin(45^\circ) = 2,82^\circ$. Un gradient en sinus dans les plans vertical et horizontal, tel que celui proposé par [Franceschini et al., 1992], peut être appliqué pour calculer l'angle inter-photorécepteur correspondant aux autres directions de l'espace.

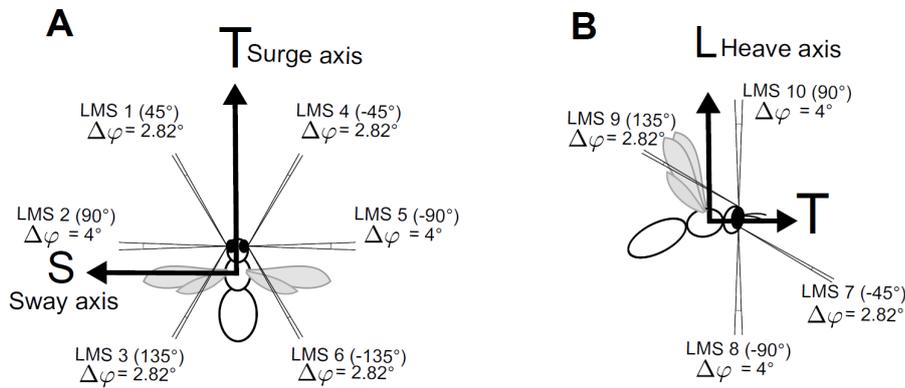


FIGURE 3.6: A) Vue du dessus de l'orientation des 6 capteurs de flux optique local du plan horizontal composés chacun d'eux d'une paire de photorécepteurs. B) Vue de côté de l'orientation des 4 capteurs de flux optique local dans le plan vertical. L : Axe vertical (hauteur). T : axe frontal de déplacement, S : axe latéral. LMS pour Local Motion Sensor. Tiré de [Raharijaona et al., 2017]

Le flux optique est une combinaison de deux composantes vectorielles, le flux optique de translation et le flux optique de rotation. Il a été établi que les hyménoptères (e.g., abeilles, guêpes, fourmis, etc.) stabilisent leur regard en compensant chaque rotation du corps [Viollet and Zeil, 2013]. Dans cette simulation, on considère que la tête de l'agent est parfaitement stabilisée en supprimant le flux optique due à la rotation en tangage et en roulis du corps, mais aussi en lacet en stabilisant le lacet de l'agent simulé suivant l'axe du tunnel. Ainsi, la tête artificielle équipée des photorécepteurs ne sera qu'en mouvement de translation pure.

Le contrôle, basé sur l'autopilote ALIS [Portelli et al., 2010], est composé de deux boucles visio-motrices : la boucle de contrôle de vitesse et la boucle de contrôle de position. Ces deux boucles fonctionnent en parallèle et sont inter-dépendantes. La vitesse est ajustée en fonction du couple de surfaces générant le plus de flux optique (somme des flux optiques verticaux ou

somme des flux optiques horizontaux) et est régulée à une consigne déterminée de flux optique ("Forward OF set-point" en bleu sur la Fig. 3.7) en agissant sur le tangage.

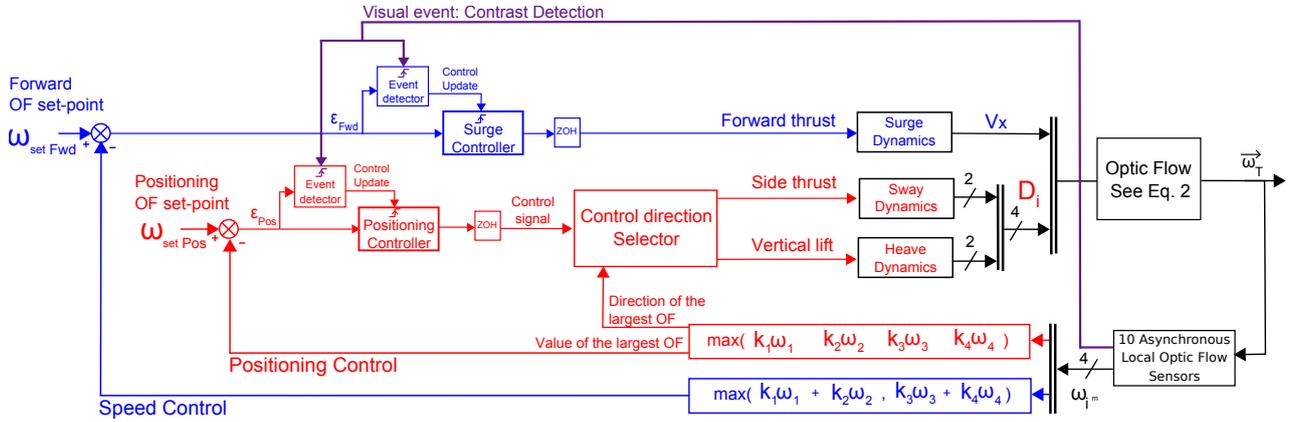


FIGURE 3.7: Fonctionnement de la double boucle de régulation basée sur l'autopilot ALIS. La boucle rouge permet la régulation de la position en fonction du maximum de flux optique observé permettant ainsi d'éviter les obstacles et de suivre la paroi la plus proche. La boucle bleue régule la vitesse en fonction du couple de flux optique haut/bas ou gauche/droite le plus important. Une partie événementielle en violet vient déclencher ces deux boucles de contrôle seulement lors de la détection de contrastes. Tiré de [Raharijaona et al., 2017]

La trajectoire suivie est sélectionnée en fonction de la paroi générant le plus de flux optique. La position est régulée en fonction de celles-ci via une régulation de flux optique ("Positioning OF set-point" en rouge sur la Fig. 3.7). Un sélecteur de direction, Fig. 3.8, présent dans la boucle de contrôle de position ("Control direction selector" Fig. 3.7), détermine automatiquement quelle surface du tunnel sera suivie (i.e., mur de gauche ou de droite, sol, plafond). Il multiplie le signal de sortie du contrôleur de position par un facteur de direction ("u(3)" Fig. 3.8) permettant d'appliquer ce contrôle sur l'actionneur correspondant (roulis pour le contrôle de la position latérale en fonction des murs ou poussée pour la position verticale en fonction du sol ou du plafond). Le calcul des flux optiques est assuré par l'algorithme de temps de déplacement par seuillage (voir section 2.3) qui est aussi utilisé comme signal de rétroaction pour le contrôle événementiel (Fig. 3.7). Ainsi, les boucles de régulations sont exécutées seulement lorsqu'un événement visuel survient, ici la détection d'un contraste optique générant une mesure locale de flux optique.

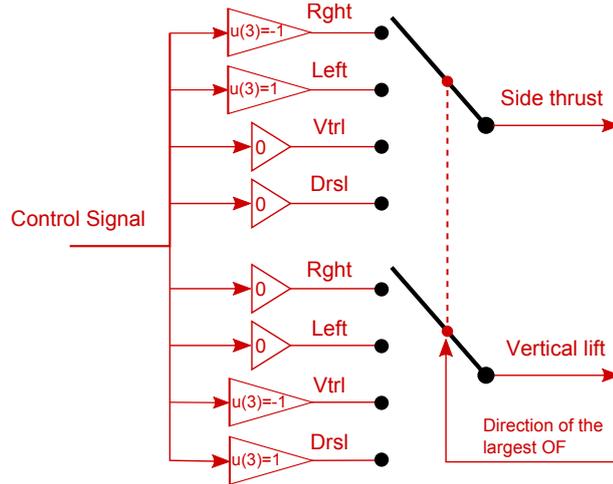


FIGURE 3.8: Contrôleur de direction permettant de sélectionner la direction de la surface à suivre (murs, sol ou plafond). Il multiplie le signal de contrôle de position par un facteur de direction sélectionné par le maximum de flux optique détecté. Tiré de [Raharijaona et al., 2017]

3.3.2 Expérience en tunnel avec réduction centrale symétrique

Dans cette simulation, le tunnel à section carrée fait 6 m de long sur 1 m de large à ses extrémités. L'angle d'inclinaison des parois est de 7° jusqu'au centre du tunnel puis l'inclinaison s'inverse. La simulation commence avec l'abeille simulée à l'entrée du tunnel avec comme condition initiale une vitesse nulle, $x_0 = 0,1$ m et différentes valeurs de y_0 et z_0 (Fig. 3.9). Durant les premières 800 ms, l'abeille simulée est contrôlée en boucle ouverte pour permettre les premières mesures de flux optique. Puis, le flux optique est régulé en boucle fermée via les contrôleurs évènementiels. Les figures 3.9B,C,D montrent les 3 trajectoires effectuées respectivement en perspective, dans le plan vertical, puis dans le plan horizontal. La position de l'abeille simulée est affichée toutes les 300 ms.

On peut ainsi observer que l'abeille a augmenté sa distance à la fois avec le sol et le mur le plus proche alors que sa vitesse a augmenté automatiquement jusqu'à $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ (Fig. 3.9). La figure 3.9E montre que la boucle de vitesse basée sur le flux optique a bien joué son rôle, en effet, la vitesse de l'abeille simulée ajuste correctement sa vitesse en fonction de la proximité des obstacles (ici les parois du tunnel).

La figure 3.10A représente la consigne sur la somme du flux optique fixée à $540^\circ/s$ (ligne en pointillés) qui permet de réguler la vitesse. La figure 3.10B, quant à elle, représente la consigne du flux optique maximum défini à $315^\circ/s$ permettant de réguler la position vis-à-vis de la paroi la plus proche. Ces deux boucles de régulation ont donc permis de franchir le tunnel en dépit des variations de section du tunnel sans pour autant connaître la géométrie du tunnel.

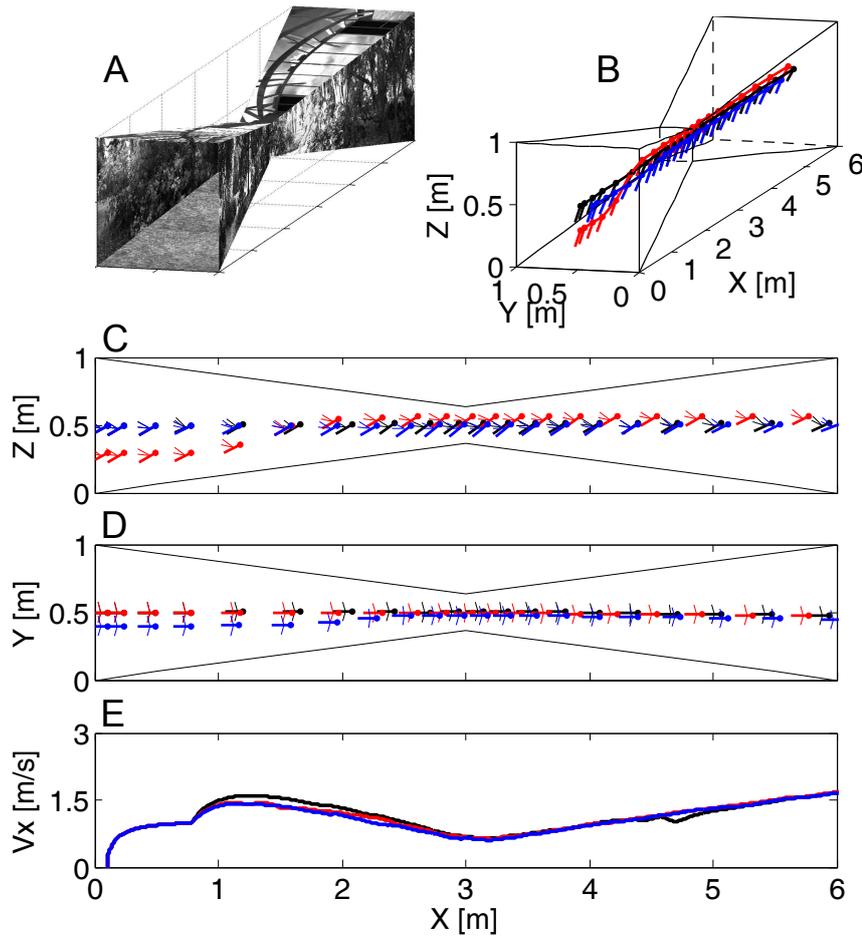


FIGURE 3.9: A) Vue en perspective du tunnel texturé pourvu d'une double réduction en son centre. B) Trajectoires 3D des simulations de vol d'abeilles avec comme conditions initiales $x_0 = 0,1m$; $y_0 = 0,5m$; $z_0 = 0,5m$ (en noir), $x_0 = 0,1m$; $y_0 = 0,4m$; $z_0 = 0,5m$ (en bleu) et $x_0 = 0,1m$; $y_0 = 0,5m$; $z_0 = 0,3m$ (en rouge), les positions sont affichées toutes les 300 ms. C) Trajectoires dans le plan vertical (x, z) , et D) dans le plan horizontal (x, y) . E) Profil de vitesse en fonction de la distance parcourue x . Tiré de [Raharijaona et al., 2017]

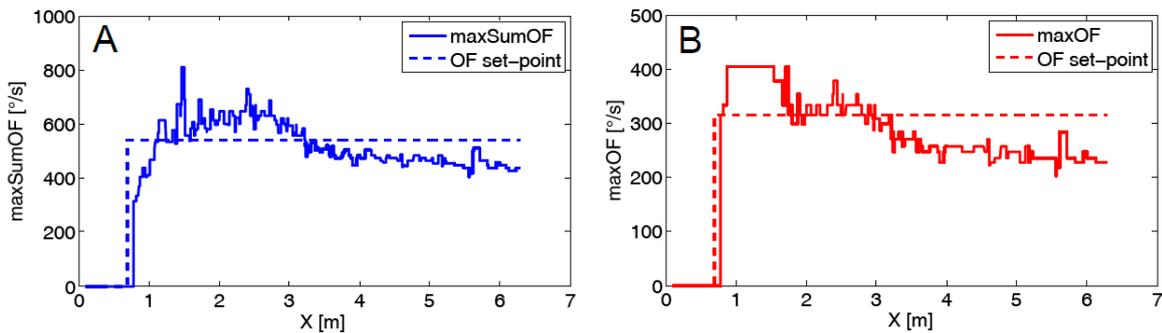


FIGURE 3.10: Régulation du flux optique lors de la trajectoire 3D avec les conditions initiales $x_0 = 0,1m$; $y_0 = 0,5m$; $z_0 = 0,3m$. A) Régulation de vitesse via une consigne à $540^\circ/s$ sur le maximum de la somme du flux optique bilatéral ou bi-vertical. B) Régulation de la position par une consigne à $315^\circ/s$ vis-à-vis de la direction présentant le maximum de flux optique (gauche, droite, haut ou bas). Tiré de [Raharijaona et al., 2017]

3.3.3 Expérience en tunnel avec changement brutal de largeur

La première expérience présentait un tunnel aux variations progressives (parois inclinées). Ici, l'expérience confronte l'autopilote à un tunnel constitué d'une variation brutale de largeur en son centre. Le tunnel simulé mesure 12 m de long sur 1 m de large à son entrée et une réduction horizontale de moitié est présente en son centre. Ce tunnel n'ayant pas de variation verticale, il est dépourvu de plafond, seule une régulation ventrale est conservée en plus des régulations latérales. L'abeille simulée est lancée deux fois avec les mêmes conditions initiales et en boucle ouverte durant 1,5 s pour permettre l'initialisation des mesures de flux optique. La différence entre ces deux abeilles simulées est que les orientations des capteurs de flux optique de la deuxième (en rouge Fig. 3.11B,C,D,E) ont été modifiées. Les 6 capteurs du plan horizontal passent d'azimuts de $\pm 45^\circ$, $\pm 90^\circ$ et $\pm 135^\circ$ à des azimuts de $\pm 30^\circ$, $\pm 90^\circ$ et $\pm 150^\circ$.

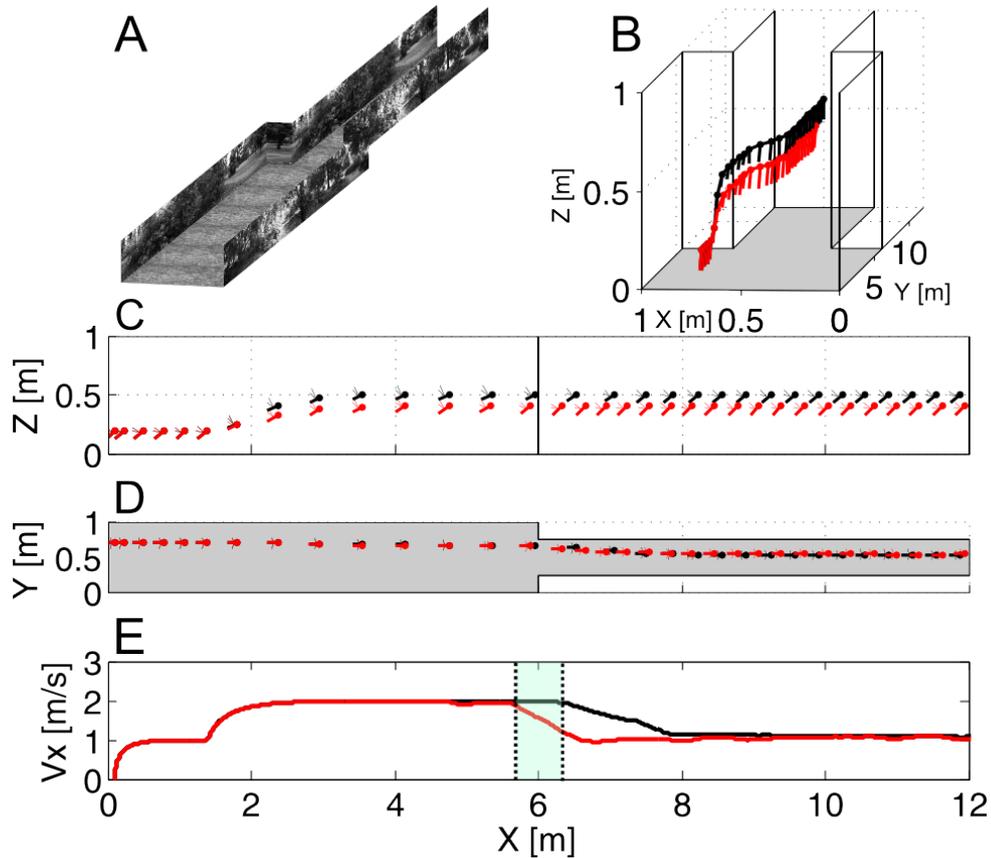


FIGURE 3.11: Comparaison entre deux configurations d'organisation spatiale des capteurs de flux optique : en noir la configuration initiale avec les capteurs frontaux à $\pm 45^\circ$ et en rouge la configuration avec ces mêmes capteurs à $\pm 30^\circ$. A) Vue en perspective du tunnel avec son changement de largeur abrupt en son centre. B) Trajectoires des deux abeilles simulées avec comme conditions initiales $x_0 = 0, 1m$; $y_0 = 0, 7m$; $z_0 = 0, 2m$ affichées toutes les 300 ms. C) Trajectoires dans le plan vertical (x, z) , et D) dans le plan horizontal (x, y) . E) Profil de vitesse en fonction de la distance parcourue x . Tiré de [Raharijaona et al., 2017]

Il est possible d'observer sur ces deux trajectoires sensiblement semblables qu'une différence notable est présente sur le profil de vitesse au niveau du changement brutal de largeur du tunnel (Fig. 3.11E à $x = 6$ m). L'abeille simulée en rouge équipée de capteurs de flux optique frontaux orientés à $\pm 30^\circ$ a une meilleure réactivité sur l'ajustement de sa vitesse que l'abeille simulée en noir avec ses capteurs orientés à $\pm 45^\circ$.

La deuxième configuration optique (abeille simulée en rouge Fig. 3.11) donnant de meilleurs résultats, est réutilisée pour 3 trajectoires supplémentaires dans le même tunnel, mais cette fois-ci avec des conditions initiales différentes. On note que l'abeille simulée réagit différemment selon les conditions initiales (surtout sur le profil de vitesse Fig. 3.12E), car les contrastes vus par celle-ci sont différents selon sa position dans le tunnel, donc les commandes événementielles diffèrent aussi.

