

AIX-MARSEILLE UNIVERSITÉ
FACULTÉ DES SCIENCES DU SPORT DE LUMINY
163, avenue de Luminy
13288 MARSEILLE cédex 09
FRANCE

THÈSE DE DOCTORAT

Spécialité : Contrôle Perceptivo-Moteur et Apprentissage

présentée par

Frédéric ROUBIEU

en vue d'obtenir le grade de docteur d'Aix-Marseille Université

RÉALISATION D'UN MICRO-ROBOT AUTONOME,
INSPIRÉ DU CONTRÔLE DE VITESSE ET D'ÉVITEMENT D'OBSTACLES
OBSERVÉS CHEZ L'ABEILLE

Soutenu le 16 Juillet 2013 devant le jury composé de :

Stéphane	DONCIEUX	PR UPML/CNRS ISIR Paris	Rapporteur
Rogelio	LOZANO	DR CNRS/UTC Heudiasyc Compiègne	Rapporteur
Frédéric	BOYER	PR Ecole des Mines de Nantes IrCynn	Examineur
Gilles	MONTAGNE	PR AMU/CNRS ISM Marseille	Examineur
Pascal	VASSEUR	PR INSA Rouen	Examineur
Stéphane	VIOLLET	CR CNRS/AMU ISM Marseille	Directeur de thèse
Franck	RUFFIER	CR CNRS/AMU ISM Marseille	Co-Directeur de thèse

École Doctorale Sciences du Mouvement Humain - ED 463
UMR 7287 Institut des Sciences du Mouvement *Etienne-Jules Marey*

Remerciements

Je tiens à remercier, en premier lieu, mes directeurs de thèse, Stéphane Viollet et Franck Ruffier, qui m'ont accueilli au sein de l'équipe *Biorobotique*, voilà quatre ans, lors de mon stage de dernière année d'école d'ingénieurs et qui m'ont fait découvrir le monde de la recherche et plus précisément celui de la robotique bio-inspirée. Je les remercie de m'avoir fait confiance tout au long de ces années et de m'avoir donné ma chance dans ce travail de longue haleine qu'est une thèse.

Je remercie tout particulièrement Franck Ruffier, pour son soutien sans faille, ses nombreux conseils avisés et son esprit critique qui m'auront permis de mettre en valeur mes travaux et permis aussi de gagner un prix lors d'une conférence internationale. Je le remercie également d'avoir su repousser mes limites et de m'avoir inculqué la passion de la science, la curiosité et la rigueur scientifique, qualités essentielles au métier de chercheur.

Je remercie également Nicolas Franceschini pour ses discussions remplies d'une passion communicative qui ont également contribué à nourrir cette envie d'apprendre et à poursuivre l'incroyable aventure de la recherche en effectuant cette thèse.

Enfin, je remercie tous mes collègues Marc Boyron, Julien Dipéri, Fabien Expert, Raphaël Juston, Thibaut Raharijaonna qui ont, non seulement contribué par leurs conseils et leur aide à la concrétisation de ce projet de recherche, mais avec qui j'ai aussi partagé de bons moments ainsi que des discussions riches et intéressantes. Je pense également à tous les nombreux stagiaires et anciens doctorants qui ont donné vie à ce laboratoire.

Je tiens à remercier tout particulièrement Julien Serres pour son aide, son soutien, sa compréhension, son amitié et ses conseils précieux qui m'ont beaucoup apporté durant ces années de dur labeur.

Je remercie très chaleureusement les membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'expertiser ce travail.

Il me reste à exprimer ma gratitude envers ma famille qui m'a soutenu et encouragé pendant toutes ces années d'études, mais aussi envers ma belle-famille qui m'a beaucoup aidé et soutenu à la fin de cette thèse.

Enfin je réserve une gratitude (et le mot est faible) toute spéciale à mon épouse Delphine et à notre fille Éléonore pour leur amour et leur patience (quasi) infinie, particulièrement dans la tourmente de ces derniers mois de labeur diurne et nocturne, sept jour par semaine. Elles restent, avant toutes choses, ma plus belle réussite!

Frédéric L. ROUBIEU, le 07 Juin 2013

Liste des publications

Revue scientifique avec comité de lecture

F. L. Roubieu, J. R. Serres, N. Franceschini, S. Viollet and F. Ruffier. A biomimetic vision-based hovercraft accounts for bee's complex behaviors in various corridors. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2013 (submitted).

F. L. Roubieu, F. Expert, G. Sabiron and F. Ruffier. A two-directional 1-gram visual motion sensor inspired by the fly's eye. *IEEE Sensors Journal*, 13(3) : 1025–1035, 2013.