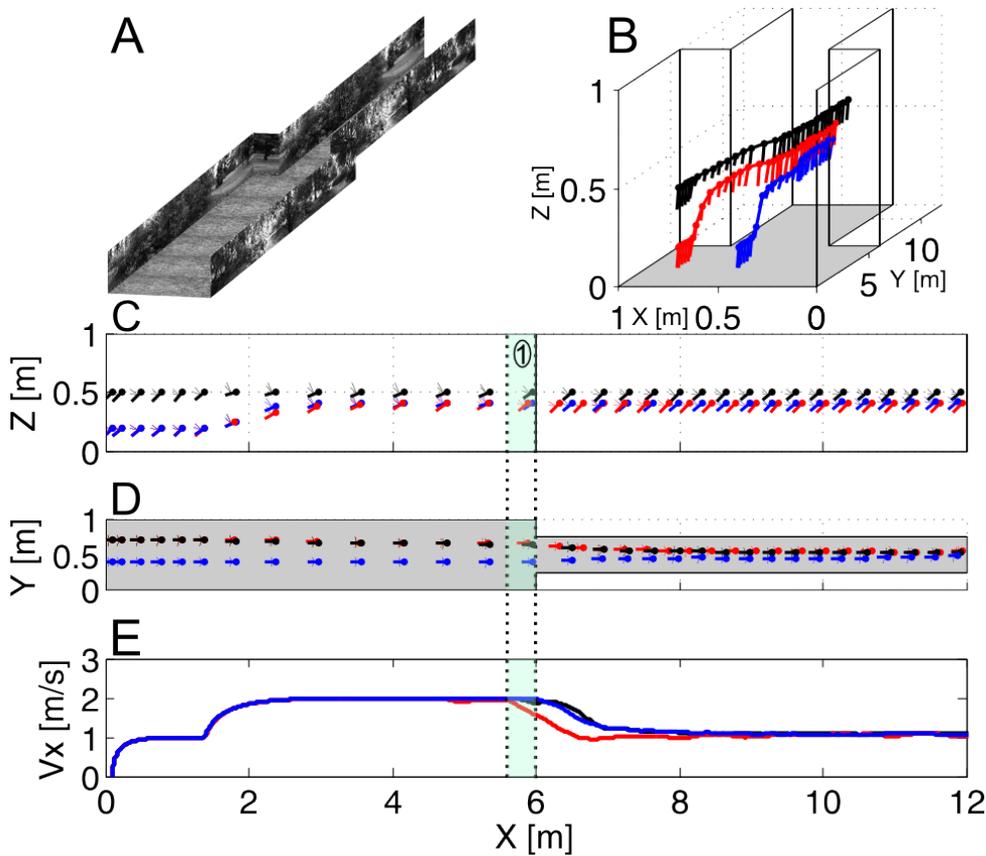


FIGURE 3.12: Comparaison entre 3 jeux de conditions initiales avec la configuration de capteurs de flux optique frontaux à $\pm 30^\circ$. A) Vue en perspective du tunnel avec son changement de largeur abrupt en son centre. B) Trajectoires des 3 abeilles simulées avec comme conditions initiales $x_0 = 0,1m$; $y_0 = 0,7m$; $z_0 = 0,5m$ en noir, $x_0 = 0,1m$; $y_0 = 0,4m$; $z_0 = 0,5m$ en bleu et $x_0 = 0,1m$; $y_0 = 0,7m$; $z_0 = 0,2m$ en rouge. Les positions sont affichées toutes les 300 ms. C) Trajectoires dans le plan vertical (x, z), et D) dans le plan horizontal (x, y). E) Profil de vitesse en fonction de la distance parcourue x . Tiré de [Raharijaona et al., 2017]

Les mesures de flux optique régulées et affichées sur la Fig. 3.13 ont permis encore une fois

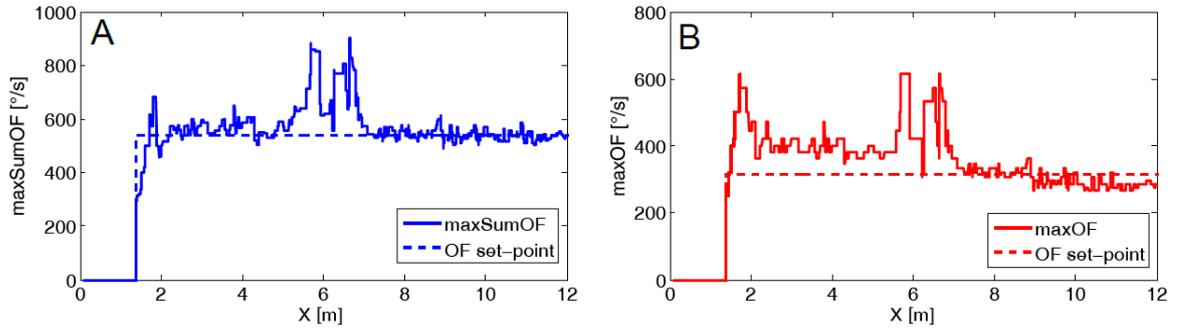


FIGURE 3.13: Régulation du flux optique lors de la trajectoire 3D avec les conditions initiales $x_0 = 0,1m$; $y_0 = 0,7m$; $z_0 = 0,2m$. A) Régulation de vitesse via une consigne à $540^\circ/s$ sur le maximum de la somme du flux optique bilatéral ou bi-vertical. B) Régulation de la position par une consigne à $315^\circ/s$ vis-à-vis de la direction présentant le maximum de flux optique (gauche, droite, haut ou bas). Tiré de [Raharijaona et al., 2017]

d’ajuster la trajectoire et la vitesse d’une abeille simulée Fig. 3.12 équipée de seulement 6 capteurs de flux optique local dans le plan horizontal. La trajectoire en rouge montre même que la vitesse a été réduite avant la variation brutale de la largeur du tunnel (Fig. 3.12E), comportement semblable en tous points à ce qui a déjà été observé chez les apidés dans des conditions similaires de vol en tunnel [Baird et al., 2010, Linander et al., 2015].

3.4 Conclusion sur le simulateur et les stratégies simulées

D'une part, l'architecture de simulation, développée lors de ce travail de recherche, va permettre la mise en place rapide de nouvelles expériences de simulations portant sur la perception du flux optique bio-inspirée dans des environnements pouvant être très réalistes et intégrant plus de complexité (e.g., perspective, lumière, transparence, réflexion, objet en mouvement, etc.).

D'autre part, ces simulations ont permis de valider le fonctionnement des stratégies de régulation de flux optique pour à la fois éviter les obstacles en effectuant un suivi de paroi semblable à ce qui a été observé chez l'abeille et aussi ajuster la vitesse en fonction de la proximité générale des obstacles. Ainsi voler dans un tunnel, même exigu, avec seulement quelques photorécepteurs est du domaine du possible.

Ces résultats ont été obtenus avec un contrôle évènementiel. Cela implique que les boucles de régulation n'ont pas été exécutées à chaque pas de temps ou à chaque échantillonnage des capteurs de flux optique, mais seulement lorsqu'un critère a été atteint, ici la détection d'un contraste optique [Raharijaona et al., 2017]. Il peut en résulter une diminution de la charge de calcul permettant potentiellement, pour de futures applications, de réduire la puissance des processeurs embarqués (donc leur taille, leur consommation, et leur prix), mais le principal intérêt de ce contrôle est de moins solliciter les actionneurs, donc de réduire l'usure et la consommation d'énergie.

Les résultats de ces expériences de simulations sur les stratégies de vol inspirées des abeilles sont suffisamment concluants pour les implémenter sur un microdrone et les tester en conditions de vol réel. Néanmoins, cette plateforme robotique volante devra embarquer plusieurs capteurs de flux optique, elle devra aussi pouvoir tous les échantillonner à haute fréquence, mais également stabiliser son système visuel pour supprimer toutes composantes de flux optique de rotation.

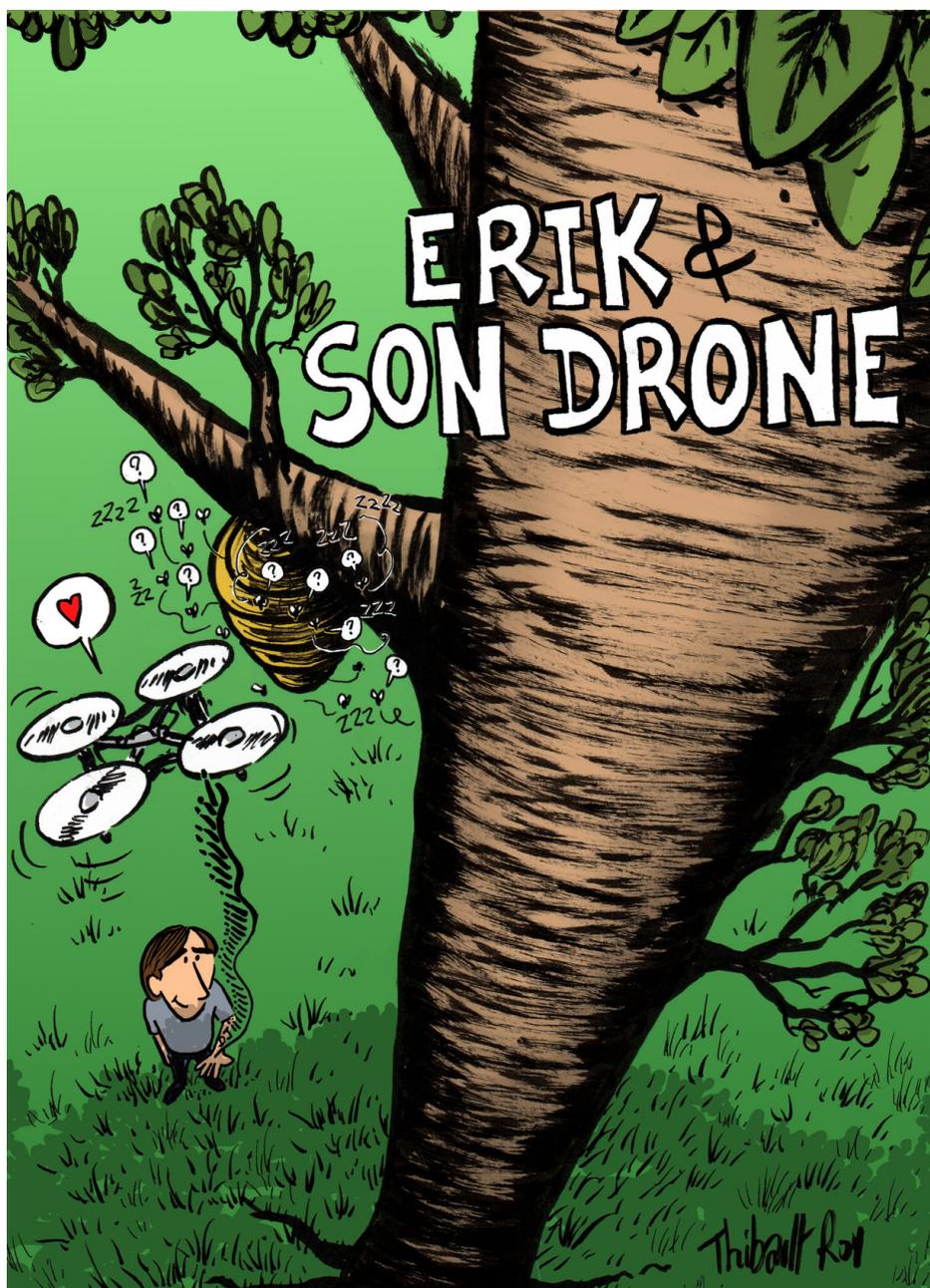
Chapitre 4

Plateforme robotisée pour l'implémentation de différentes stratégies de vols

Sommaire

4.1	Introduction	68
4.2	Présentation de la plateforme d'expérimentation et de l'environnement	68
4.2.1	Réactivité du microdrone par le temps réel dur	70
4.3	Conception d'un œil stabilisé dédié à la navigation bio-inspirée	71
4.3.1	Conception mécanique	73
4.3.2	Architecture évolutive de transmission de données	74
4.4	Tests préliminaires du contrôle de trajectoires	77
4.4.1	Test sur bâche défilante	77
4.4.2	Microdrone en vol longeant un environnement texturé	79

Et si la **SCIENCE**



était un **OBJET**

OU LA RECHERCHE EN DESSINS



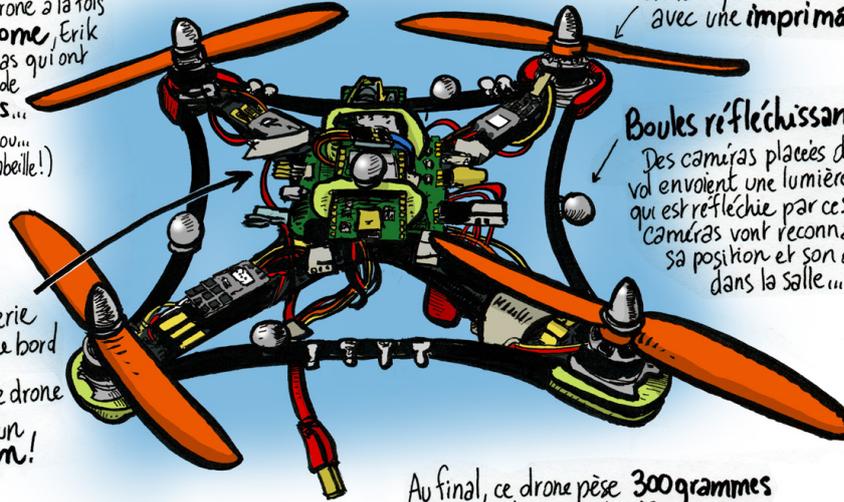
Erik VANHOUTTE est jeune chercheur en biorobotique au sein de l'Institut des Sciences du Mouvement à Aix-Marseille Université.

LE DRONE

Pour faire ses tests, Erik a assemblé son propre drone. Si l'assemblage n'est pas dur (ça reste à voir!), la programmation et les nombreux paramètres (masse de l'appareil, position des moteurs et autres...) posent pas mal de difficultés...

Pour avoir un drone à la fois **léger** et **autonome**, Erik utilise des caméras qui ont une résolution de seulement **12 pixels**... Et en plus, il voit flou... (Eh oui! Comme une abeille!)

Qui dit caméra légère, dit batterie et ordinateur de bord moins lourds! L'ordinateur de ce drone fait la taille d'un **chewing-gum**!



On fabrique certains composants avec une **imprimante 3D**

Boules réfléchissantes
Des caméras placées dans l'arène de vol envoient une lumière infrarouge qui est réfléchiée par ces boules... Les caméras vont reconnaître l'objet, sa position et son orientation dans la salle...

Au final, ce drone pèse **300 grammes** et a une autonomie de **17 minutes**

L'ARÈNE DE VOL

Elle est installée dans une ancienne **soufflerie**

Erik fait voler son drone ici!

On dirait une structure pour un concert...

Elle fait 6 mètres de large pour 8 mètres de long et 6 mètres de haut

Volets
Erik utilise un capteur qui supporte très bien les changements de lumière (il est **AUTOADAPTIF**)! C'est un gros avantage car il peut passer d'un intérieur sombre à un extérieur ensoleillé sans être ébloui!

17 caméras VICON®
Elles capturent et analysent le **mouvement** (comme au cinéma pour la Motion Capture)

Filet de sécurité
(IN-DIS-PEN-SA-BLE)



Pour ne pas salir, on met les pantoufles, SVP!

Au sol un **karami noir**... Ça absorbe les chocs et c'est peu réfléchissant. Donc les caméras ne sont pas éblouies... Erik place des **plaques de texture** au sol pour que le drone ait des repères...

Battle, Daphné, Erik, Guillaume, Maïmouna, Marie, Pierre et Sindy sont de jeunes chercheurs du Réseau des Experimentarium. Leurs questionnements, leurs tâtonnements, les instruments qu'ils apprennent à manipuler constituent les coulisses de la recherche.

Thibault Roy, Jo-Ann Campion et Marie-Laure Baudement ont recueilli leurs témoignages qui vous font découvrir le quotidien de leur travail. **En résultent ces dessins de Thibault Roy, fruits de discussions passionnantes et d'heures passées devant la table à dessin.**

Ce projet s'inscrit dans le cadre du Programme d'Investissement d'Avenir du Réseau des Experimentarium, qui organise des rencontres avec des jeunes chercheurs. Il a été réalisé par la Mission Culture Scientifique de l'université de Bourgogne en collaboration avec la cellule de culture scientifique et technique d'Aix-Marseille Université.

Retrouvez les autres planches sur le site du Réseau des Experimentarium, qui favorise les rencontres avec des jeunes chercheurs : www.experimentarium.fr

CONTACTS

Cellule de culture scientifique et technique - DRV
Aix-Marseille Université
3, place Victor Hugo
13003 Marseille
04 13 55 10 92
culture-scientifique@univ-amu.fr

Mission Culture Scientifique
université de Bourgogne
Sciences Gabriel
6, boulevard Gabriel
21 000 Dijon
03 80 39 90 99
culture-scientifique@u-bourgogne.fr

Dessin : © Thibault Roy

Coordination de la publication : Marie-Laure Baudement et Jo-Ann Campion

Conception graphique et mise en page : Jérôme Berthier et Mathilde Bosson

Tous droits réservés, reproduction interdite



4.1 Introduction

Récemment, une preuve de stabilité a été faite du bouclage visio-moteur bioinspiré d'un quadrirotor volant dans un corridor éventuellement jonché d'une large ouverture latérale [Keshavan et al., 2015]. Ce drone d'environ 60 cm d'envergure et d'une masse de 1 kg a utilisé la stratégie de suivi de mur dans un corridor de 2 m de large à une vitesse constante de $0,5 \text{ m.s}^{-1}$. Pour cette tâche l'algorithme Lucas-Kanade [Lucas et al., 1981] a été utilisé pour mesurer le flux optique sur 8 capteurs optiques répartis dans le plan horizontal, chacun d'eux composé d'une matrice de 64×64 pixels. Ces résultats valident l'hypothèse de la pertinence de la régulation du flux optique pour le vol en corridor. Pour aller plus loin sur cette démarche bio-inspirée de l'abeille, ce chapitre présente la conception d'un quadrirotor plus léger, équipé des capteurs M²APix présentés en Chap.2 permettant une perception très robuste aux variations lumineuses. Le calcul du flux optique par temps de déplacement, plus direct, correspond mieux à l'approche écologique que l'approche spatiale et cognitiviste de l'algorithme de Lucas-Kanade qui se base sur la comparaison d'images successives et donc nécessite plus de pixels pour fonctionner. Le système visuel embarqué sur le quadrirotor présenté dans ce chapitre est stabilisé pour limiter l'impact de la stabilisation en attitude du drone. Cette stabilisation permet de garder le système visuel fonctionnel lors de plus fortes accélérations et ainsi atteindre des vitesses de plusieurs m.s^{-1} sur de courtes distances.

4.2 Présentation de la plateforme d'expérimentation et de l'environnement

Pour tester les stratégies de vol par boucles de régulation de flux optique en conditions réelles, il est nécessaire de mettre en place un environnement contrôlé afin de définir et de mesurer les différentes variables pouvant intervenir dans les différentes tâches de navigation. Une plateforme robotique devra être choisie, supportant un prototype de rétine pour mesurer le flux optique dans des directions nécessaires au suivi d'un protocole de test des stratégies de navigation.

La plateforme robotique volante choisie est le quadrirotor X4-MaG conçu principalement par Augustin Manecy [Manecy et al., 2015] en collaboration avec l'équipe Biorobotique de l'Institut des Sciences du Mouvement de Marseille et le Gipsa-Lab de Grenoble. Cette plateforme aura subi quelques modifications par rapport au modèle initial de 2015. Les moteurs ont déjà fait l'objet d'une mise à niveau référencée sur le site officiel du projet¹ passant des moteurs TURNIGY

1. http://www.gipsa-lab.fr/projet/RT-MaG/X4-MaG_Documentations.php

3800 KV au moteurs T-MOTOR 3100 KV. Ce changement permet d'augmenter le rendement, donc obtenir une meilleure autonomie avec seulement une légère perte de réactivité. Par la suite l'utilisation de nouveaux ESC (Electric Speed Control ou carte de contrôle de moteur brushless) nommé KISS ESC 12A, ont apporté un gain de performances et de réactivité, notamment grâce à un système de freinage régénérant². Enfin, un système de fixation ventral par 4 boutons aimants permet le changement simple et rapide de module fait sur-mesure comme la carte électronique associée au capteur M²APix utilisé pour mesurer le flux optique ventral dans la section 2.4.2.

Le choix de cette plateforme se justifie donc par plusieurs critères qui sont :

- Plateforme relativement petite (envergure de 30 cm) permettant des vols en intérieur avec de hautes dynamiques,
- Vitesse de vol pouvant aller à plus de $2,5 \text{ m.s}^{-1}$,
- Autonomie de 17 min à vide ($\simeq 320 \text{ g}$) en vol stationnaire,
- Charge utile de 90 g (4 min d'autonomie à 410g),
- Simplicité d'implémentation d'algorithme de test dans le système Linux embarqué via la toolbox Matlab/Simulink RT-MaG [Manecy et al., 2014] par communication WIFI.

Des plateformes semblables ont été utilisées depuis plusieurs années avec la toolbox Matlab/Simulink RT-MaG. Cette toolbox permet la conception d'un programme qui sera exécuté sur la plateforme robotique et d'un programme qui sera exécuté en local dans le logiciel Simulink de l'expérimentateur afin de lui permettre un contrôle en temps réel du robot et le suivi des variables clés. Un système de capture de mouvement 3D *Vicon*TM est utilisé dans une salle dédiée³, permettant de mesurer les positions et les orientations des objets équipés de marqueurs dans un volume de 6 x 6 x 8 m à une fréquence de 500 Hz et une précision de l'ordre du millimètre. Cette salle de vol est aujourd'hui indispensable pour mener des expérimentations en robotique aérienne en environnement contrôlé, mais son volume relativement petit est une contrainte forte pour la taille des plateformes utilisées, leur vitesse, leur trajectoire et leur réactivité. Dans notre cas, le robot est relativement petit, conçu pour des trajectoires rapides et précises afin de se rapprocher du domaine de vol des insectes, il est toutefois nécessaire de s'attarder sur la réactivité de ce robot, qui est un point clé du vol à haute dynamique en environnement exigü.

2. Aussi appelé freinage actif, ce système permet la récupération d'énergie lors du ralentissement de la vitesse de rotation des moteurs, et ainsi offrant une meilleure capacité de décélération et une meilleure autonomie au drone de par la récupération d'énergie.

3. www.flying-arena.eu

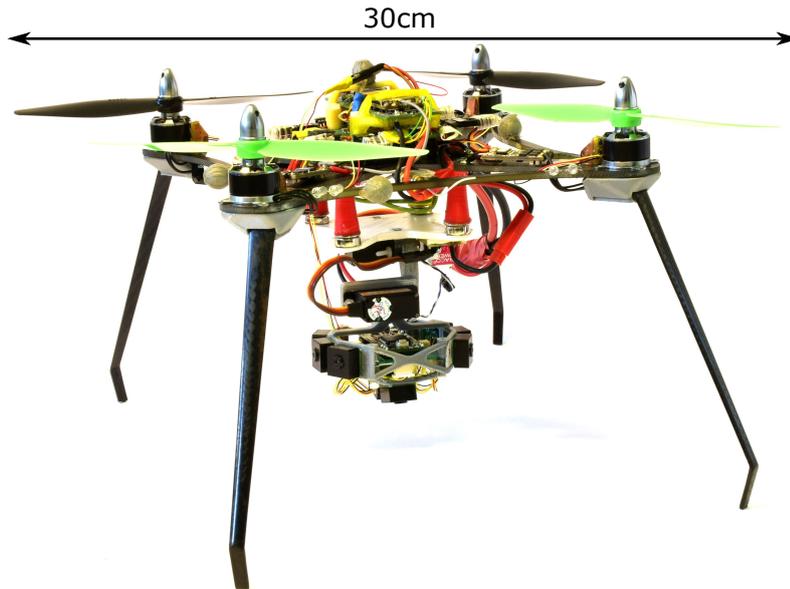


FIGURE 4.1: Photographie du drone X4-MaG entièrement construit et modifié pour ce travail de thèse, il embarque une nacelle stabilisée équipée de 8 capteurs M²APix (masse totale : 395 g, envergure : 30 cm, autonomie avec nacelle : 5 min). D'après [Vanhoutte et al., 2017b].

4.2.1 Réactivité du microdrone par le temps réel dur

Une plateforme volante à voilure tournante est un système à haut degré de réactivité (<10 ms). Elle n'est tolérante à aucune sorte de délai ou latence (>1 s) sous peine de crash. Elle doit être fiable et robuste, c'est un système temps réel. Le cœur calculatoire du drone X4-MaG est une Gumstix Overo AirStorm embarquant un processeur mono-cœur de 900 Mhz, 256 Mo de RAM, une puce WIFI et différents ports de communication (Série, I2C, SPI, ...). Cette unité de calculs est dédiée à l'ensemble des tâches critiques comme les commandes moteurs, les lois de contrôle en attitude et en position, la communication WIFI avec l'ordinateur de contrôle de l'opérateur. Toutes les autres unités de calculs embarquées ne sont là que pour du routage de données et dans quelques cas pour des pré-traitements. Néanmoins, par souci de sécurité, la carte auto-pilote NanoWii embarquée sur le drone peut prendre le contrôle total du drone à tout moment par simple actionnement d'un interrupteur par l'opérateur sur la radio-télécommande associé au drone. La Gumstix Overo utilisée sur le drone X4-MaG embarque un système d'exploitation Linux qui, de base, est une distribution Ångström⁴. Pour nos besoins, elle a ensuite été remplacée par une distribution que nous avons nous-mêmes personnalisée en fonction des besoins d'expérimentation et de plateforme, grâce au projet Yocto/OpenEmbedded. Un système d'exploitation comme Linux utilise un ordonnanceur, qui permet d'attribuer les tâches à exé-

4. Distribution Linux pour système embarqué. Cette distribution est le résultat de la fusion des projets OpenZaurus, OpenEmbedded et OpenSimpad.

ter sur les différents processeurs, c'est ce qui nous donne un environnement multitâche qui peut exécuter plusieurs calculs simultanément. Dans notre cas, notre unité de calculs n'a qu'un seul processeur, l'ordonnanceur va dans ce cas allouer un temps de calcul pour chaque tâche avec certaine priorité et permettre à certaines interruptions de stopper les processus en cours (hors processus du noyau Linux) et d'être exécutés immédiatement, c'est un système préemptif⁵. C'est ce principe qui donne "l'illusion" d'un système multitâche alors qu'il ne possède qu'un seul processeur, qui en réalité ne va exécuter que des fragments de tâche les uns à la suite des autres afin que l'ensemble avance "simultanément". De manière générale, l'ordonnanceur est conçu de sorte que l'expérience de l'utilisateur soit la plus fluide possible et ainsi donner une certaine priorité sur l'interface homme-machine. Dans le cas de notre drone, les priorités sont tout autre.

Les précédents doctorants ont tout d'abord appliqué le patch PREEMPT-RT qui permet de rendre le noyau Linux temps réel "mou" avec un minimum de modification [Manecy, 2015]. Ce patch permet de rendre le noyau Linux préemptible, ce qui rend possible l'interruption des processus du noyau et donc améliore la réactivité du système face à des interruptions extérieures. Ce patch permet en pratique de passer d'une latence du système de plusieurs centaines de microsecondes, voir plusieurs millisecondes, à moins de 100 μ s. Pour pousser la performance encore plus loin, nous avons décidé de passer à un temps réel "dur" grâce à une extension appelée, Xenomai. Celle-ci permet d'ajouter un co-noyau au système Linux qui se verra attribuer la gestion des tâches temps réel "dur" sans passer par le système Linux classique. Dans ce cas, la réactivité du système descend sous les 50 μ s. Pour que des fonctionnalités, comme la communication série, profite de ce temps réel il est nécessaire d'utiliser des drivers spécifiques au fonctionnement de Xenomai et parfois de les développer nous-mêmes.

Ces possibilités de réactivité sont très importantes dans ce travail de recherche, lorsque les puissances de calcul sont "faibles", la bonne gestion des priorités est un facteur clé pour obtenir d'un système limité la meilleure rapidité d'exécution. Ces aspects de réactivité et de latence, combinés à des algorithmes de détection d'obstacle légers et rapides contribuent aux capacités "réflexes" de la plateforme dans ses tâches d'évitement d'obstacle.

4.3 Conception d'un œil stabilisé dédié à la navigation bio-inspirée

Nous avons vu dans le chapitre 2 que le capteur M²APix était, malgré son développement encore à l'état de prototype, et du fait qu'il embarque deux technologies de pixel non utilisables simultanément, en fait un très bon candidat dans une tâche minimaliste de calculs de flux

⁵. Le multitâche préemptif désigne la capacité d'un système d'exploitation à exécuter ou arrêter une tâche planifiée en cours.

optique. Petit, léger, passif, haute fréquence d'échantillonnage, faible résolution spatiale, haute sensibilité et auto-adaptation de la réponse intégrée, sont autant d'atouts qui sont requis dans la miniaturisation d'une plateforme robotique volante à dynamique rapide qui cherche à suivre le comportement du vol des insectes tels que les abeilles. Pour aller vers une navigation autonome par le flux optique, le drone doit pouvoir détecter les obstacles environnants afin d'avoir la possibilité d'effectuer des manœuvres évasives dans toutes les directions. Devant la complexité de cette tâche, nous allons d'abord répondre à une problématique de vol de suivi de parois, principe déjà observé plusieurs fois en expérimentation chez l'insecte volant et partiellement reproduit sur des plateformes robotique à 2 ou 3 degrés de liberté [Serres et al., 2008a, Expert and Ruffier, 2015a].

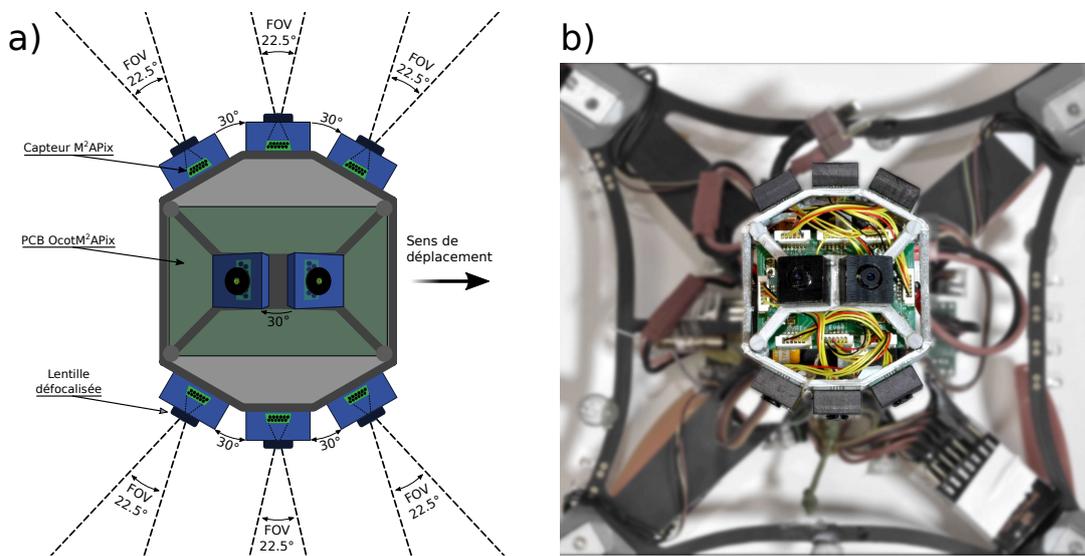


FIGURE 4.2: a) Vue ventrale de la nacelle OctoM²APix équipé des 8 capteurs M²APix dans leur boîtier (en bleu). En gris-vert, la carte électronique (PCB) sur-mesure permettant d'interconnecter les 8 capteurs M²APix. Le champ de vision de chaque capteur est noté FOV (pour Field of View). b) Photographie de la nacelle OctoM²APix montée sous le drone X4-MaG avec le même angle de vue que le schéma représenté en a).

Pour expérimenter les capacités du drone X4-MaG à évoluer dans un corridor en utilisant seulement des mesures de flux optique, nous l'avons doté de 8 capteurs M²APix, 3 orientés sur la droite, 3 sur la gauche, et 2 vers le bas. Pour privilégier des gammes de flux optique plus faibles que celles expérimentées dans le Chap.2, les caractéristiques optiques des capteurs M²APix sont modifiées en diminuant l'angle inter-pixel $\Delta\varphi$ à $3,4^\circ$. La conséquence de cette modification est que l'angle $\Delta\rho$ va naturellement augmenter à $3,8^\circ$. Ceci nous donne un champ visuel (FOV sur la figure 4.2) de $22,5^\circ$ dans le plan horizontal. L'orientation des capteurs M²APix sur une même face est faite dans un compromis entre le choix d'un champ couvert le plus grand possible et de faibles zones mortes.

4.3.1 Conception mécanique

La nacelle OctoM²APix (Fig. 4.3a), pour des contraintes d'intégration et de stabilité, est placée sous le drone grâce à des fixations magnétiques la rendant amovible et facilitant les opérations de maintenances et de calibration. Sa structure est composée de deux parties détachables permettant d'accéder aux cartes électroniques se trouvant en son centre. Le tout est surmonté de deux servomoteurs MKS DS480, montés en série permettant d'obtenir des rotations en tangage et roulis. Ce montage en série permet à la nacelle octoM²APix de compenser les mouvements de débattement angulaire ($\pm 30^\circ$) en attitude du quadrirotor X4-MaG (Fig. 4.3b). Dans cette configuration, les axes de rotation des deux servomoteurs sont déportés par rapport au centre de la nacelle, mais les translations induites par ce déport lors de la stabilisation de la nacelle sont considérées comme négligeables.

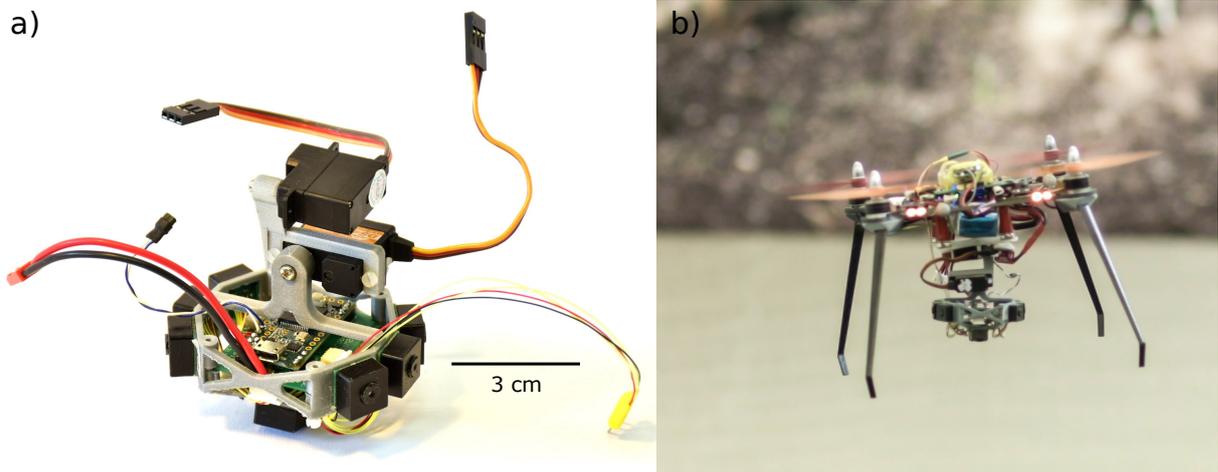


FIGURE 4.3: a) Photographie de la nacelle OctoM²APix avec ces deux servomoteurs MKS DS480 montés en série. D'après [Vanhoutte et al., 2017c]. b) Photographie du drone X4-MaG en vol avec la nacelle OctoM²APix stabilisant la rotation en roulis nécessaire au contrôle d'attitude. Extrait du film "Envolée scientifique" Réalisé par Kenza Chatar <https://vimeo.com/235305762>.

4.3.2 Architecture évolutive de transmission de données

Les rétines M²APix sont des prototypes qui présentent un grand intérêt pour leur large gamme de sensibilité et d'auto-adaptation, mais leur système de communication perfectible rend leur utilisation délicate. C'est pour cette raison que l'œil stabilisé OctoM²APix est conçu comme étant un capteur à part entière. C'est-à-dire qu'il est possible de l'utiliser de manière intuitive en faisant abstraction de sa structure interne. Ceci a été rendu possible grâce à des étapes clés notamment au niveau de la transmission de données.

Contexte électronique

Les capteurs M²APix communiquent via une liaison SPI, qui est un bus de données série synchrone respectant un schéma maître-esclaves. Le bus SPI utilise quatre signaux logiques :

- SCLK -> Serial Clock, Horloge (généré par le maître)
- MOSI -> Master Output, Slave Input (généré par le maître)
- MISO -> Master Input, Slave Output (généré par l'esclave)
- SS -> Slave Select, Actif à l'état bas (généré par le maître)

Les trois premiers signaux sont communs au maître et à tous les esclaves. Le quatrième est unique pour chaque esclave. Il faut trois fils pour les signaux communs (SCLK, MOSI, MISO) et huit fils pour les signaux SS propres à chacun des 8 capteurs M²APix pour que la communication soit possible.

D'autres signaux sont nécessaires au bon fonctionnement des capteurs M²APix, comme une tension de référence (V_{ref}) permettant de régler la sensibilité de la réponse de ceux-ci ou encore un signal logique permettant de régler le mode de fonctionnement du M²APix (utilisation des pixels de Delbrück ou Michaelis-Menten).

Contexte de données

Le capteur M²APix transmet les valeurs des 12 pixels et la moyenne filtrée de ceux-ci sur une résolution de 10 bits. Cela permet d'avoir des valeurs allant de 0 à 1023, mais en pratique la variation maximum des valeurs des pixels, pour une sensibilité (V_{ref}) fixée, n'utilise pas l'ensemble de cette plage, (e.g., pour une tension V_{ref} fixée à 2.2 V permettant d'éviter des saturations tout en ayant une très bonne sensibilité) permet seulement d'obtenir une plage de valeur qu'entre 250 et 850 (la résolution de 10 bits n'est utilisée qu'à 58%). Chacune de ces valeurs de 10 bits est encapsulée avec leur index codé sur 4 bits additionnés de 2 bits inutiles pour un total de 16 bits (ou 2 octets). Les 13 valeurs de 16 bits (soit 208 bits) sont encapsulées dans une trame de 256 bits. Pour chaque échantillonnage du capteur M²APix il est donc nécessaire de lire

256 bits pour obtenir les 130 bits utiles. L'échantillonnage de l'ensemble des 8 capteurs M²APix nécessite donc la transmission de $8 \cdot 256 = 2048$ bits.

Le bus SPI des capteurs M²APix est limité à une horloge maximum de 1 MHz, la fréquence maximale théorique pour échantillonner un capteur M²APix sur ce bus est donc de 3906 Hz. Si les 8 capteurs M²APix sont utilisés sur le même bus SPI, ce qui est généralement l'unique possibilité, car la grande majorité des cartes électroniques, y compris la Gumstix Overo, ne possède qu'un port SPI, alors dans ce cas, la fréquence maximale pour échantillonner les 8 capteurs M²APix sur ce bus est de 488 Hz. Si l'on souhaite utiliser un algorithme de calculs de flux optique comme la méthode de temps de déplacement par seuillage, il faut alors pouvoir échantillonner les capteurs M²APix à 1 kHz.

Solution sélectionnée

La puce XRA1404 de EXAR permet de lire l'état logique de huit entrées digitales et de retourner ceux-ci sous forme d'un octet sur un bus SPI à une vitesse de 26 MHz maximum. C'est cette puce qui est utilisée afin de lire bit à bit les trames émises par les 8 capteurs M²APix à leur vitesse maximum de 1 MHz et de retourner ces données sur un bus SPI de 26 MHz (Fig. 4.4). Cela permet aussi d'échantillonner les capteurs M²APix en parallèle et non séquentiellement comme le ferait une liaison SPI standard. Pour séparer les tâches et simplifier le développement et la portabilité, une unité de calculs légère est dédiée à l'acquisition des données et à la configuration des capteurs M²APix. La conception de la nacelle OctoM²APix va donc intégrer un PCB (Printed Circuit Board ou circuit électronique imprimé) sur-mesure embarquant une puce XRA1404, une Teensy 3.2 (PJRC) comme unité de calculs légère, une centrale inertielle MPU-6050, ainsi que toutes les connectiques nécessaires pour le branchement des 8 capteurs M²APix.

Le processus d'acquisition des données des pixels des capteurs M²APix s'effectue comme suit : la Teensy génère le signal d'horloge à 1 MHz et un unique Slave Select pour l'ensemble des 8 capteurs M²APix pour que ceux-ci transmettent leurs données simultanément. Les huit ports numériques de la puce XRA1404 sont utilisés pour lire bit à bit les trames de données provenant des 8 capteurs M²APix (étape ① de la figure 4.5), à chaque lecture des 8 bits provenant des 8 capteurs M²APix, ceux-ci sont transmis sous forme d'un octet sur le bus SPI à la vitesse de 26 MHz vers la carte Teensy (étape ② de la figure 4.5). La Teensy ré-organise les données reçues pour reconstruire les trames envoyées à l'origine par chacun des 8 capteurs M²APix et va en plus retirer les données inutiles pour le calcul du flux optique tels que les index.

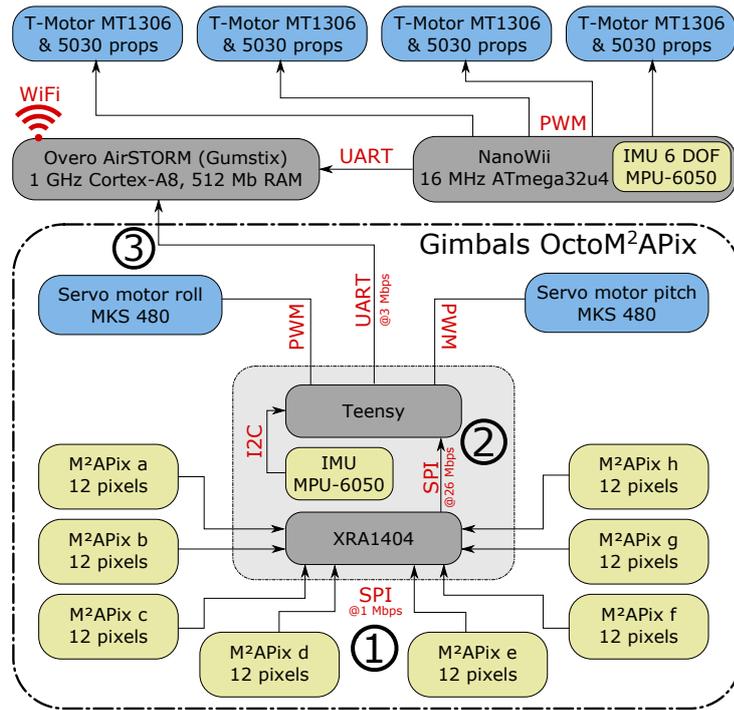


FIGURE 4.4: Architecture des composants électroniques du microdrone X4-MaG avec les éléments de la nacelle stabilisée entourés par la ligne pointillée. Les cartes de développement et les unités de transmission de données sont en gris. Les actionneurs sont en bleu et les capteurs sont en jaune. D'après [Vanhoutte et al., 2017b, Vanhoutte et al., 2017c].

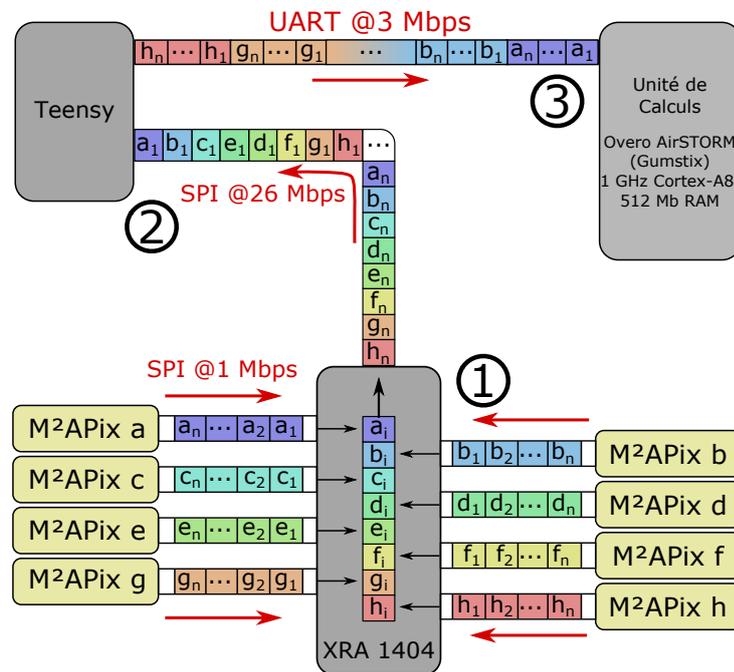


FIGURE 4.5: Diagramme des données détaillant le fonctionnement interne de l'OctoM²APix pour acheminer et réorganiser les données des pixels des 8 capteurs M²APix jusqu'à l'unité de calculs : ① capture synchrone des données des pixels des 8 capteurs M²APix à 1 Mbps et transmission empaquetée à 26 Mbps, ② données remis en ordre par la carte Teensy, suppressions des données inutiles et transmission à 3 Mbps ③ calculs du flux optique à partir des signaux des pixels. D'après [Vanhoutte et al., 2017b, Vanhoutte et al., 2017c].

4.4 Tests préliminaires du contrôle de trajectoires

L'ensemble du travail présenté précédemment a permis de sélectionner une solution de perception adaptée, d'établir une stratégie de navigation à courte distance par la simulation et de relever le défi de concevoir une micro-plateforme robotique réactive. Il est maintenant nécessaire de mettre en place des expérimentations avec le système complet vers une tâche de navigation. Tout d'abord, le drone X4-MaG et le capteur OctoM²APix seront testés en conditions idéales face à une bache défilante, puis en condition de vol réel.

Pour permettre un suivi de paroi, il faut estimer visuellement l'angle de la paroi suivie par rapport au vecteur vitesse du robot afin de corriger sa trajectoire voir même de planifier cette correction angulaire à court terme pour éviter toute collision. Pour réaliser cette tâche, deux approches peuvent être identifiées, l'une plutôt temporelle se baserait sur l'évolution d'une mesure de flux optique pour déterminer l'approche ou l'éloignement de la paroi suivie dans le temps et donc implicitement son rapprochement par rapport à la paroi. La deuxième approche, plutôt spatiale, analyserait la répartition de plusieurs mesures de flux optique de différentes directions à un même instant afin de déduire l'angle de la paroi suivie par rapport au vecteur vitesse du drone. On peut aussi imaginer combiner ces deux approches afin d'obtenir des informations plus riches et fiables.

4.4.1 Test sur bache défilante

Pour les tests préliminaires de suivi de mur, nous utilisons la même bache défilante que celle utilisée dans la partie 2.4.1. Nous aurons ainsi un environnement aux conditions idéales afin de déterminer le potentiel des mesures de flux optique pouvant être faites. Cette étape permet aussi de tester le drone X4-MaG avec l'intégration de la nacelle stabilisée, et le fonctionnement simultané des mesures de flux optique des 8 capteurs M²APix .

Pour estimer l'angle relatif entre la bache défilante et l'orientation de l'OctoM²APix, une solution trigonométrique très légère en termes de charge de calcul a été utilisée. Celle-ci permet avec deux mesures de flux optique séparées d'un angle connu (ϕ_D et ϕ_B sur la figure 4.6) de retrouver l'angle relatif α entre le mur et le vecteur de déplacement \vec{V} du robot (eq 4.1). Dans cette expérience sur bache défilante, le vecteur de déplacement de la bache \vec{V}_p n'est pas colinéaire au vecteur de déplacement \vec{V} qui correspondra à l'application finale. L'équation 4.1 est donc, dans ce cas précis, adaptée afin de corriger le biais de non-colinéarité du déplacement, ce qui donne l'équation 4.2.

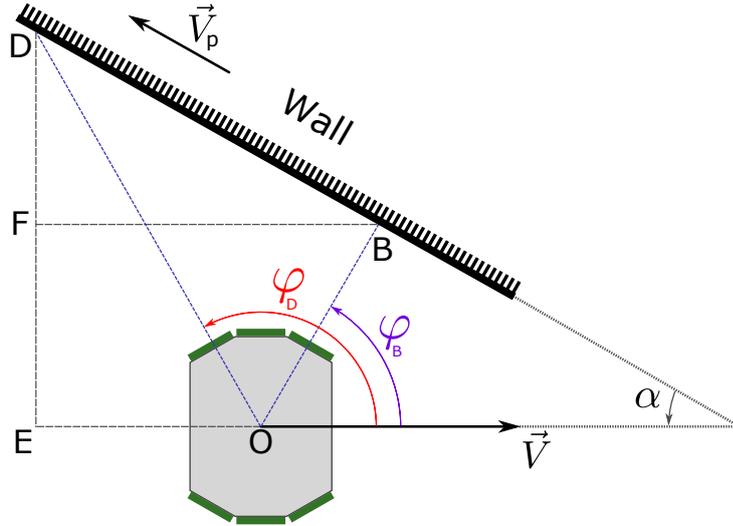


FIGURE 4.6: Géométrie de l'œil OctoM²APix (centré en O) dans le plan horizontal avec un mur texturé sur son côté gauche. Chaque rectangle vert correspond à un capteur M²APix. D'après [Vanhoutte et al., 2017b, Vanhoutte et al., 2017c].

$$\begin{aligned} \omega_B &= \frac{V}{OB} \cdot \sin(\varphi_B) & \omega_D &= \frac{V}{OD} \cdot \sin(\varphi_D) \\ \tan(\alpha) &= \frac{OD \cdot \sin(\varphi_D) - OB \cdot \sin(\varphi_B)}{OB \cdot \cos(\varphi_D) - OD \cdot \cos(\varphi_B)} \\ \tan(\alpha) &= \frac{\omega_D \cdot \sin(\varphi_D)^2 - \omega_B \cdot \sin(\varphi_B)^2}{\omega_B \cdot \sin(\varphi_B) \cdot \cos(\varphi_B) - \omega_D \cdot \sin(\varphi_D) \cdot \cos(\varphi_D)} \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$\tan(\alpha) = \frac{\omega_D \cdot \sin(\varphi_D + \alpha) \cdot \sin(\varphi_D) - \omega_B \cdot \sin(\varphi_B + \alpha) \cdot \sin(\varphi_B)}{\omega_B \cdot \sin(\varphi_B + \alpha) \cdot \cos(\varphi_B) - \omega_D \cdot \sin(\varphi_D + \alpha) \cdot \cos(\varphi_D)} \quad (4.2)$$

Dans ce test tous les capteurs M²APix sont échantillonnés à 1 kHz, l'algorithme de calcul de flux optique par seuillage est utilisé sur tous les capteurs simultanément afin de tester la qualité de l'estimateur, indispensable pour de futurs vols. Un filtre médian est appliqué sur les mesures de chacun des capteurs M²APix. L'équation 4.2 est ensuite utilisée trois fois sur la médiane des mesures locales de flux optique faisant face au mur texturé en prenant à chaque fois 2 médianes parmi les 3 disponibles. On obtient ainsi, pour un même mur suivi 3 mesures d'angle d'incidence α avec à chaque fois une paire différente de mesures médianes (#1 & #2, #2 & #3, #1 & #3, Fig. 4.7).

Les résultats du calcul de l'orientation en lacet α relatif au mur suivi (ou angle d'incidence) calculé avec l'équation 4.2 sont présentés en figure 4.7 pour les 3 paires de capteurs M²APix du côté gauche dans quatre cas d'angle α différents (0° , 20° , -25° et -45°). L'orientation en lacet est faite manuellement avec une précision de $\pm 3^\circ$ et est représentée par la courbe mauve dans

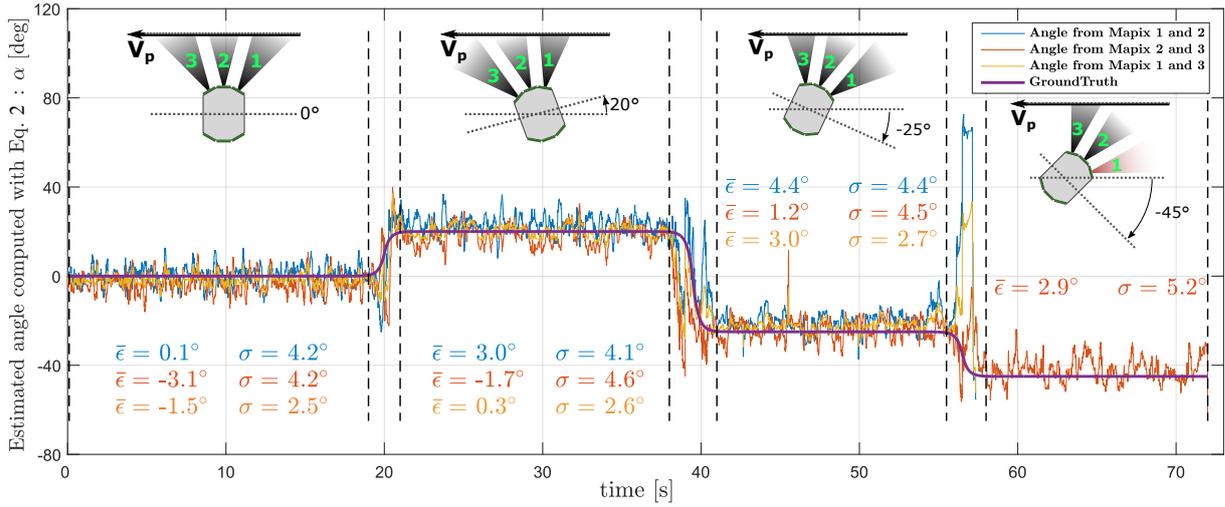


FIGURE 4.7: Angle d’incidence α mesuré entre le plan du mur et l’axe d’orientation du drone/OctoM²APix lorsque la texture du mur est mise en mouvement. Les résultats sont présentés pour 4 angles d’incidence différents : 0° , 20° , -25° et -45° . L’estimation de l’angle d’incidence est aussi comparée entre les trois différentes paires de capteurs M²APix : numéroté de 1 à 3. La précision et la justesse sont en général meilleures avec la paire de capteurs 1 et 3, ceux qui sont les plus éloignés. D’après [Vanhoutte et al., 2017c].

la figure 4.7. Les résultats obtenus durant les transitions d’orientations sont ignorés (à 20, 40 et 56 secondes sur la figure 4.7). Ces résultats montrent qu’un groupe de capteurs de flux optique (ici 20 mesures locales de mouvement) peut être utilisé à bord d’un micro-robot volant pour implémenter une boucle de contrôle en lacet pour l’estimation de l’orientation visuelle locale (moins de 3° d’erreur dans la figure 4.7). Mais avant tout, il est nécessaire d’effectuer cette même expérimentation en condition de vol réel, avec les perturbations non présentes dans ce test mené au sol.

4.4.2 Microdrone en vol longeant un environnement texturé

Cette expérience en vol réel consiste à observer la réponse dynamique de l’OctoM²APix avec tous les composants intégrés. Le drone X4-MaG vole dans l’arène de vol de la Méditerranée⁶ (6x8x6 m), sa trajectoire est contrôlée en boucle fermée grâce au système de capture de mouvement (VICIONTM). Une bâche de 4 m de long par 1,5 m de large avec un motif naturel est suspendue dans l’arène pour générer du flux optique lorsque le drone X4-MaG s’approchera d’elle (Fig. 4.8a). Le drone effectue ensuite différentes trajectoires rectilignes qui seront répétées 6 fois à une même hauteur ($0.8m \pm 0.01m$), la bâche étant sur la droite de son champ visuel. L’angle d’incidence α entre sa trajectoire et la bâche sera réglé de 0° à 50° par pas de 10° (Fig. 4.8b).

Les trois capteurs M²APix peuvent ainsi potentiellement détecter la texture et mesurer le flux

6. <http://www.flying-arena.eu>

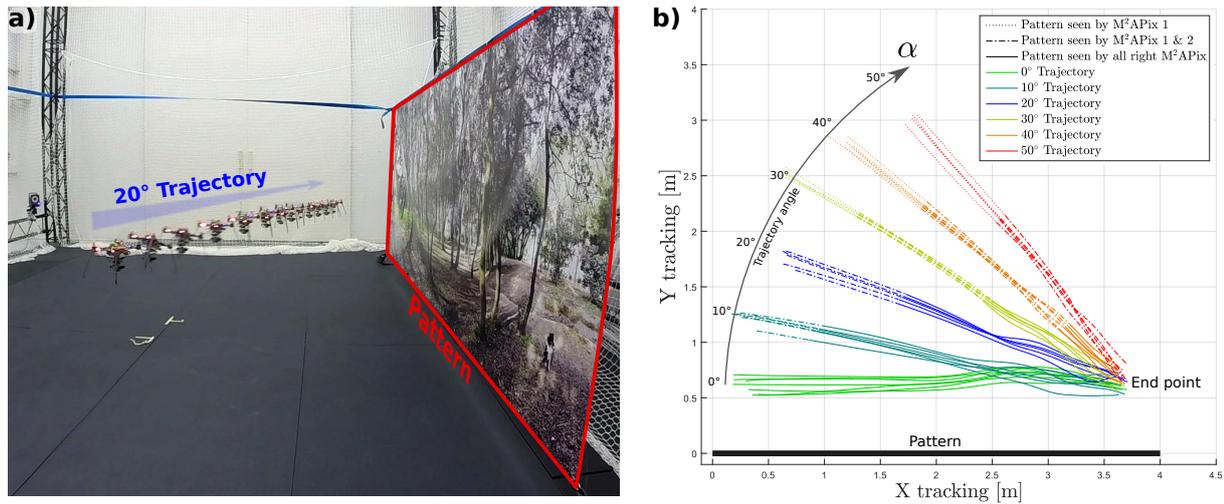


FIGURE 4.8: a) Chronophotographie du drone X4-MaG dans l'arène de vol de la Méditerranée. Le drone suit une trajectoire prédéfinie le long d'une bâche texturée avec un angle d'incidence de 20° pendant 4.5 s (correspondant à une trajectoire bleue dans b). b) Vue du dessus de toutes les trajectoires effectuées dans l'arène de vol de la Méditerranée. 6 différents types de trajectoires sont testés à la même hauteur ($0.8\text{ m} \pm 0.01\text{ m}$) avec un angle dans le sens horaire entre les trajectoires et la bâche texturée. Le drone effectue la même trajectoire 6 fois. Selon l'angle de la trajectoire et la position du drone, l'orientation des capteurs M^2APix #2 et #3 ne leur permet pas de percevoir la bâche texturée (les positions lorsque la bâche texturée n'est pas perçue par l'un des capteurs M^2APix sont marquées par des lignes en pointillés). D'après [Vanhoutte et al., 2017b].

optique pendant l'expérimentation. Afin de tester les cas de futures manœuvres de vol agressives en intérieur, les vols sont effectués à haute vitesse (jusqu'à 2.5 m.s^{-1} , voir figure 4.9) et à proximité d'obstacle (jusqu'à 0.5 m , voir figure 4.8b). La figure 4.9 présente les profils de vitesse de toutes les trajectoires qui pour chacune d'entre elles et inclut une phase de forte accélération (jusqu'à 6 m.s^{-2}) et une phase de forte décélération jusqu'à la phase de stabilisation à la vitesse voisine de 0.5 m.s^{-1} .

La proximité à la texture de 0.5 m n'a pu être réduite, car la phase de forte décélération (de 1 s à 1.5 s figure 4.9) provoque des perturbations sur la stabilité à proximité d'obstacles, ce qui, à cette distance, induit déjà des variations visibles sur les trajectoires censées être rectilignes (oscillations sur le dernier mètre des trajectoires figure 4.8b).

En fonction de la position et de l'orientation du drone, certains capteurs M^2APix ne peuvent pas voir la bâche texturée. Ces positions sont schématisées par des lignes en pointillées lorsque les capteurs M^2APix #2 et #3 (orienté respectivement à 90° et 120°) ne voient pas la texture et en tiré lorsque seul le M^2APix #3 ne voit pas la texture. Comme pour l'expérience précédente sur bâche défilante (partie 4.4.1) un filtre médian est appliqué sur les 10 mesures locales de flux optique de chaque capteur M^2APix .

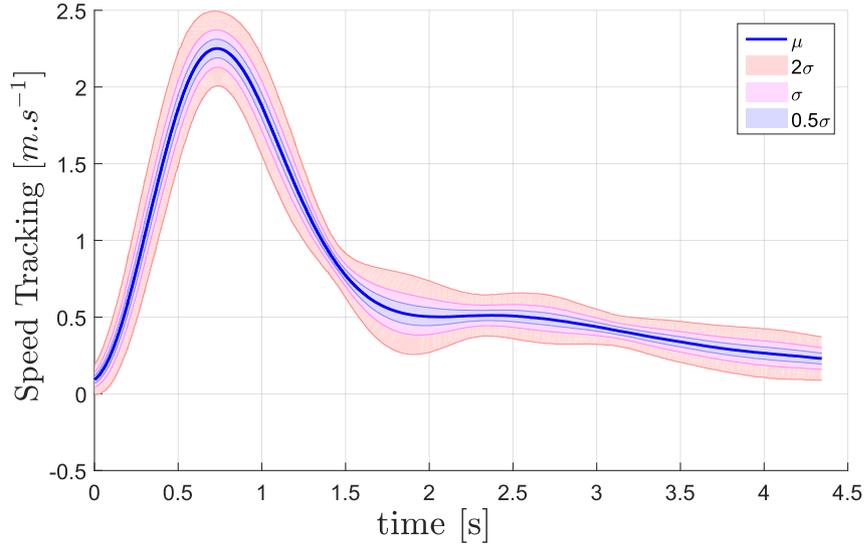


FIGURE 4.9: Profil de vitesse (sur le plan XY) du drone X4-MaG de toutes les trajectoires présentées sur la figure 4.8b. la courbe μ correspond à la moyenne et σ est l'écart type. D'après [Vanhoutte et al., 2017b].

Les résultats de cette expérience sont regroupés par type de trajectoire (0° , 10° , ..., 50°). Pour chaque groupe de résultats, les médianes de flux optique obtenues avec chaque capteur M²APix sont affichées et superposées avec toutes les trajectoires du même type sur la partie a) des figures 4.10 à 4.15. Pour chaque trajectoire, la synthèse des résultats des calculs d'angles des incidences effectués à bord du drone est séparée en 2 parties : les angles d'incidence α obtenus avec des mesures de flux optique supérieures $50^\circ/s$ et les angles d'incidences α obtenus avec des mesures de flux optique inférieures $50^\circ/s$.

En effet, il a été conclu dans le Chap.2 que la méthode de calcul par seuillage se dégradait progressivement à faible amplitude de flux optique (aux environs des $100^\circ/s$ à $150^\circ/s$), notamment visible grâce au coefficient de variation présenté figure 2.11a. Les légères modifications des caractéristiques optiques des capteurs M²APix (passage de $\Delta\varphi = 4,3^\circ$ à $\Delta\varphi = 3,4^\circ$) dans ce chapitre ont permis de faire en sorte que cette dégradation se produise à plus basse amplitude. L'observation des résultats de cette expérience a permis d'affirmer que la méthode par seuillage associée aux caractéristiques optiques des capteurs M²APix ne permettait pas d'avoir des mesures fiables pour des valeurs de flux optique en dessous de $50^\circ/s$. Nous focaliserons donc notre analyse principalement sur les résultats obtenus avec des mesures de flux optique supérieures à $50^\circ/s$.

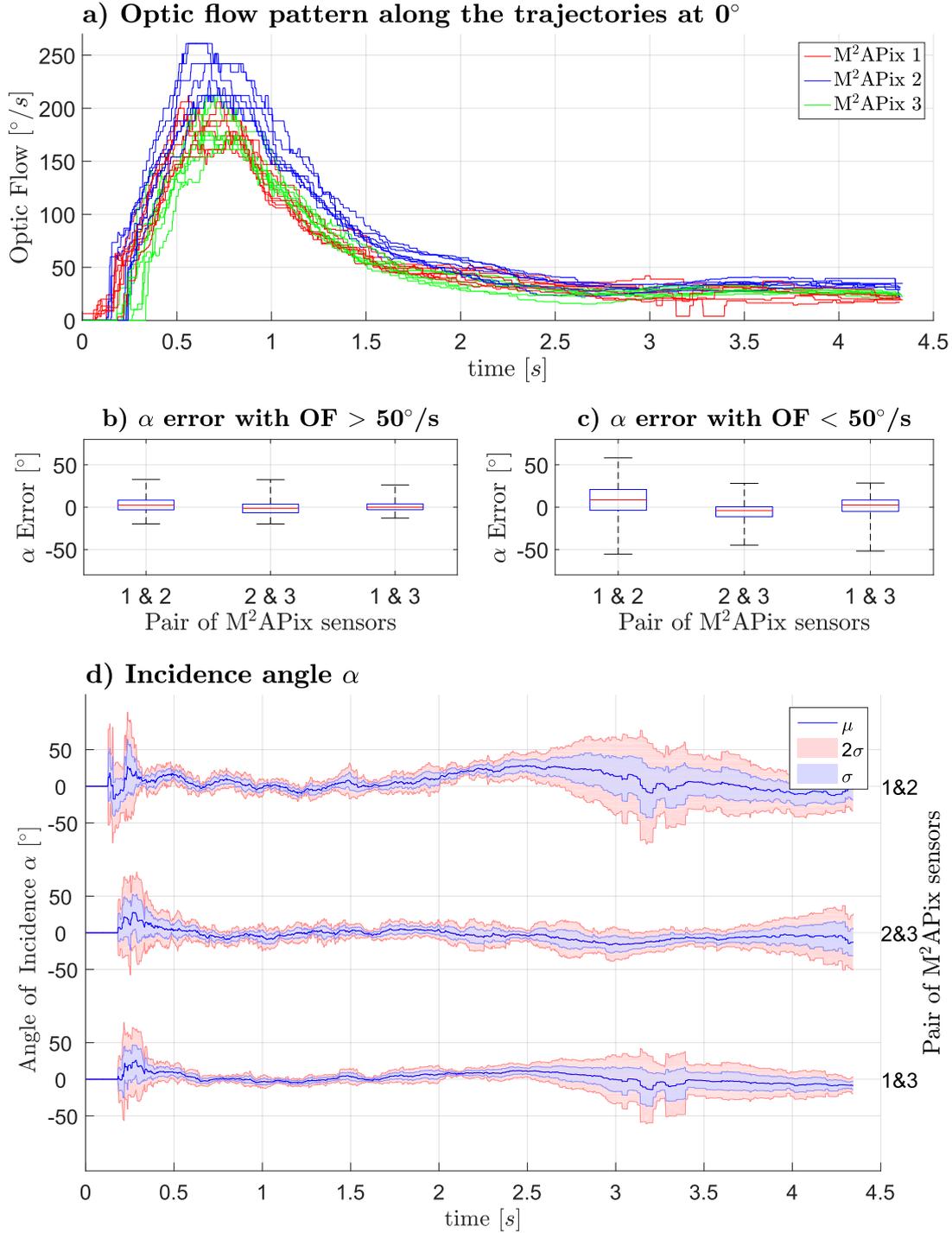


FIGURE 4.10: a) Mesures de flux optique des capteurs M²APix #1 (rouge), #2 (bleu) & #3 (vert), durant toutes les trajectoires effectuées à 0° . b) et c) distribution de l'erreur des angles d'incidence α par paire de capteurs M²APix lorsque toutes les valeurs de flux optique sont supérieures à $50^\circ/s$ b), et inférieure à $50^\circ/s$ en c), la barre rouge représente la médiane, les moustaches noires correspondent aux valeurs min et max, et la boîte bleue représente l'écart interquartile (IQR) à 50 %. b) médiane \pm IQR obtenue pour la paire #1 : $2.4^\circ \pm 11.4^\circ$; paire #2 : $-1.2^\circ \pm 10.1^\circ$; paire #1 : $0.0^\circ \pm 6.8^\circ$. c) médiane \pm IQR obtenue pour la paire #1 : $8.8^\circ \pm 24.5^\circ$; paire #2 : $-4.0^\circ \pm 11.7^\circ$; paire #1 : $2.6^\circ \pm 13.4^\circ$. d) Angle d'incidence α calculé pour chaque paire de capteurs M²APix. μ est la valeur moyenne, σ est l'écart type. D'après [Vanhouette et al., 2017b].

Lors de ce premier type de trajectoire parallèle à la bâche texturée (angle d'incidence à 0°) les mesures de flux optique atteignent une valeur maximale de $250^\circ/s$ pour le capteur M²APix #2 (Fig. 4.10a) qui dans ce cas est perpendiculaire à la bâche texturée. Durant la phase de démarrage (0,2 s à 0,5 s sur la Fig. 4.10d) on observe des résultats d'estimations d'angle d'incidence α instables. L'algorithme de calculs du flux optique par seuillage, de par son mode de fonctionnement propre, ne permet pas d'obtenir des mesures en continu encore moins à basses vitesses. Pour rendre l'algorithme de calculs d'angle d'incidence un minimum fonctionnel même dans les cas de faibles vitesses, les valeurs de flux optique calculées sont gardées en mémoire pendant 0,1 s tant qu'elles ne sont pas écrasées par de nouvelles mesures. Cela permet d'utiliser l'équation 4.1, même lorsque pour un pas de temps donné une des deux valeurs de flux optique n'a pas été mise à jour. L'accélération à partir d'une vitesse nulle pose ainsi une difficulté puisque le faible taux de rafraîchissement des mesures de flux optique va générer des valeurs qui vont être stockées longtemps (0,1 s max) et qui vont devenir rapidement très différentes de la réalité puisque le drone est en phase d'accélération, la mesure de l'angle d'incidence s'en trouve donc fortement perturbée.

Après cette zone de perturbation et la barre des $50^\circ/s$ passée (aux environs de 0.4 s Fig. 4.10d), les mesures d'angles d'incidence sont stables et nous pouvons observer un maximum de précision pour la paire de capteurs M²APix #1 (Figs. 4.10b, d). Dans cette configuration l'angle important (60°) séparant les capteurs M²APix #1 rend plus robuste la mesure d'angle d'incidence α incluant de légères fluctuations de mesures de flux optique.

Les phases de fortes accélérations (jusqu'à $6m.s^{-2}$) et décélérations avec des mesures de flux optique au-delà de $50^\circ/s$ ne présentent pas d'influence mesurable sur les angles d'incidence calculés (de 0,5 s à 1,5 s sur la Fig. 4.10d). Ce n'est qu'une fois passé sous les $50^\circ/s$ que, globalement, les mesures de flux optique se dégradent progressivement, et par conséquent les mesures d'angles d'incidence aussi. Les fortes dégradations des mesures d'angles d'incidence présentes à partir de 2.5 s sur la figure 4.10d sont aussi liées aux retours de turbulences de l'air générés par la décélération du drone. En effet lors de sa décélération, le drone va effectuer une poussée d'air vers l'avant pour ralentir sa course, cette poussée d'air interagit avec le sol et la bâche à proximité et génère des turbulences dans une zone où le drone va passer dans les quelques secondes suivantes (≈ 2 s après). Pour se stabiliser, le drone va effectuer des manœuvres en roulis provoquant quelques écarts sur sa consigne de trajectoire rectiligne visible sur la figure 4.8b (zone autour de $x \approx 3$ m et $y \approx 0.7$ m). Les conditions les plus propices à des mesures précises d'angle d'incidence α se trouvent donc aux environs du pic de vitesse là où le flux optique est à son maximum et le vol est exempt de turbulences visibles.

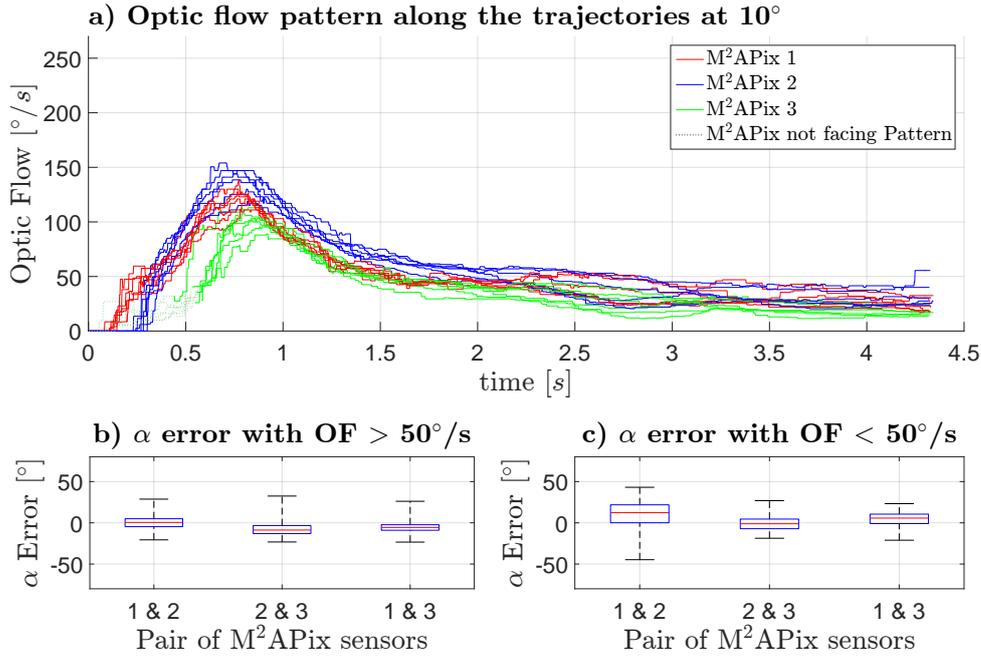


FIGURE 4.11: Résultats obtenus pour la trajectoire à 10°. Les mesures de flux optique affichées par des lignes en pointillé ne sont pas générées par les motifs présents sur la bache texturée et ne sont donc pas incluses dans les résultats présentés sur les graphiques b) et c) de cette figure. b) médiane \pm IQR obtenue pour la paire #1 : $0.5^\circ \pm 9.6^\circ$; paire #2 : $-8.7^\circ \pm 9.8^\circ$; paire #1 : $-5.6^\circ \pm 6.7^\circ$. c) médiane \pm IQR obtenue pour la paire #1 : $12.3^\circ \pm 21.8^\circ$; paire #2 : $-1.2^\circ \pm 11.7^\circ$; paire #1 : $5.7^\circ \pm 11.5^\circ$. D'après [Vanhouette et al., 2017b].

Lors des trajectoires à 10° et 20°, nous pouvons observer une dégradation de la justesse des mesures d'angles d'incidence provenant des paires #1 et #2 lorsque le flux optique est supérieur à 50°/s. Mais dans cette expérience, c'est la paire de capteurs #1 qui va le plus nous intéresser, car pour des angles d'incidence positifs (trajectoire menant vers une collision avec le mur suivi) c'est cette paire de capteurs orientés vers l'avant (capteur M²APix #1 à 60° et capteur M²APix #2 à 90°) qui est la plus à même de mesurer la proximité du danger.

À partir de la trajectoire à 30°, les paires de capteurs #1 et #2 ne fournissent plus de mesures de flux optique de plus de 50°/s, le drone X4-MaG décélère avec une trop grande distance de la bache texturée (distance trop grande et/ou vitesse trop faible). Mais la paire #1 qui est la mieux orientée pour observer le défilement de la bache texturée avec le minimum de distance obtient toujours des mesures supérieures à 50°/s pour les trajectoires à 30° et 40°. Ces mesures permettent d'obtenir une précision et une justesse correcte de l'angle d'incidence, respectivement (médiane \pm écart interquartile) : $-2.3^\circ \pm 6.0^\circ$ et $-2.5^\circ \pm 4.1^\circ$.

Lors des trajectoires à 50°, les caractéristiques optiques des capteurs M²APix, et la configuration de ceux-ci sur l'OctoM²APix ne permettent plus d'obtenir des résultats fiables sur les mesures d'angles d'incidence (Tab.4.1).

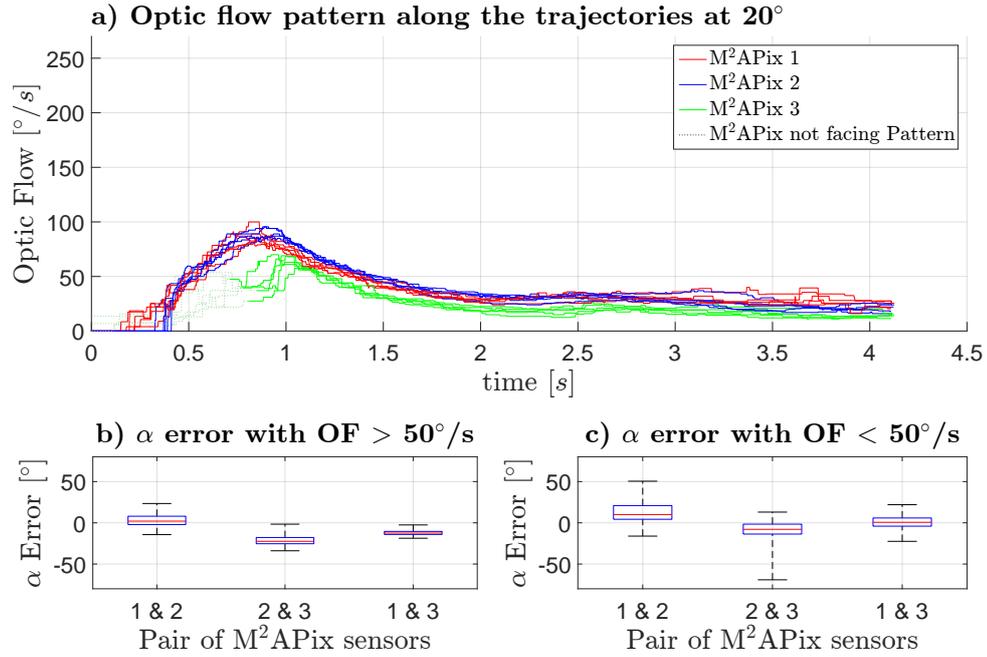


FIGURE 4.12: Résultats obtenus pour la trajectoire à 20°. b) médiane \pm IQR obtenue pour la paire #1 : $2.0^\circ \pm 10.1^\circ$; paire #2 : $-22.4^\circ \pm 7.6^\circ$; paire #1 : $-12.5^\circ \pm 3.7^\circ$. c) médiane \pm IQR obtenue pour la paire #1 : $10^\circ \pm 16.6^\circ$; paire #2 : $-7.9^\circ \pm 12.0^\circ$; paire #1 : $0.6^\circ \pm 9.9^\circ$. D'après [Vanhoutte et al., 2017b].

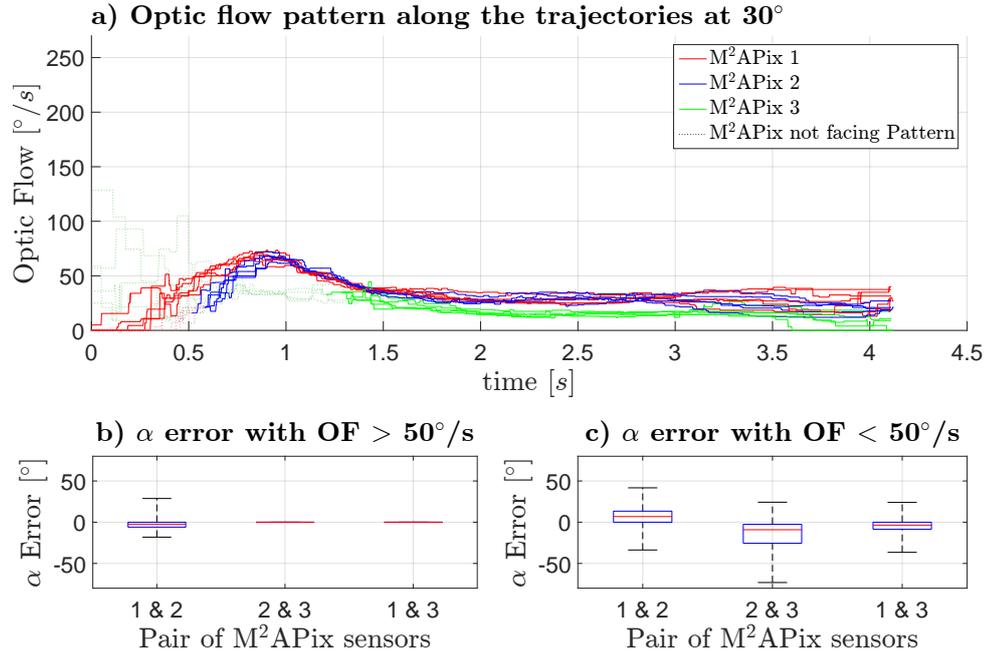


FIGURE 4.13: Résultats obtenus pour la trajectoire à 30°. Le capteur M²APix #3 ne mesure plus de valeurs de flux optique supérieures à 50°/s, ce qui explique l'absence de résultats pour les paires de capteurs M²APix #2 et #1 sur b). b) médiane \pm IQR obtenue pour la paire #1 : $-2.3^\circ \pm 6.0^\circ$. c) médiane \pm IQR obtenue pour la paire #1 : $6.9^\circ \pm 13.4^\circ$; paire #2 : $-9.1^\circ \pm 23.0^\circ$; paire #1 : $-3.5^\circ \pm 8.5^\circ$. D'après [Vanhoutte et al., 2017b].

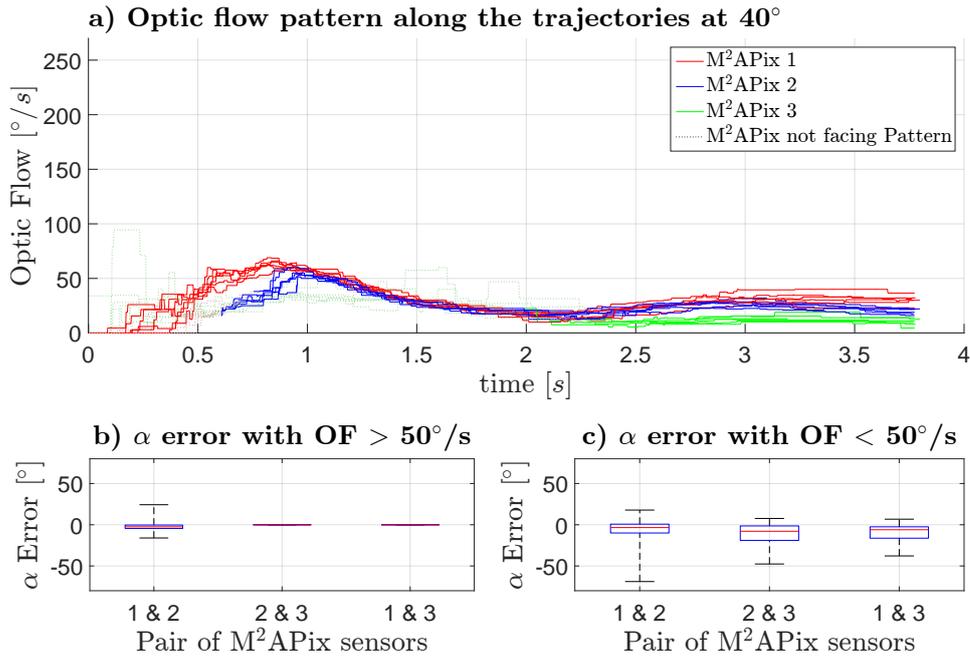


FIGURE 4.14: Résultats obtenus pour la trajectoire à 40°. b) médiane \pm IQR obtenue pour la paire #1 : $-2.5^\circ \pm 4.1^\circ$. c) médiane \pm IQR obtenue pour la paire #1 : $-3.4^\circ \pm 10.7^\circ$; paire #2 : $-7.9^\circ \pm 17.5^\circ$; paire #1 : $-6.0^\circ \pm 13.8^\circ$. D'après [Vanhoutte et al., 2017b].

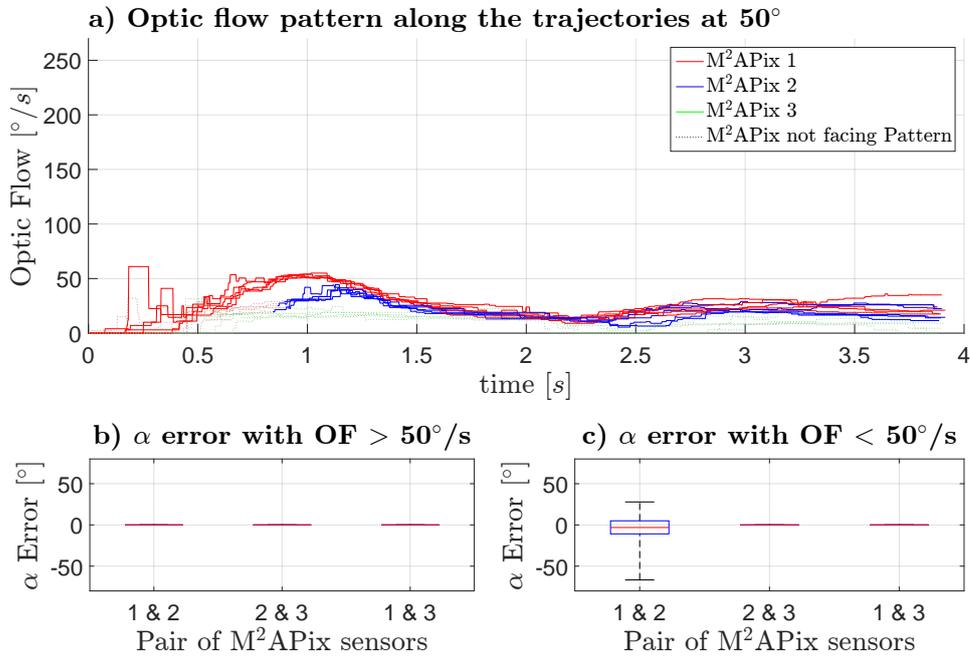


FIGURE 4.15: Résultats obtenus pour la trajectoire à 50°. Le motif de la bache n'est pas visible par le capteur M²APix #3 durant toute la durée de ces trajectoires, ce qui explique l'absence de données pour les paires de capteurs M²APix #2 et #1 en c). c) médiane \pm IQR obtenue pour la paire #1 : $-3.1^\circ \pm 15.8^\circ$. D'après [Vanhoutte et al., 2017b].

α	Flux optique > 50 °/s			Flux optique < 50 °/s		
	1 & 2	2 & 3	1 & 3	1 & 2	2 & 3	1 & 3
0°	2.4 ± 11.4	-1.2 ± 10.1	0.0 ± 6.8	8.8 ± 24.5	-4.0 ± 11.7	2.6 ± 13.4
10°	0.5 ± 9.6	-8.7 ± 9.8	-5.6 ± 6.7	12.3 ± 21.8	-1.2 ± 11.7	5.7 ± 11.5
20°	2.0 ± 10.1	-22.4 ± 7.6	-12.5 ± 3.7	10 ± 16.6	-7.9 ± 12.0	0.6 ± 9.9
30°	-2.3 ± 6.0	-	-	6.9 ± 13.4	-9.1 ± 23.0	-3.5 ± 8.5
40°	-2.5 ± 4.1	-	-	-3.4 ± 10.7	-7.9 ± 17.5	-6.0 ± 13.8
40°	-	-	-	-3.1 ± 15.8	-	-

Tableau 4.1: Comparatif des angles d’incidence mesurés pour chaque type de trajectoire (de 0° à 50°) à partir des mesures de flux optique $> 50^\circ/s$ dans la partie de gauche et $< 50^\circ/s$ dans la partie de droite. Résultats sous la forme : médiane \pm écart interquartile en degrés.

Nous avons vu que lorsque les trajectoires sont parallèles au mur suivi ($\alpha = 0^\circ$), c’est la paire présentant l’angle inter-capteur le plus grand (#1) qui obtient les meilleurs résultats (Tab. 4.1). Il est aussi important de relever que dans cette expérience, plus le microdrone se déplace vite et/ou proche du mur plus le danger de collision est important, plus les délais de prise de décision sont courts. La mesure du flux optique par temps de déplacement permet dans ce cas de répondre à cette problématique, car dans la configuration testée dans cette expérience, plus le drone X4-MaG est rapide et/ou proche du danger (bâche texturée) et plus les mesures de flux optique sont précises, fiables et rafraichies à haute fréquence. Celles-ci permettent ensuite d’obtenir des mesures d’angles d’incidence pouvant par la suite être utilisées pour corriger la trajectoire du drone et éviter les collisions. Cet élément est primordial pour les prochains développements de ce principe de navigation puisque l’amplitude du flux optique mesurée se trouve être un indicateur direct de la fiabilité des mesures d’angles d’incidence. De plus, on peut remarquer que cette mesure d’angle d’incidence joue le rôle de compas relatif permettant, dans certaines conditions, de remplacer un magnétomètre qui pourrait être inopérant en environnement d’intérieur à cause des perturbations ferromagnétiques.

Cette expérience nous montre aussi l’importance d’avoir des caractéristiques optiques très différentes pour les capteurs M²APix se trouvant au sein d’une même structure telle que l’octoM²APix. En effet, telles quelles, les caractéristiques optiques du capteur M²APix ($\Delta\varphi = 3,4^\circ$ et $\Delta\rho = 3,8^\circ$) associées à un algorithme de flux optique par temps de déplacement basé sur un seuillage permet d’être très performant à grande vitesse (au moins 2.5 m.s^{-1}) et proche d’obstacle (50 cm par exemple). Néanmoins, les faibles vitesses apportent moins d’information fiable, tout comme les angles d’incidence supérieurs à 40° . L’évitement d’obstacles frontaux nécessiterait donc l’utilisation de capteurs différents ou un ajustement des caractéristiques optiques des capteurs M²APix

pour effectuer des mesures de flux optique plus proche du foyer d'expansion. D'autre part, les mouvements latéraux pendant les trajectoires censées rester rectilignes apportent des perturbations sur les mesures de flux optique et les mesures d'angles d'incidence du mur suivi. Mais ces perturbations deviennent négligeables voir inexistantes dans les phases de vols rectilignes à haute vitesse. Il semblerait alors judicieux d'adopter une stratégie de vol par segment, de courtes lignes droites séparées par des ajustements de direction [Zufferey and Floreano, 2006, Serres and Ruffier, 2015]. Encore une fois, tous les résultats mènent à la conclusion, que ce système de perception, léger en termes de calcul, est plus performant et fiable durant les phases où l'information qu'il fournit est la plus critique (haute vitesse et proximité des obstacles).

Ceci encourage donc à travailler sur l'intégration et la miniaturisation de ce système pour l'évitement à court terme d'obstacle lors de vols de microdrone à haute vitesse, proche des obstacles, en environnement imprévisible et aux fortes variations de luminosité.

Chapitre 5

Discussion et conclusion

Sommaire

5.1	Discussion et perspectives	90
5.1.1	Comparaison des capteurs CurvACE et M ² APix	90
5.1.2	Auto-adaptation et gamme de mesures du capteur M ² APix	91
5.1.3	Algorithme hybride de calcul de flux optique	93
5.1.4	Trajectoires des stratégies de navigation	93
5.1.5	Évitement d'obstacles frontaux par flux optique	94
5.1.6	Plateforme d'expérimentation	95
5.2	Travail accompli	96

5.1 Discussion et perspectives

Le travail effectué lors de cette thèse permet d’élargir notre domaine de connaissances de la perception visuelle et de la navigation, car il s’appuie sur une démarche de biomimétique de la perception visuelle peu répandue en microrobotique aérienne. En effet, l’usage de caméras de relative haute résolution est très fréquent pour des applications de navigation embarquée. C’est en effet l’approche qui paraît la plus évidente, puisque percevoir avec une grande richesse de détails et de couleurs est un fait quotidien que nous expérimentons tous les jours en tant qu’humains. Mais les études entomologiques nous montrent qu’il existe d’autres manières plus parcimonieuses que la manière anthropocentrique de percevoir visuellement l’environnement pour ensuite pouvoir développer des robots plus réactifs en environnements encombrés ou imprévisibles.

5.1.1 Comparaison des capteurs CurvACE et M²APix

Un capteur innovant, nommé CurvACE, a été utilisé à plusieurs reprises lors de précédentes études biorobotiques [Floreano et al., 2013, Colonnier et al., 2015, Expert and Ruffier, 2015a]. Ce capteur possède 630 pixels répartis sur un large champ de vision ($180^\circ \times 60^\circ$), des caractéristiques optiques proches de celles utilisées sur le M²APix avec $\Delta\rho = \Delta\varphi$ et une auto-adaptation à la lumière ambiante au niveau du pixel [Viollet et al., 2014]. Pour les recherches présentées dans cette thèse, il a été choisi d’utiliser le capteur M²APix plutôt que le capteur CurvACE pour plusieurs raisons. Premièrement, certaines caractéristiques de la conception électronique du capteur CurvACE sont perfectibles ; le convertisseur analogique-digital n’est pas correctement adapté à la gamme de tension de sortie des pixels ce qui réduit la précision du capteur par une quantification trop grande. D’autre part, le bus de donnée (SPI¹) possède un débit trop faible ce qui nécessite un lourd compromis entre le nombre de pixels lu et le taux de rafraîchissement. Enfin, le rapport signal sur bruit pourrait être amélioré par l’augmentation de la taille des lentilles et des pixels [Colonnier, 2017]. Un autre élément concernant la technologie des pixels entre en compte, l’étude de Stefano Mafrica [Mafrica et al., 2015] a permis la comparaison entre les pixels auto-adaptatifs de Delbrück et les pixels auto-adaptatifs suivant la loi de Michaelis-Menten (M²APix). Cette étude a montré que de meilleurs résultats sont obtenus avec la technologie M²APix, notamment pour son auto-adaptation. De plus, les pixels obéissant à la loi de Michaelis-Menten ont une réponse monotonique sur des variations en échelons de ± 3 décades d’irradiance, alors que les pixels de Delbrück sont non-monotonique et n’obtiennent pas de réponse fiable au-delà d’une variation en échelon d’une décade d’irradiance. Le capteur M²APix offre donc de meilleures

1. SPI, pour *Serial Peripheral Interface*, est un bus de données série synchrone

performances, mais n'est pas autant limité que le capteur CurvACE par des contraintes électroniques. Le capteur M²APix permet une meilleure flexibilité dans la conception d'un système visuel tant dans son agencement, que dans ces caractéristiques optiques et d'auto-adaptation.

5.1.2 Auto-adaptation et gamme de mesures du capteur M²APix

Dans le domaine de la biomimétique, la partie capteur demande encore des efforts d'investigation, car les rétines de conception bio-inspirée sont encore peu connues. Le capteur M²APix en est un parfait exemple, doté de seulement 12 pixels auto-adaptatifs permettant une réponse aux contrastes quasi-équivalentes quelles que soient les conditions lumineuses. Comme le montre la Fig. 5.1, le capteur M²APix a pratiquement toujours la même réponse, quelque soit l'éclairement moyen de l'environnement dans lequel il se trouve (points noirs Fig. 5.1). Lorsqu'une variation lumineuse (e.g., un contraste) se présente, la réponse du capteur M²APix est très semblable, quelles que soient les conditions lumineuses dans lesquelles il se trouve (courbe de couleurs Fig. 5.1). On remarque que sur chacune de ces courbes, la réponse a une variation lumineuse linéaire sur environ une décade d'irradiance de part et d'autre du point de stabilité (grands points noirs Fig. 5.1), mais progressivement vient à saturer. De plus, cette réponse n'est pas symétrique entre une augmentation ou une baisse d'intensité lumineuse.

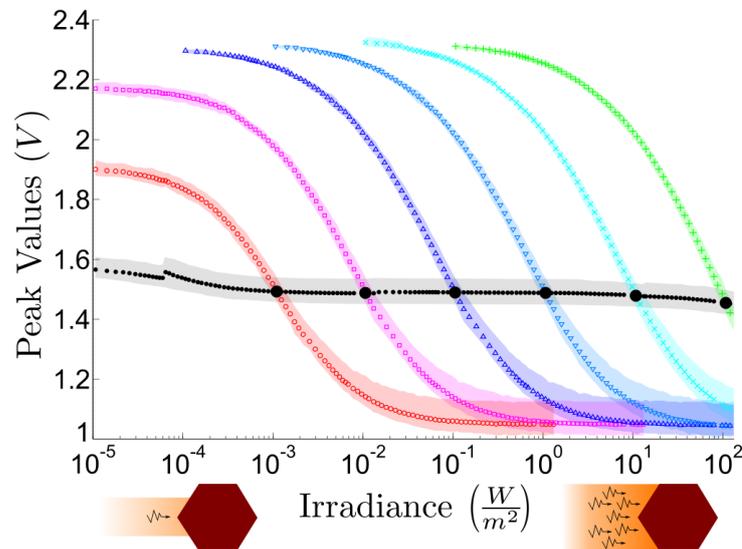


FIGURE 5.1: Réponse du capteur M²APix selon différents états stables. Les points noirs correspondent à la réponse dans un état stable à différentes intensités lumineuses. Les points de couleurs correspondent à la réponse du capteur lors d'une variation en échelon de l'intensité lumineuse à partir du point de stabilité schématisé par les grands points noirs correspondants. Adaptée de [Mafrica et al., 2015].

Les résultats de la phase de calibration du chapitre 2 ont subi l'effet de cette réponse non-symétrique entre augmentation et diminution de la luminosité globale perçue. En effet, la mesure

des aller-retour entre un contraste gris et noir, différent d'une décade d'irradiance entre eux, a donné des résultats de sensibilité angulaire $\Delta\rho$ dans le sens gris/noir différent que dans le sens noir/gris. Si ce phénomène ne semble pas remettre en cause les très bons résultats de mesures de flux optique obtenu avec ce capteur dans les expériences des chapitres 2 et 4. Il pourrait néanmoins jouer un rôle perturbateur dans des conditions extrêmes de variations lumineuses. Il serait donc intéressant de pousser l'étude plus loin afin de mieux identifier et quantifier l'impact de l'asymétrie de la réponse du capteur et de son auto-adaptation sur la mesure du flux optique par temps de déplacement.

Nous avons vu aussi dans le chapitre 2 que le choix des caractéristiques optiques des capteurs M²APix impliquait des limites de mesures. Avec un angle inter-pixel $\Delta\varphi = 4,3^\circ$, les mesures de flux optique de moins de $25^\circ/s$ sont peu fiables (Fig. 4.9). Un contraste défilant à ces faibles vitesses mettra plusieurs dixièmes de secondes pour passer d'un pixel à l'autre alors que la constante de temps de l'auto-adaptation du capteur M²APix est de 0,5 s. Par conséquent, un même contraste ne va pas générer la même amplitude de réponse et son profil va se déformer sur les pixels successifs. La modification d'amplitude peut provoquer un passage de seuil pour certains pixels, mais pas pour d'autres, perturbant ainsi les mesures par seuillage. La modification du profil de la réponse va, quant à elle, perturber la mesure par corrélation croisée. Plusieurs solutions sont possibles, nous pouvons prévoir de faire varier le condensateur externe régissant la constante d'auto-adaptation du capteur M²APix à l'aide d'une diode "varicap" et ainsi modifier cette constante de temps en fonction de la gamme de vitesse mesurée. Cependant, auto-adapter une constante de temps d'auto-adaptation pourrait paraître saugrenu. Une autre solution est d'adapter directement les caractéristiques $\Delta\varphi$ et $\Delta\rho$ pour répondre à différentes situations. Mais modifier la distance pixels/lentille implique la variation de $\Delta\varphi$ et $\Delta\rho$ dans des directions opposées. Avec cette structure optique lorsque $\Delta\varphi$ augmente, $\Delta\rho$ diminue et vice-versa. Or, nous voulons que le rapport $\Delta\varphi / \Delta\rho$ soit constant et de même ordre de grandeur. Le système optique devrait alors se complexifier avec une focale et une mise au point réglable indépendamment et motorisé. Une dernière solution envisageable serait d'embarquer des capteurs dotés de différentes focales. En effet, une gamme de flux optique bien plus grande pourrait être mesurée simultanément dans des directions proches permettant de répondre à des conditions de vol plus variées. Dans le Chap.4 l'angle inter-pixel $\Delta\varphi$ a été légèrement diminué à $3,4^\circ$ pour permettre des mesures plus fiables de flux optique de faibles valeurs sans pour autant augmenter de manière trop importante $\Delta\rho$ qui dans ce cas était de $3,8^\circ$.

5.1.3 Algorithme hybride de calcul de flux optique

Il serait intéressant d'explorer la conception d'un algorithme hybride de mesure de flux optique par temps de déplacement. L'algorithme par seuillage à l'avantage d'être très léger en calculs, car l'information provient directement du temps de déplacement d'une variation lumineuse perçue entre deux photorécepteurs voisins. Cet accès très direct à l'information de flux optique basée uniquement sur le passage d'un seuil est défaillant lorsque l'amplitude des variations est voisine du seuil. Au contraire, l'algorithme par corrélation croisée va comparer le profil d'amplitude de sortie d'un photorécepteur avec ces voisins pour déterminer le délai Δt , puis le flux optique à chaque instant. Cet algorithme plus précis et fournissant des mesures à plus haute fréquence est 20 fois plus gourmand en ressources calculatoires. L'utilisation d'un algorithme hybride pourrait utiliser la méthode par seuillage pour détecter un évènement (e.g., présence de contraste significatif) et fournirait de premières mesures de flux optique permettant le lancement de mesures par corrélation croisée spécifiquement sur la gamme du flux optique mesurée. L'utilisation de la méthode par corrélation croisée à basse fréquence serait alors nécessaire uniquement sur une gamme de flux optique restreinte et ciblée sur les mesures faites par la méthode par seuillage, cela permettrait de réduire drastiquement la charge de calcul.

5.1.4 Trajectoires des stratégies de navigation

Par manque de temps, les expériences du Chap.4 se sont uniquement concentrées sur la détection d'obstacle et d'orientation de paroi latérale par le flux optique. Les résultats démontrent la faisabilité d'une navigation semblable à celles effectuées en simulation dans le Chap.3 et vont même plus loin puisque l'orientation des parois peut être estimée par seulement deux mesures de flux optique simultanées. Il semble aussi pertinent pour de futures expériences de vol d'adopter une stratégie de vol en saccades semblable à celle qui a été observée chez les drosophiles [Tammero and Dickinson, 2002]. En effet, effectuer de courts déplacements rectilignes tout en étant équipé d'un système visuel stabilisé permet une perception fiable de l'environnement. Ces segments seront séparés de mouvement de rotation rapide permettant de corriger les erreurs de cap et de trajectoire détectées pendant le segment précédent, finalement comme le faisait le robot mouche au sol avec des roues [Franceschini et al., 1989, Franceschini et al., 1992], mais qui pour l'heure n'a jamais été reproduit en vol. Cette stratégie doit tout de même permettre des mouvements d'évitement d'urgence pendant les parties de vol rectiligne. Il serait intéressant de comparer ce type de vol en saccades avec des vols courbes pour lesquels la composante de rotation du flux optique serait compensée par une mesure inertielle au moyen d'un gyromètre. Les rotations

généérées lors des mouvements en lacet seraient soustraites aux mesures de flux optique grâce aux mesures issues de la centrale inertielle [Zufferey et al., 2007b, Sabo et al., 2017].

5.1.5 Évitement d'obstacles frontaux par flux optique

La problématique de détection des obstacles frontaux n'a pas été abordée dans les stratégies de navigation expérimentées dans cette thèse. En effet, le déplacement des contrastes dans le champ visuel est d'autant plus lent qu'ils sont proches du foyer d'expansion (c.f. Fig. 1.2c,d, Fig. 1.1a, Eq. 1.1 et Eq. 1.2) jusqu'à devenir nuls au centre du foyer d'expansion. Ce phénomène est représenté par la fonction $\sinus(\varphi)$ de l'équation 1.2. Pour détecter les obstacles frontaux par divergence du flux optique, il est donc nécessaire de pouvoir mesurer des amplitudes de flux optique dans une gamme bien plus faible que pour les obstacles se situant dans d'autres directions. Ainsi, les capteurs qui seraient utilisés pour mesurer le flux optique dans des directions proches du foyer d'expansion devraient avoir des caractéristiques optiques dédiées à cette gamme d'amplitude afin de mesurer correctement la divergence du flux optique. C'est grâce à la mesure de cette divergence qu'il est possible de détecter les obstacles frontaux, notamment par la méthode time-to-contact (TTC) [Lee, 1976b] utilisée à plusieurs reprises en robotique [Baratoff et al., 2000, Muratet et al., 2005, Zufferey and Floreano, 2006, Souhila and Karim, 2007, Serres and Ruffier, 2015]. Ce principe de divergence du flux optique au foyer d'expansion est aussi exploité pour des phases de décollages et d'atterrissages verticaux (nommé VTOL pour Vertical Take-Off and Landing aircraft) [Izzo and Croon, 2012, Herissé et al., 2012, Baird et al., 2013].

Une nouvelle approche pour effectuer des mesures de flux optique de manière embarquée dans plusieurs directions avec un seul capteur a été imaginée. Elle consisterait à utiliser le système de propulsion à voilure tournante comme support de mouvement permanent. En positionnant un capteur de flux optique en bout de pale suivant leur prolongement, il serait possible de profiter de la composante de translation présente à l'extrémité de la pale d'hélice (translation non-nulle puisque le point d'observation n'est pas sur le centre de rotation de la pale de l'hélice). Ainsi, il serait possible avec un ou plusieurs capteurs aux mêmes caractéristiques optiques, de détecter les obstacles dans toutes les directions. En effet, le déplacement de l'appareil et donc le phénomène du foyer d'expansion peut être supposé négligeable par rapport à la vitesse de rotation des hélices et de la composante de translation liée à celle-ci.

De plus, la composante de translation du bout de pale d'hélice pouvant être connue via la vitesse de rotation de celle-ci, il serait alors possible de déterminer les distances aux objets environnants. Aujourd'hui, ce système de détection paraît complexe à intégrer sur des microdrones, mais il est tout à fait envisageable d'intégrer ce système sur des aéronefs à voilure tournante de

plus grande taille comme des hélicoptères (la vitesse de rotation typique d'un rotor d'hélicoptère est de 5-10 tours/s). Cette invention nommée "Système de mesure de la distance d'un obstacle par flux optique" a fait l'objet d'une demande de dépôt de brevet par S. Viollet, F. Colonnier et E. Vanhoutte, publié le 13/04/2018 (FR3057347, BOPI 2018-15).

5.1.6 Plateforme d'expérimentation

Pour l'expérimentation de stratégies de perception et de navigation, nous avons limité les nouveautés matérielles afin d'éviter les problèmes qui pourraient être induits par ce matériel inconnu. Pour les expériences en vol menées lors de cette thèse, le choix de la plateforme s'est porté sur drone X4-MaG de type quadrirotor. Ce modèle de plateforme ayant déjà été utilisé dans le laboratoire, l'environnement de développement associé était déjà existant. La plupart des problèmes récurant liés à ce type de microdrone et à son utilisation étaient déjà connus [Manecy et al., 2014, Manecy et al., 2015]. Différentes modifications matérielles ont toutefois été faites sur cette plateforme afin d'en améliorer les performances et de l'adapter aux besoins des expériences. Comme expliqué dans la partie 1.3, l'utilisation d'un drone à voilure tournante de 4 rotors ne permet pas l'indépendance des mouvements de translation et des mouvements de rotation. C'est ce qui nous a contraints à utiliser une nacelle de 40 g composée de deux servomoteurs afin de stabiliser le système visuel en roulis et tangage. Ainsi, dans de futurs travaux, il serait utile d'utiliser des plateformes tel que les hexarotors avec rotors inclinées afin de découpler, jusqu'à une certaine limite, les mouvements de translation et les mouvements de rotation [Hugo et al., 2007, Serres et al., 2017, Ryll et al., 2017]. Ainsi, il serait possible de se passer d'une nacelle de stabilisation et de libérer près de 10% de la masse du drone (en supposant que la quote-part de la masse du système de propulsion d'un quadrirotor et d'un hexarotor à rotor inclinés est équivalente).

5.2 Travail accompli

La volonté de mettre en place un système de perception et de navigation bio-inspirées de l'abeille a abouti à une solution matérielle et logicielle parcimonieuse, très différente de la majorité des solutions proposées dans la littérature. Huit rétines M²APix comportant chacune 12 pixels auto-adaptatifs ont été choisies pour la perception visuelle de l'environnement à bord d'un microdrone. Cette solution de perception s'inspire de la vision de l'abeille de par sa configuration optique (l'angle inter-photorécepteurs $\Delta\varphi$ et l'angle d'acceptance $\Delta\rho$), mais aussi de par sa faible résolution de 96 pixels. L'exploitation des données provenant des capteurs M²APix relève plus du domaine du traitement du signal que de celui du traitement d'image et permet un accès très direct à l'information de flux optique. Cette approche permet avec peu de ressources calculatoires de travailler en haute fréquence (plusieurs centaines voir milliers de hertz) contrairement à l'approche traitement d'image appliquée à des capteurs de quelques milliers de pixels [Moore et al., 2014, De Croon et al., 2016, McGuire et al., 2017b]. Après une phase indispensable d'éta-lonnage optique et en s'appuyant sur les avancées scientifiques du domaine [Franceschini et al., 1992, Franceschini et al., 2009, Roubieu et al., 2013, Mafrica et al., 2015, Mafrica et al., 2016a], des protocoles expérimentaux ont été mis en place pour tester deux types d'algorithmes de calculs du flux optique par temps de déplacement, la méthode par seuillage et la méthode par corrélation croisée. Ces comparaisons ont tout d'abord été effectuées en conditions idéales (i.e., lumière contrôlée, translation pure, absence de vibration) puis en conditions réelles, embarquées à bord d'un microdrone.

Ces expériences ont permis de mettre en évidence les atouts et les faiblesses de ces algorithmes exploitant les données du capteur M²APix, ainsi que l'impact des différentes variables internes ou externes au système visuel (i.e., conditions lumineuses, gamme de vitesse, fréquence d'échantillonnage). Succinctement, la méthode par seuillage obtient des résultats tout à fait corrects, son atout principal lui vient de sa simplicité de mise en œuvre et de son extrême légèreté en termes de ressources calculatoires (moins de 3% de charge calculatoire par M²APix échantillonnée à 1 kHz sur un processeur monocoeur cadencé à 1 GHz). La méthode par corrélation croisée, offre d'excellentes précisions dans une plus grande gamme de vitesses ainsi qu'un taux de rafraîchissement des mesures de flux optique bien meilleur que la méthode par seuillage, mais elle nécessite bien plus de puissance de calcul (env. 20 fois plus). Le but de ces travaux est d'aller vers un système autonome minimaliste inspiré d'une perception parcimonieuse de l'abeille tant sur le nombre de capteurs que sur les ressources calculatoires [Menzel and Giurfa, 2001, Wakuwa et al., 2005, Baird et al., 2011, Land and Nilsson, 2012, Cronin et al., 2014, Linander et al.,

2015, Rigosi et al., 2017]. Pour la suite, la méthode par seuillage a été choisie pour son faible coût calculatoire et les mesures obtenues ont été filtrées spatialement afin d’en augmenter la robustesse et la précision.

Les expériences en simulation numérique utilisaient cette perception minimaliste et locale du flux optique dans des simulations de stratégies bio-inspirées de navigation. Ces expériences de simulation ont permis d’appréhender ces problématiques de navigation et d’évitement d’obstacle indispensable en vol d’intérieur ou en environnements encombrés, en utilisant une stratégie de suivi de parois et de contrôle de vitesse observés chez les abeilles. Ces travaux de simulation ont pérennisé l’emploi des outils de simulation 3D adaptés aux recherches Biorobotique pour modéliser le vol d’agent simulé comme un drone ou une abeille en modifiant la dynamique de l’agent [Raharijaona et al., 2017].

Les derniers protocoles expérimentaux se sont appuyés sur les résultats de simulation pour embarquer sur un microdrone un système visuel biomimétique semblable à celui utilisé en simulation. Pour aller plus loin, une stratégie de mesure de l’angle d’incidence, entre la trajectoire de vol et une paroi latérale, a démontré son efficacité et sa justesse en vol réel. Cette stratégie a une approche différente, mais suivant un but semblable à la stratégie employée sur le robot BeeRotor pour le survol d’un sol texturé en relief à l’aide de mesures de flux optique [Expert and Ruffier, 2015b]. Comme pour les premières expériences, deux phases ont été effectuées : la première en environnement idéal sur un banc de tests et la deuxième en conditions réelles de vol. Les résultats ont montré une très bonne détection de l’angle du mur suivi lors de vols rapprochés (i.e., jusqu’à 50 cm) et à haute vitesse (i.e., 2.5 m.s^{-1}) pour un drone de moins de 400 g équipé de capteurs de flux optique montés sur une nacelle stabilisée par une centrale inertielle.

Durant cette thèse, un microdrone, un environnement de calculs temps réel embarqué, une architecture d’acquisition et de transmission de données ainsi qu’un système de stabilisation du système visuel ont été conçus pour répondre aux besoins de ces expériences. Les résultats de ces expériences montrent l’utilité d’une perception plus directe du mouvement à l’aide d’un système visuel parcimonieux et stabilisé qui permet de mesurer une grande gamme de flux optique (~ 2 décades). En comparaison, les solutions de perceptions par traitement d’images fonctionnent à plus basse fréquence et ne semblent pas permettre la mesure de haute amplitude de flux optique, ce qui limite la réactivité du robot volant [Moore et al., 2014]. De plus, l’absence de stabilisation du système visuel perturbe la perception lors des mouvements d’attitude de la plateforme volante, ce qui limite d’autant plus les possibilités d’accélération [Moore et al., 2014, De Croon et al., 2016, McGuire et al., 2017b, Sabo et al., 2017]. Cependant, ce compromis sur la stabilisation facilite la miniaturisation de ces microdrones. Finalement, ce travail a permis de démontrer la

faisabilité de voler à proximité d'obstacles à des vitesses de plusieurs mètres par seconde en s'appuyant sur une perception parcimonieuse inspirée de l'abeille.

Chapitre 6

Annexes

6.1 Publications durant la thèse

6.1.1 Brevet

- S. Viollet, F. Colonnier, E. Vanhoutte, Système de mesure de la distance d'un obstacle par flux optique. Numéro et date de publication de la demande : FR3057347 - 2018-04-13 (BOPI 2018-15).

6.1.2 Revues internationales à comité de lecture

- Vanhoutte, E., Mafrika, S., Ruffier, F., Bootsma, J. R., Serres, J. (2017). Time-of-Travel Methods for Measuring Optical Flow on Board a Micro Flying Robot. *Sensors*, 17(3) :571. DOI : 10.3390/s17030571

6.1.3 Actes de conférences internationales

- Manecy, A., Vanhoutte, E., Mafrika, S., Colonnier, F., Ruffier, F., Marchand, N., and Viollet, S. (2015). X4-MaG and RT-MaG : a low-cost open-source micro-quadrotor based on Real-Time Linux and a new Matlab/Simulink toolbox. *IROS Aerial Open Source Robotics Workshop*. Congrès : hal-01242014.
- Serres, J., Raharijaona, T., Vanhoutte, E., and Ruffier, F. (2016). Event-based visual guidance inspired by honeybees in a 3D tapered tunnel. In *Event-based Control, Communication, and Signal Processing (EBCCSP), 2016 Second International Conference on* (pp. 1-4). Proc. IEEE. Congrès DOI : 10.1109/EBCCSP.2016.7605273.
- Raharijaona, T., Serres, J., Vanhoutte, E., and Ruffier, F. (2017). Toward an insect-inspired event-based autopilot combining both visual and control events. In *Event-based*

Control, Communication, and Signal Processing (EBCCSP), 2017 Third International Conference on (pp. 1-7). Proc. IEEE. Congrès DOI : 10.1109/EBCCSP.2017.8022822.

- Vanhoutte, E., Ruffier, F., & Serres, J. (2017, October). A quasi-panoramic bio-inspired eye for flying parallel to walls. IEEE Sensors 2017, Glasgow, United Kingdom. paper ID 1332, 2017. DOI : 10.1109/ICSENS.2017.8234110.
- Vanhoutte, E., Ruffier, F., & Serres, J. (2017, September). A honeybee's navigational toolkit on Board a Bio-inspired Micro Flying Robot. In International Micro Air Vehicle Conference and Flight Competition (IMAV) 2017 (pp. 136-142). Toulouse, France.

6.1.4 Autres communications

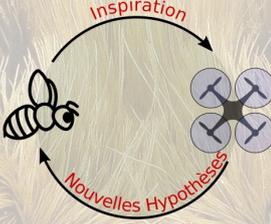
A - Poster présenté lors de la Journée des Jeunes Chercheurs en Robotique (JJCR) à Amiens en octobre 2015





Biorobotique

Drone autonome inspiré de la perception des abeilles

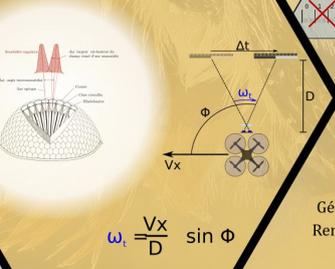


Objectifs

-  Evitement d'obstacles
-  Exploration d'un environnement inconnu
-  Retrouver son chemin retour automatiquement
-  Exploiter les informations de flux optique
-  Pas de perception métrique

Principes

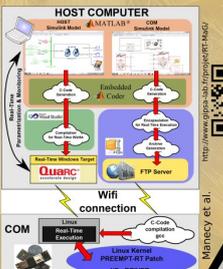
Flux optique



$$\omega_1 = \frac{Vx}{D} \sin \phi$$

Outils

Programmation via toolbox
Matlab/simulink en wifi (RT-MaG)

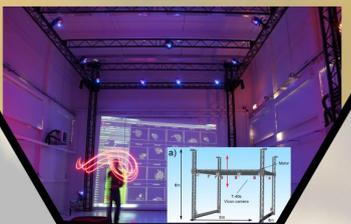


Simulation

Morse Simulateur
(Openrobots LAAS-CNRS)
Génération scènes par script Python
Rendu basé sur Blender Game Engine

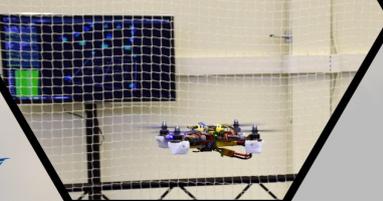
Equipement

Arène de vol de la méditerranée
6m x 8m x 6m
17 cameras Vicon
Précision de localisation 3D au mm



Plateforme X4-MaG

Drone open-hardware
310g avec batterie
100g de charge utile
14min d'autonomie

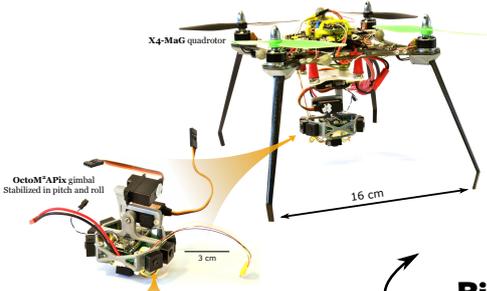





B - Poster présenté lors de la conférence IEEE Sensors à Glasgow en octobre 2017

A Quasi-panoramic Bio-inspired Eye for Flying Parallel to Walls

Erik Vanhoutte, Franck Ruffier, and Julien Serres
Aix-Marseille University, ISM, Marseille, France



X4-MaG quadrotor
16 cm

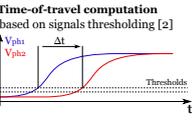
OctoM²APix gimbal
Stabilized in pitch and roll
3 cm



M²APix (4)
Bio-inspired auto-adaptive retina
12 Michaelis-Menten pixels
SPI bus @ 1 Mbps



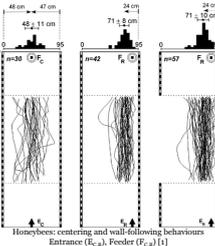
LMS
Local Motion Sensor (Optical Flow)



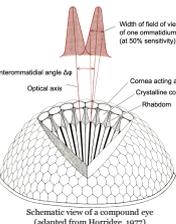
Time-of-travel computation based on signals thresholding [2]



Flying insect and optic flow perception



Honeybees: centering and wall-following behaviours
Entrance (R_{ca}), Feeder (F_{ca}) [1]



Schematic view of a compound eye
(adapted from Horridge, 1977)



Megachile form (by USGS Bee Inventory and Monitoring Lab)

Biorobotics

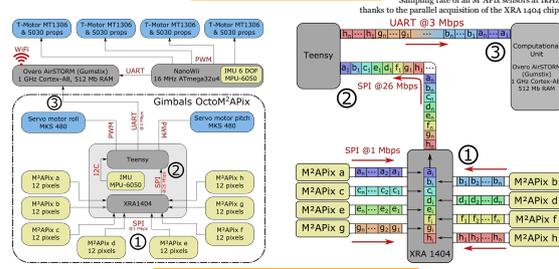
OctoM²APix Electronics & Data

Sampling rate of all M²APix sensors at 1kHz thanks to the parallel acquisition of the XRA 1404 chip

UART @ 3 Mbps

SPI @ 26 Mbps

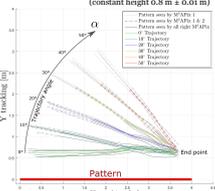
SPI @ 1 Mbps



Angle of Incidence computing in flight [5]

Flying X4-MaG Drone

Top view of trajectories inside the Mediterranean Flying Arena (constant height 0.8 m ± 0.01 m)

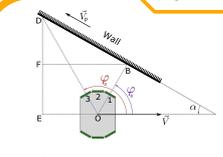



Speed profile in XY plane

α	OP-240 (h)				OP-48 (h)			
	142	143	142	143	142	143	142	143
0°	2° 11'	-1° 10'	0° 2'	0° 20'	-0° 12'	-0° 12'	-0° 12'	-0° 12'
10°	1° 18'	-0° 10'	-0° 7'	1° 22'	-0° 12'	-0° 12'	-0° 12'	-0° 12'
20°	2° 18'	-0° 18'	-0° 14'	1° 12'	-0° 12'	-0° 12'	-0° 12'	-0° 12'
30°	2° 14'	-	-	1° 13'	-0° 23'	-0° 23'	-0° 23'	-0° 23'
40°	-3.4°	-	-	-1° 11'	-0° 18'	-0° 18'	-0° 18'	-0° 18'
50°	-	-	-	-0° 16'	-	-	-	-

With the optic configuration of M²APix sensors (λ = 3.4° & Δλ = 3.8°) OF measurements are reliable above 20°

Angle of Incidence principle & first results



Angle of Incidence computing from two optic flow measurements

$$\omega_B = \frac{V}{OB} \cdot s(\varphi_B) \quad \omega_D = \frac{V}{OD} \cdot s(\varphi_D)$$

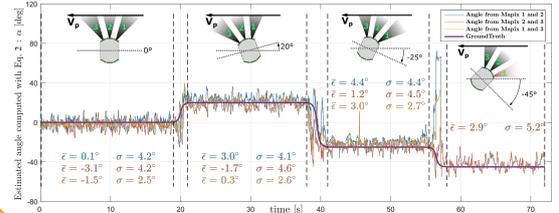
$$f(\alpha) = \frac{OD \cdot s(\varphi_D) - OB \cdot s(\varphi_B)}{OB \cdot c(\varphi_D) - OD \cdot c(\varphi_B)}$$

$$f(\alpha) = \frac{\omega_B \cdot s(\varphi_D)^2 - \omega_D \cdot s(\varphi_B)^2}{\omega_D \cdot s(\varphi_D) \cdot c(\varphi_D) - \omega_B \cdot s(\varphi_B) \cdot c(\varphi_B)}$$

If $V \neq 0$

$$f(\alpha) = \frac{\omega_B \cdot s(\varphi_D + \alpha) \cdot s(\varphi_D) - \omega_D \cdot s(\varphi_B + \alpha) \cdot s(\varphi_B)}{\omega_D \cdot s(\varphi_D + \alpha) \cdot c(\varphi_D) - \omega_B \cdot s(\varphi_B + \alpha) \cdot c(\varphi_B)}$$

First results with a moving texture



Reference and contact

[1] Serres, J. R., Masson, G. P., Ruffier, F., & Franceschini, N. (2005). A bee in the corridor: centering and wall-following. *Naturwissenschaften*, 95(12), 1181-1187.

[2] Vanhoutte, E., Mafrica, S., Ruer, F., Bootsma, J. R., Serres, J. (2017). Time-of-Travel Methods for Measuring Optical Flow on Board a Micro Flying Robot. *Sensors*, 17(3) :571. DOI : 10.3390/s17030571

[3] Serres, J. R., Ruffier, F. (2015). Biomimetic Autopilot Based on Minimalistic Motion Vision for Navigating along Corridors Comprising U-shaped and S-shaped Turns. *Journal of Bionic Engineering*, 12(1):47-60.

[4] Mafrica, S., Godot, S., Menouni, M., Boyron, M., Expert, F., Juston, R., ... Viollet, S. (2015). A bio-inspired analog silicon retina with Michaelis-Menten auto-adaptive pixels sensitive to small and large changes in light. *Optics Express*, 23(5), 5614. <http://doi.org/10.1364/OE.23.055614>

[5] Vanhoutte, E., Ruffier, F., & Serres, J. (2017). A honeybee's navigational toolkit on Board a Bio-inspired Micro Flying Robot. In *International Micro Air Vehicle Conference and Flight Competition (IMAV) 2017* (pp. 136-142). Toulouse. Retrieved from http://www.imav.org/papers/2017/150_imav2017_proceedings.pdf

Erik Vanhoutte
PhD student
Biorobotics Dpt.









Bibliographie

- [Albus and Hong, 1990] Albus, J. S. and Hong, T. H. (1990). Motion, depth, and image flow. In *Robotics and Automation, 1990. Proceedings., 1990 IEEE International Conference on*, pages 1161–1170. IEEE.
- [Baird et al., 2013] Baird, E., Boeddeker, N., Ibbotson, M. R., and Srinivasan, M. V. (2013). A universal strategy for visually guided landing. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, page 201314311.
- [Baird et al., 2010] Baird, E., Kornfeldt, T., and Dacke, M. (2010). Minimum viewing angle for visually guided ground speed control in bumblebees. *Journal of Experimental Biology*, 213(10) :1625–1632.
- [Baird et al., 2011] Baird, E., Kreiss, E., Wcislo, W., Warrant, E., and Dacke, M. (2011). Nocturnal insects use optic flow for flight control. *Biology Letters*, 7(4) :499–501.
- [Baratoff et al., 2000] Baratoff, G., Toepfer, C., and Neumann, H. (2000). Combined space-variant maps for optical-flow-based navigation. *Biological Cybernetics*, 83(3) :199–209.
- [Beer et al., 1998] Beer, R. D., Chiel, H. J., Quinn, R. D., and Ritzmann, R. E. (1998). Biorobotic approaches to the study of motor systems. *Current Opinion in Neurobiology*, 8(6) :777 – 782.
- [Beyeler et al., 2009] Beyeler, A., Zufferey, J.-C., and Floreano, D. (2009). Vision-based control of near-obstacle flight. *Autonomous Robots*, 27(3) :201–219.
- [Bonardi et al., 2017] Bonardi, F., Ainouz, S., Boutteau, R., Dupuis, Y., Savatier, X., and Vas-seur, P. (2017). Localisation visuelle multimodale à long terme. In *GRETSI 2017*.
- [Brandli et al., 2014] Brandli, C., Berner, R., Yang, M., Liu, S.-C., and Delbruck, T. (2014). A 240×180 130 db 3 μ s latency global shutter spatiotemporal vision sensor. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 49(10) :2333–2341.
- [Briod et al., 2016] Briod, A., Zufferey, J.-C., and Floreano, D. (2016). A method for ego-motion estimation in micro-hovering platforms flying in very cluttered environments. *Autonomous Robots*, 40(5) :789–803.
- [Colonnier, 2017] Colonnier, F. (2017). *Oeil composé artificiel doté d'hypercuité : applications robotiques à la stabilisation et à la poursuite*. PhD thesis, Aix-Marseille.
- [Colonnier et al., 2015] Colonnier, F., Manecy, A., Juston, R., and Viollet, S. (2015). Visual odometry and low optic flow measurement by means of a vibrating artificial compound eye. In *Conference on Biomimetic and Biohybrid Systems*, pages 153–163. Springer.
- [Crabtree et al., 2015] Crabtree, G., Kocs, E., and Trahey, L. (2015). The energy-storage frontier : Lithium-ion batteries and beyond. *MRS Bulletin*, 40(12) :1067–1076.

- [Cronin et al., 2014] Cronin, T. W., Johnsen, S., Marshall, N. J., and Warrant, E. J. (2014). *Visual ecology*. Princeton University Press.
- [Darwin, 1859] Darwin, C. (1859). *On the Origin of Species by Means of Natural Selection*. Murray, London. or the Preservation of Favored Races in the Struggle for Life.
- [De Croon et al., 2016] De Croon, G., Perçin, M., Remes, B., Ruijsink, R., and De Wagter, C. (2016). *The DelFly*. Springer.
- [de Croon et al., 2012] de Croon, G. C., Groen, M., De Wagter, C., Remes, B., Ruijsink, R., and van Oudheusden, B. W. (2012). Design, aerodynamics and autonomy of the delfly. *Bioinspiration & biomimetics*, 7(2) :025003.
- [Demonceaux et al., 2007] Demonceaux, C., Vasseur, P., and Pegard, C. (2007). UAV Attitude Computation by Omnidirectional Vision in Urban Environment. In *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 2017–2022. IEEE.
- [Duhamel et al., 2013] Duhamel, P.-E. J., Perez-Arancibia, C. O., Barrows, G. L., and Wood, R. J. (2013). Biologically inspired optical-flow sensing for altitude control of flapping-wing microrobots. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 18(2) :556–568.
- [Duhamel et al., 2012] Duhamel, P.-E. J., Pérez-Arancibia, N. O., Barrows, G. L., and Wood, R. J. (2012). Altitude feedback control of a flapping-wing microrobot using an on-board biologically inspired optical flow sensor. In *Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on*, pages 4228–4235. IEEE.
- [Dunkley et al., 2014] Dunkley, O., Engel, J., Sturm, J., and Cremers, D. (2014). Visual-inertial navigation for a camera-equipped 25g nano-quadrotor. In *IROS2014 aerial open source robotics workshop*.
- [Evangelista et al., 2010] Evangelista, C., Kraft, P., Dacke, M., Reinhard, J., and Srinivasan, M. V. (2010). The moment before touchdown : landing manoeuvres of the honeybee *Apis mellifera*. *Journal of Experimental Biology*, 213(2) :262–270.
- [Expert et al., 2012] Expert, F., Roubieu, F. L., and Ruffier, F. (2012). Interpolation based "time of travel" scheme in a Visual Motion Sensor using a small 2D retina. *Sensors, 2012 IEEE*, pages 1–4.
- [Expert and Ruffier, 2015a] Expert, F. and Ruffier, F. (2015a). Flying over uneven moving terrain based on optic-flow cues without any need for reference frames or accelerometers. *Bioinspiration & Biomimetics*, 10(2) :026003.
- [Expert and Ruffier, 2015b] Expert, F. and Ruffier, F. (2015b). The vertical optic flow : An additional cue for stabilizing beerotor robot's flight without imu. In *Conference on Biomimetic and Biohybrid Systems*, pages 187–198. Springer.
- [Expert et al., 2011] Expert, F., Viollet, S., and Ruffier, F. (2011). A mouse sensor and a 2-pixel motion sensor exposed to continuous illuminance changes. *IEEE Sensors*, pages 974–977.
- [Eynard, 2011] Eynard, D. (2011). *Capteur de stéréovision hybride pour la navigation des drones*. PhD thesis, Amiens.
- [Eynard et al., 2012] Eynard, D., Vasseur, P., Demonceaux, C., and Frémont, V. (2012). Real time UAV altitude, attitude and motion estimation from hybrid stereovision. *Autonomous Robots*, 33(1-2) :157–172.

- [Falanga et al., 2016] Falanga, D., Mueggler, E., Faessler, M., and Scaramuzza, D. (2016). Aggressive quadrotor flight through narrow gaps with onboard sensing and computing. *arXiv preprint arXiv :1612.00291*.
- [Fernald, 2004] Fernald, R. D. (2004). Eyes : Variety, development and evolution. *Brain, Behavior and Evolution*, 64(3) :141–147.
- [Floreano et al., 2013] Floreano, D., Pericet-Camara, R., Viollet, S., Ruffier, F., Brückner, A., Leitel, R., Buss, W., Menouni, M., Expert, F., Juston, R., et al. (2013). Miniature curved artificial compound eyes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(23) :9267–9272.
- [Floreano and Wood, 2015] Floreano, D. and Wood, R. J. (2015). Science, technology and the future of small autonomous drones. *Nature*, 521(7553) :460–466.
- [Fonville, 2016] Fonville, C. (2016). The Exploring DelFly : How to increase the indoor explored area of the DelFly Explorer by means of computationally efficient routing decisions? Master’s thesis, TU Delft : Faculty of Aerospace Engineering, Kluyverweg 1, 2629 HS Delft, The Netherlands.
- [Franceschini, 2014] Franceschini, N. (2014). Small brains, smart machines : From fly vision to robot vision and back again. *Proceedings of the IEEE*, 102(5) :751–781.
- [Franceschini and Kirschfeld, 1971] Franceschini, N. and Kirschfeld, K. (1971). Etude optique in vivo des éléments photorécepteurs dans l’oeil composé de drosophila. *Kybernetik*, 8(1) :1–13.
- [Franceschini et al., 1992] Franceschini, N., Pichon, J. M., Blanes, C., and Brady, J. M. (1992). From Insect Vision to Robot Vision [and Discussion]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, 337(1281) :283–294.
- [Franceschini et al., 1989] Franceschini, N., Riehle, A., and Le Nestour, A. (1989). Directionally selective motion detection by insect neurons. In Stavenga, D. G. and Hardie, R. C., editors, *Facets of Vision*, pages 360–390, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg.
- [Franceschini et al., 2009] Franceschini, N., Ruffier, F., Serres, J., and Viollet, S. (2009). *Optic flow based visual guidance : from flying insects to miniature aerial vehicles*. INTECH Open Access Publisher.
- [Gibson, 1979] Gibson, J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston : Houghton Mifflin.
- [Gibson, 1950] Gibson, J. J. (1950). *The perception of the visual world*. Boston : Houghton Mifflin.
- [Goulard et al., 2015] Goulard, R., Julien-Laferrrière, A., Fleuriot, J., Vercher, J.-L., and Viollet, S. (2015). Behavioural evidence for a visual and proprioceptive control of head roll in hoverflies (episyrphus balteatus). *Journal of Experimental Biology*, 218(23) :3777–3787.
- [Goulard et al., 2016] Goulard, R., Vercher, J.-L., and Viollet, S. (2016). To crash or not to crash : how do hoverflies cope with free-fall situations and weightlessness? *Journal of Experimental Biology*, 219(16) :2497–2503.
- [Guillot and Meyer, 2014] Guillot, A. and Meyer, J.-A. (2014). *Poulpe fiction : Quand l’animal inspire l’innovation*. Dunod.

- [Haddad et al., 2004] Haddad, D., Schaupp, F., Brandt, R., Manz, G., Menzel, R., and Haase, A. (2004). Nmr imaging of the honeybee brain. *Journal of Insect Science*, 4(1) :7.
- [Hassenstein and Reichardt, 1956] Hassenstein, B. and Reichardt, W. (1956). Systemtheoretische analyse der zeit-, reihenfolgen-und vorzeichenauswertung bei der bewegungsperzeption des rüsselkäfers chlorophanus. *Zeitschrift für Naturforschung B*, 11(9-10) :513–524.
- [Heng et al., 2014] Heng, L., Honegger, D., Lee, G. H., Meier, L., Tanskanen, P., Fraundorfer, F., and Pollefeys, M. (2014). Autonomous Visual Mapping and Exploration With a Micro Aerial Vehicle. *Journal of Field Robotics*, 31(4) :654–675.
- [Heng et al., 2011] Heng, L., Meier, L., Tanskanen, P., Fraundorfer, F., and Pollefeys, M. (2011). Autonomous obstacle avoidance and maneuvering on a vision-guided MAV using on-board processing. In *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 2472–2477. IEEE.
- [Herissé et al., 2012] Herissé, B., Hamel, T., Mahony, R., and Russotto, F.-X. (2012). Landing a vtol unmanned aerial vehicle on a moving platform using optical flow. *IEEE Transactions on robotics*, 28(1) :77–89.
- [Honegger et al., 2013] Honegger, D., Meier, L., Tanskanen, P., and Pollefeys, M. (2013). An open source and open hardware embedded metric optical flow cmos camera for indoor and outdoor applications. In *Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on*, pages 1736–1741. IEEE.
- [Horridge, 1977] Horridge, G. A. (1977). The compound eye of insects. *Scientific American*, 237(1) :108–121.
- [Hugo et al., 2007] Hugo, R., Sergio, S., Anand, S., Pedro, C., and Rogelio, L. (2007). Modelling and real-time control stabilization of a new vtol aircraft with eight rotors. In *Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on*, pages 147–152. IEEE.
- [IllusionWorks, 1997] IllusionWorks (1997). Illusionworks, l.l.c., ames room. http://psylux.psych.tu-dresden.de/i1/kaw/diverses%20Material/www.illusionworks.com/html/ames_room.html. Accessed : 2018-06-20.
- [Izzo and Croon, 2012] Izzo, D. and Croon, G. D. (2012). Landing with time-to-contact and ventral optic flow estimates. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 35(4) :1362–1367.
- [Karmeier et al., 2003] Karmeier, K., Krapp, H. G., and Egelhaaf, M. (2003). Robustness of the tuning of fly visual interneurons to rotatory optic flow. *Journal of Neurophysiology*, 90(3) :1626–1634. PMID : 12736239.
- [Keshavan et al., 2015] Keshavan, J., Gremillion, G., Alvarez-Escobar, H., and Humbert, J. S. (2015). Autonomous Vision-Based Navigation of a Quadrotor in Corridor-Like Environments. *International Journal of Micro Air Vehicles*, 7(2) :111–123.
- [Koenderink and van Doorn, 1987] Koenderink, J. J. and van Doorn, A. J. (1987). Facts on optic flow. *Biological cybernetics*, 56(4) :247–254.
- [Krotosky and Trivedi, 2007] Krotosky, S. J. and Trivedi, M. M. (2007). On Color-, Infrared-, and Multimodal-Stereo Approaches to Pedestrian Detection. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 8(4) :619–629.
- [Kushleyev et al., 2013] Kushleyev, A., Mellinger, D., Powers, C., and Kumar, V. (2013). Towards a swarm of agile micro quadrotors. *Autonomous Robots*, 35(4) :287–300.

-
- [Land, 1997] Land, M. F. (1997). Visual Acuity in Insects. *Annual review of entomology*, vol. 42(46) :147–177.
- [Land and Nilsson, 2012] Land, M. F. and Nilsson, D.-E. (2012). *Animal eyes*. Oxford University Press.
- [Lee, 1976a] Lee, D. N. (1976a). A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision. *Perception*, 5(4) :437–459.
- [Lee, 1976b] Lee, D. N. (1976b). A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision. *Perception*, 5(4) :437–459. PMID : 1005020.
- [Linander et al., 2015] Linander, N., Dacke, M., and Baird, E. (2015). Bumblebees measure optic flow for position and speed control flexibly within the frontal visual field. *Journal of Experimental Biology*, 218(7) :1051–1059.
- [Liu et al., 2016] Liu, C., Prior, S. D., Teacy, W. L., and Warner, M. (2016). Computationally efficient visual-inertial sensor fusion for global positioning system-denied navigation on a small quadrotor. *Advances in Mechanical Engineering*, 8(3) :1687814016640996.
- [Lucas et al., 1981] Lucas, B. D., Kanade, T., et al. (1981). An iterative image registration technique with an application to stereo vision.
- [Ma et al., 2013] Ma, K. Y., Chirarattananon, P., Fuller, S. B., and Wood, R. J. (2013). Controlled flight of a biologically inspired, insect-scale robot. *Science*, 340(6132) :603–607.
- [Mafrica et al., 2015] Mafrica, S., Godiot, S., Menouni, M., Boyron, M., Expert, F., Juston, R., Marchand, N., Ruffier, F., and Viollet, S. (2015). A bio-inspired analog silicon retina with Michaelis-Menten auto-adaptive pixels sensitive to small and large changes in light. *Optics Express*, 23(5) :5614.
- [Mafrica et al., 2016a] Mafrica, S., Servel, A., and Ruffier, F. (2016a). Minimalistic optic flow sensors applied to indoor and outdoor visual guidance and odometry on a car-like robot. *Bioinspiration & biomimetics*, 11(6) :066007.
- [Mafrica et al., 2016b] Mafrica, S., Servel, A., and Ruffier, F. (2016b). Optic-flow based car-like robot operating in a 5-decade light level range. In *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 5568–5575. IEEE.
- [Manecy, 2015] Manecy, A. (2015). *Stratégies de guidage visuel bio-inspirées : application à la stabilisation d’un micro-drone et à la poursuite de cibles*. PhD thesis, Université Grenoble Alpes.
- [Manecy et al., 2015] Manecy, A., Marchand, N., Ruffier, F., and Viollet, S. (2015). X4-MaG : A Low-Cost Open-Source Micro-Quadrotor and Its Linux-Based Controller. *International Journal of Micro Air Vehicles*, 7(2) :89–110.
- [Manecy et al., 2014] Manecy, A., Marchand, N., and Viollet, S. (2014). Rt-mag : An open-source simulink toolbox for linux-based real-time robotic applications. In *2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2014)*, pages 173–180.
- [Maslow, 1954] Maslow, A. (1954). *Motivation and Personality*. [Harper’s psychological series]. Harper.
- [McGuire et al., 2016a] McGuire, K., de Croon, G., de Wagter, C., Remes, B., Tuyls, K., and Kappen, H. (2016a). Local histogram matching for efficient optical flow computation applied to velocity estimation on pocket drones. pages 3255–3260. IEEE.
-

- [McGuire et al., 2016b] McGuire, K., de Croon, G., De Wagter, C., Tuyls, K., and Kappen, H. (2016b). Efficient Optical flow and Stereo Vision for Velocity Estimation and Obstacle Avoidance on an Autonomous Pocket Drone.
- [McGuire et al., 2017a] McGuire, K., de Croon, G., De Wagter, C., Tuyls, K., and Kappen, H. (2017a). Efficient optical flow and stereo vision for velocity estimation and obstacle avoidance on an autonomous pocket drone. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2(2) :1070–1076.
- [McGuire et al., 2017b] McGuire, K., de Croon, G., De Wagter, C., Tuyls, K., and Kappen, H. (2017b). Efficient optical flow and stereo vision for velocity estimation and obstacle avoidance on an autonomous pocket drone. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2(2) :1070–1076.
- [McPherron et al., 2010] McPherron, S. P., Alemseged, Z., Marean, C. W., Wynn, J. G., Reed, D., Geraads, D., Bobe, R., and Béarat, H. A. (2010). Evidence for stone-tool-assisted consumption of animal tissues before 3.39 million years ago at dikika, ethiopia. *Nature*, 466(7308) :857.
- [Menzel and Giurfa, 2001] Menzel, R. and Giurfa, M. (2001). Cognitive architecture of a mini-brain : the honeybee. *Trends in Cognitive Sciences*, 5(2) :62 – 71.
- [Michaelis and Menten, 1913] Michaelis, L. and Menten, M. L. (1913). Die kinetik der invertinwirkung. *Biochem. z*, 49(333-369) :352.
- [Moeckel and Liu, 2009] Moeckel, R. and Liu, S.-C. (2009). Motion detection chips for robotic platforms. In *Flying Insects and Robots*, pages 101–114. Springer.
- [Moore et al., 2014] Moore, R. J., Dantu, K., Barrows, G. L., and Nagpal, R. (2014). Autonomous mav guidance with a lightweight omnidirectional vision sensor. In *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 3856–3861. IEEE.
- [Mukul Sarkar, 2013] Mukul Sarkar, A. T. (2013). *A Biologically Inspired CMOS Image Sensor*, volume 461. Springer.
- [Muratet et al., 2005] Muratet, L., Doncieux, S., Briere, Y., and Meyer, J.-A. (2005). A contribution to vision-based autonomous helicopter flight in urban environments. *Robotics and Autonomous Systems*, 50(4) :195–209.
- [Nakayama and Loomis, 1974] Nakayama, K. and Loomis, J. (1974). Optical velocity patterns, velocity-sensitive neurons, and space perception : a hypothesis. *Perception*, 3(1) :63–80.
- [Nikolic et al., 2014] Nikolic, J., Rehder, J., Burri, M., Gohl, P., Leutenegger, S., Furgale, P. T., and Siegwart, R. (2014). A synchronized visual-inertial sensor system with fpga pre-processing for accurate real-time slam. In *Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on*, pages 431–437. IEEE.
- [Normann and Perlman, 1979] Normann, R. A. and Perlman, I. (1979). The effects of background illumination on the photoresponses of red and green cones. *The Journal of physiology*, 286 :491.
- [Olberg et al., 2000] Olberg, R., Worthington, A., and Venator, K. (2000). Prey pursuit and interception in dragonflies. *Journal of Comparative Physiology A*, 186(2) :155–162.
- [Olberg, 2012] Olberg, R. M. (2012). Visual control of prey-capture flight in dragonflies. *Current opinion in neurobiology*, 22(2) :267–271.
- [Portelli et al., 2011] Portelli, G., Ruffier, F., Roubieu, F. L., and Franceschini, N. (2011). Honeybees’ speed depends on dorsal as well as lateral, ventral and frontal optic flows. *PLOS ONE*, 6(5) :1–10.

-
- [Portelli et al., 2010] Portelli, G., Serres, J., Ruffier, F., and Franceschini, N. (2010). Modelling honeybee visual guidance in a 3-D environment. *Journal of Physiology Paris*, 104(1-2) :27–39.
- [Raharijaona et al., 2017] Raharijaona, T., Serres, J., Vanhoutte, E., and Ruffier, F. (2017). Toward an insect-inspired event-based autopilot combining both visual and control events. In *Event-Based Control, Communication and Signal Processing (EBCASP), 2017 3rd International Conference on*, pages 1–7. IEEE.
- [Rajappa et al., 2015] Rajappa, S., Ryll, M., Bülthoff, H. H., and Franchi, A. (2015). Modeling, control and design optimization for a fully-actuated hexarotor aerial vehicle with tilted propellers. In *Robotics and Automation (ICRA), 2015 IEEE International Conference on*, pages 4006–4013. IEEE.
- [Rigosi et al., 2017] Rigosi, E., Wiederman, S. D., and O’Carroll, D. C. (2017). Visual acuity of the honey bee retina and the limits for feature detection. *Scientific Reports*, 7 :45972.
- [Roubieu et al., 2013] Roubieu, F. L., Member, S., Expert, F., Sabiron, G., and Ruffier, F. (2013). Two-Directional 1-g Visual Motion Sensor Inspired by the Fly ’ s Eye. *IEEE Sensors Journal*, 13(3) :1025–1035.
- [Roubieu et al., 2012] Roubieu, F. L., Serres, J., Franceschini, N., Ruffier, F., and Viollet, S. (2012). A fully-autonomous hovercraft inspired by bees : Wall following and speed control in straight and tapered corridors. *2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2012, (Robio)* :1311–1318.
- [Roubieu et al., 2014] Roubieu, F. L., Serres, J. R., Colonnier, F., Franceschini, N., Viollet, S., and Ruffier, F. (2014). A biomimetic vision-based hovercraft accounts for bees’ complex behaviour in various corridors. *Bioinspiration & Biomimetics*, 9(3) :036003.
- [Rueckauer and Delbruck, 2016] Rueckauer, B. and Delbruck, T. (2016). Evaluation of event-based algorithms for optical flow with ground-truth from inertial measurement sensor. *Frontiers in neuroscience*, 10.
- [Ryll et al., 2016] Ryll, M., Bicego, D., and Franchi, A. (2016). Modeling and control of fast-hex : a fully-actuated by synchronized-tilting hexarotor. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2016 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 1689–1694. IEEE.
- [Ryll et al., 2017] Ryll, M., Muscio, G., Pierri, F., Cataldi, E., Antonelli, G., Caccavale, F., and Franchi, A. (2017). 6D physical interaction with a fully actuated aerial robot. In *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 5190–5195. IEEE.
- [Sabiron et al., 2013] Sabiron, G., Chavent, P., Raharijaona, T., Fabiani, P., and Ruffier, F. (2013). Low-speed optic-flow sensor onboard an unmanned helicopter flying outside over fields. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1742–1749.
- [Sabo et al., 2017] Sabo, C., Chisholm, R., Petterson, A., and Cope, A. (2017). A lightweight, inexpensive robotic system for insect vision. *Arthropod Structure and Development*, 46(5) :689 – 702. From Insects to Robots.
- [Scaramuzza et al., 2014] Scaramuzza, D., Achtelik, M. C., Doitsidis, L., Friedrich, F., Kosmatopoulos, E., Martinelli, A., Achtelik, M. W., Chli, M., Chatzichristofis, S., Kneip, L., Gurdan, D., Heng, L., Lee, G. H., Lynen, S., Pollefeys, M., Renzaglia, A., Siegwart, R., Stumpf, J. C., Tanskanen, P., Troiani, C., Weiss, S., and Meier, L. (2014). Vision-Controlled Micro Flying
-

- Robots : From System Design to Autonomous Navigation and Mapping in GPS-Denied Environments. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 21(3) :26–40.
- [Serres et al., 2008a] Serres, J., Dray, D., Ruffier, F., and Franceschini, N. (2008a). A vision-based autopilot for a miniature air vehicle : Joint speed control and lateral obstacle avoidance. *Autonomous Robots*, 25(1-2) :103–122.
- [Serres et al., 2008b] Serres, J., Masson, G. P., Ruffier, F., and Franceschini, N. (2008b). A bee in the corridor : Centering and wall-following. *Naturwissenschaften*, 95(12) :1181–1187.
- [Serres and Ruffier, 2016] Serres, J. and Ruffier, F. (2016). Optic flow-based robotics. *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*.
- [Serres et al., 2017] Serres, J., Viollet, S., and Ruffier, F. (2017). Microdrones bio-inspirés-doter nos futurs robots aériens de l’agilité des insectes. *Editions TI/ Techniques de l’Ingénieur*.
- [Serres and Ruffier, 2015] Serres, J. R. and Ruffier, F. (2015). Biomimetic Autopilot Based on Minimalistic Motion Vision for Navigating along Corridors Comprising U-shaped and S-shaped Turns. *Journal of Bionic Engineering*, 12(1) :47–60.
- [Serres and Ruffier, 2017] Serres, J. R. and Ruffier, F. (2017). Optic flow-based collision-free strategies : From insects to robots. *Arthropod Structure and Development*, 46(5) :703–717.
- [Shabayek et al., 2012] Shabayek, A. E. R., Demonceaux, C., Morel, O., and Fofi, D. (2012). Vision Based UAV Attitude Estimation : Progress and Insights. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 65(1-4) :295–308.
- [Sherk, 1978] Sherk, T. E. (1978). Development of the compound eyes of dragonflies (odonata). iii. adult compound eyes. *Journal of Experimental Zoology Part A : Ecological Genetics and Physiology*, 203(1) :61–79.
- [Shoemaker et al., 2011] Shoemaker, P. A., Hyslop, A. M., and Humbert, J. S. (2011). Optic flow estimation on trajectories generated by bio-inspired closed-loop flight. *Biological Cybernetics*, 104(4-5) :339–350.
- [Souhila and Karim, 2007] Souhila, K. and Karim, A. (2007). Optical flow based robot obstacle avoidance. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 4(1) :2.
- [Srinivasan, 2011a] Srinivasan, M. V. (2011a). Honeybees as a model for the study of visually guided flight, navigation, and biologically inspired robotics. *Physiological reviews*, 91(2) :413–460.
- [Srinivasan, 2011b] Srinivasan, M. V. (2011b). Visual control of navigation in insects and its relevance for robotics. *Current Opinion in Neurobiology*, 21(4) :535–543.
- [Strydom et al., 2014] Strydom, R., Thurrowgood, S., and Srinivasan, M. V. (2014). Visual odometry : autonomous uav navigation using optic flow and stereo. In *Proceedings of Australasian Conference on Robotics and Automation*.
- [Tammero and Dickinson, 2002] Tammero, L. F. and Dickinson, M. H. (2002). The influence of visual landscape on the free flight behavior of the fruit fly *Drosophila melanogaster*. *Journal of Experimental Biology*, 205(3) :327–343.
- [Taylor et al., 2003] Taylor, B., Bil, C., Watkins, S., and Egan, G. (2003). Horizon sensing attitude stabilisation : A vmc autopilot. In *18th International UAV Systems Conference*.

-
- [Vanhoutte et al., 2017a] Vanhoutte, E., Mafrica, S., Ruffier, F., Bootsma, R., and Serres, J. (2017a). Time-of-Travel Methods for Measuring Optical Flow on Board a Micro Flying Robot. *Sensors*, 17(3) :571.
- [Vanhoutte et al., 2017b] Vanhoutte, E., Ruffier, F., and Serres, J. (2017b). A honeybee’s navigational toolkit on Board a Bio-inspired Micro Flying Robot. In *The 9th International Micro Air Vehicle Conference and Competition (IMAV)*, Toulouse, France.
- [Vanhoutte et al., 2017c] Vanhoutte, E., Serres, J., and Ruffier, F. (2017c). A Quasi-panoramic Bio-inspired Eye for Flying Parallel to Walls. In *IEEE Sensors*, Glasgow, United Kingdom.
- [Vidal et al., 2018] Vidal, A. R., Rebecq, H., Horstschafer, T., and Scaramuzza, D. (2018). Ultimate SLAM? Combining Events, Images, and IMU for Robust Visual SLAM in HDR and High-Speed Scenarios. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(2) :994–1001.
- [Viollet, 2014] Viollet, S. (2014). Vibrating Makes for Better Seeing : From the Fly’s Micro-Eye Movements to Hyperacute Visual Sensors. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 2(April) :9.
- [Viollet et al., 2014] Viollet, S., Godiot, S., Leitel, R., Buss, W., Breugnon, P., Menouni, M., Juston, R., Expert, F., Colonnier, F., L’Eplattenier, G., et al. (2014). Hardware architecture and cutting-edge assembly process of a tiny curved compound eye. *Sensors*, 14(11) :21702–21721.
- [Viollet and Zeil, 2013] Viollet, S. and Zeil, J. (2013). Feed-forward and visual feedback control of head roll orientation in wasps (*polistes humilis*, vespidae, hymenoptera). *Journal of Experimental Biology*, 216(7) :1280–1291.
- [Wakakuwa et al., 2005] Wakakuwa, M., Kurasawa, M., Giurfa, M., and Arikawa, K. (2005). Spectral heterogeneity of honeybee ommatidia. *Naturwissenschaften*, 92(10) :464–467.
- [Webb, 2000] Webb, B. (2000). What does robotics offer animal behaviour? *Animal Behaviour*, 60(5) :545 – 558.
- [Westheimer, 2009] Westheimer, G. (2009). *Hyperacuity*. Encyclopedia of Neuroscience.
- [Yigit and Altug, 2012] Yigit, C. B. and Altug, E. (2012). Visual attitude stabilization of a unmanned helicopter in unknown environments with an embedded single-board computer. In *Robotic and Sensors Environments (ROSE), 2012 IEEE International Symposium on*, pages 49–54. IEEE.
- [Zufferey and Floreano, 2004] Zufferey, J.-C. and Floreano, D. (2004). Optic-flow-based steering and altitude control for ultra-light indoor aircraft. Sponsor : Swiss National Science Foundation.
- [Zufferey and Floreano, 2006] Zufferey, J. C. and Floreano, D. (2006). Fly-inspired visual steering of an ultralight indoor aircraft. *IEEE Transactions on Robotics*, 22(1) :137–146.
- [Zufferey et al., 2007a] Zufferey, J.-C., Klaptocz, A., Beyeler, A., Nicoud, J.-D., and Floreano, D. (2007a). A 10-gram vision-based flying robot. *Advanced Robotics*, 21(14) :1671–1684.
- [Zufferey et al., 2007b] Zufferey, J.-C., Klaptocz, A., Beyeler, A., Nicoud, J.-D., and Floreano, D. (2007b). A 10-gram vision-based flying robot. *Advanced Robotics*, 21(14) :1671–1684.

Microdrone équipé d'un système visuel inspiré des abeilles

RÉSUMÉ : De nos jours, l'engouement pour la robotique autonome ne cesse d'augmenter en particulier pour les microdrones. En effet, ces aéronefs de petite taille font l'objet de nombreuses recherches afin de les miniaturiser et de rendre leur navigation plus autonome. Ils doivent, pour cela, relever de nombreux défis comme augmenter le rapport puissance sur masse volante, stabiliser précisément leur vol, ou bien encore augmenter l'autonomie de vol. Mais, le véritable enjeu de la navigation de ces microrobots est sans doute de leur conférer une perception visuelle hautement fiable et réactive de leur environnement. Une des solutions dite conventionnelle est la perception visuelle au moyen de caméras optiques. Bien que ces caméras apportent une information riche au travers d'images de haute résolution, ce type de perception nécessite d'importantes ressources calculatoires pour traiter le flux massif de données générées. Aujourd'hui il paraît difficile de miniaturiser un microdrone équipé d'un tel système tout en le rendant réactif à une configuration environnementale inconnue et imprévisible. Or, la Nature nous montre que certains insectes ailés ont réussi à concilier miniaturisation et vitesse de déplacement élevée compte tenu de leur taille minuscule. En effet, l'abeille est un insecte volant d'environ 100 mg pour environ 13 mm de long qui est capable de voler à plusieurs kilomètres à une vitesse maximale d'environ 8 m/s sans percuter les obstacles environnants. De nombreuses études ont montré que cette capacité repose principalement sur la détection du flux visuel appelé aussi flux optique. Cette thèse explore un système de vision parcimonieux dédié à la navigation courte portée au moyen de capteurs visuels auto-adaptatifs innovants composés de seulement 12 pixels aux propriétés optiques inspirées de celles de l'abeille. Deux algorithmes de mesure de flux optique sont ensuite comparés en conditions idéales sur 5 décades d'irradiance et 3 décades de vitesses optiques, puis testés en conditions réelles de vol. L'algorithme le plus robuste et le plus efficace, de par ses très faibles besoins calculatoires, a été embarqué à bord d'un micro quadrirotor pesant environ 400 g et équipé d'un système visuel parcimonieux de 96 pixels stabilisé via une nacelle articulée en roulis et tangage pour compenser les rotations du quadrirotor. Les stratégies de navigation observées chez l'abeille ont ensuite été simulées dans des environnements virtuels (tunnel de longueur 6 m ou 12 m pour une section minimale de 25 ou 50 cm) et la preuve de faisabilité de la détection du flux optique à bord d'un microdrone a été démontrée en conditions réelles de vol en salle expérimentale (vol de 4 m de long à une distance minimale de 50 cm). Couplé à des stratégies de navigation inspirées de l'abeille, ce système visuel innovant dédié à la perception du mouvement permettra dans un futur proche de naviguer dans des environnements encombrés ou exigus.

MOTS CLÉS : Bio-Inspiration, Robotique, Microdrone, Vision, Flux optique, Evitement d'obstacle, Navigation

Microdrone with visual system inspired from honeybees

ABSTRACT : The interest in autonomous robotics is continually expanding, especially in the domain of micro air vehicles. Indeed, much research focuses on these small-size aircraft in order to miniaturize them and to make their navigation more autonomous. Such research must, for that, take up many challenges such as increasing the power to flying mass ratio, precisely stabilizing flight, or increasing flight autonomy. But the real challenge in navigating these micro robots is perhaps to give them a highly reliable and reactive visual perception of their environment. A conventional solution is visual perception by means of optical cameras. While these cameras provide rich information through high resolution images, this type of perception requires extensive computing resources to process the massive flow of generated data. It therefore currently appears difficult to miniaturize a microdrone equipped with such a system while making it reactive to an unknown and unpredictable environmental configuration. However, Nature shows us that some winged insects have managed to reconcile miniaturization and high speed of movement given their tiny size. Indeed, the honeybee is a flying insect of about 100 mg for about 13 mm long that is able to fly several kilometers at a maximum speed of about 8 m/s without colliding with surrounding obstacles. Many studies have shown that this ability is mainly based on the detection of the visual flow also called optic flow. This PhD thesis explores a parsimonious vision system dedicated to short range navigation using innovative self-adaptive visual sensors composed of only 12 pixels with optical properties inspired by those of honeybees. Two optic flow measurement algorithms are first compared under ideal conditions over 5 decades of irradiance and 3 decades of optical velocity, then tested under real flight conditions. The most robust and efficient algorithm, due to its very low computing requirements, was embedded on board a micro quadrotor weighing about 400 g and equipped with a parsimonious visual system of 96 pixels stabilized via an articulated gimbal in roll and pitch to compensate the quadrotor rotations. The navigation strategies observed in honeybees were simulated in virtual environments (6 m or 12 m long tunnel for a minimum section of 25 or 50 cm) and the feasibility of the detection of the optic flow on board a micro quadrotor was demonstrated in real flight conditions in experimental room (flight of 4 m long at a minimum distance of 50 cm). Coupled with navigation strategies inspired by the honeybee, this innovative visual system dedicated to the perception of movement will in the near future allow to navigate in cluttered or cramped environments.

KEYWORDS : Bio-Inspiration, Robotics, Micro air vehicle, Vision, Optic flow, Obstacle avoidance, Navigation