G. Portelli, F. Ruffier, **F. L. Roubieu** and N. Franceschini. Honeybee's speed depends on dorsal as well as lateral, ventral and frontal optic flows. *PLoS ONE*, Public Library of Science, 6(5) : e19486, 2011.

Conférences internationales avec comité de lecture

F. L. Roubieu, J. R. Serres, N. Franceschini, F. Ruffier and S. Viollet. A fully autonomous hovercraft inspired by bees : wall-following and speed control in straight and tapered corridors. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, Déc. 2012, Guangzhou, China, pp. 1311–1318.

F. L. Roubieu, F. Expert and F. Ruffier. Interpolation based « time of travel » scheme in a Visual Motion Sensors using a small 2D retina. *IEEE Sensors 2012 Conf.*, Oct. 2012, Taipei, Taiwan, pp. 1-4.

Best Student paper award (First place) at IEEE Sensors Conf. (28-31 Oct. 2011, Limerick)

F. L. Roubieu, F. Expert, M. Boyron, B.-J. Fuschlock, S. Viollet and F. Ruffier. A novel 1-gram insect based device measuring visual motion along 5 optical directions. *IEEE Sensors 2011 Conf.*, Oct. 2011, Limerick, Ireland, pp. 687–690.

Chapitre d'ouvrage scientifique

T. Raharijaona, L. Kerhuel, J. R. Serres, **F. L. Roubieu**, F. Expert F., S. Viollet, F. Ruffier and N. Franceschini. Insect-inspired visual motion sensing and bio-inspired flying robot. *Handbook of Biomimetics and Bioinspiration*, World Scientific Publishing, (Jabbari et al., Eds).

Poster

F. L. Roubieu, J. R. Serres, N. Franceschini, S. Viollet and F. Ruffier. Toward a fully autonomous hovercraft visually guided thanks to its own bio-inspired motion sensors. *International Bio-inspired Robots Workshop*, 06-08 Apr. 2011, Nantes, France.

Workshop

F. L. Roubieu, F. Expert, S. Viollet and F. Ruffier. Miniature visual motion sensors. *Réunion GT-UAV*, ENSAM, Nov. 2011, Paris, France.

Résumé

Cette thèse présente, pour la première fois, l'implémentation d'une stratégie visuelle bio-inspirée sur un aéroglisseur miniature totalement actionné (taille : $36 \times 21 \times 17.8$ cm, masse : 0.878 kg), qui lui permet de naviguer dans le plan horizontal d'un tunnel inconnu. L'élaboration de ce pilote automatique, dénommé LORA (*Lateral Optic flow Regulation Autopilot*), fait suite aux études comportementales menées sur l'abeille dans d'autres laboratoires et plus récemment dans notre laboratoire. Ces expériences nous ont amené à énoncer le principe de la régulation du flux optique pour le contrôle du vol de croisière.

Le pilote automatique LORA est un double régulateur de flux optique latéral. Il consiste en deux boucles visuo-motrices interdépendantes, chacune comportant une consigne de flux optique qui contrôle un degré de liberté du robot. La première boucle est un régulateur bilatéral de flux optique qui contrôle la vitesse d'avance du robot, alors que la seconde est un régulateur unilatéral de flux optique qui contrôle la position par rapport aux obstacles. La clé de voûte de ce système de guidage bio-inspiré est une troisième boucle destinée à maintenir le cap. Celle-ci repose sur la mesure d'un micro-gyromètre et d'un micro-compass magnétique, ce qui permet à l'aéroglisseur d'effectuer des mouvements de translation et de ne générer, sur son œil composé artificiel, que du flux optique de translation, seul dépendant du ratio « vitesse/distance aux obstacles ». L'estimation du flux optique s'effectue par un œil composé minimaliste, constitué de deux ou quatre Détecteurs élémentaires de mouvement (DEMs)(seulement 4 ou 8 pixels). Ce système visuel suffit au pilote automatique pour contrôler le ratio « vitesse/distance aux obstacles », tout en contrôlant conjointement la vitesse et la position du robot, sans avoir à mesurer ou estimer aucun de ces paramètres.

L'aéroglisseur est ainsi capable de franchir sans collision des tunnels aux formes diverses : droit, fuselé, présentant une pente, un virage, une absence de texture sur un mur ou même une zone non-stationnaire. Il adapte automatiquement sa vitesse et sa position aux obstacles à la manière d'une abeille. Cette stratégie visuelle bio-inspirée fournit non seulement une solution de navigation élégante, en environnement inconnu,

pour des micro-robots totalement actionnés, mais elle permet aussi d'expliquer comment une abeille de 100mg peut naviguer avec si peu de ressources calculatoires, c'est à dire sans l'aide de SONAR, RADAR, LIDAR, ou GPS.

Abstract

In this work, we present for the first time a bio-inspired motion vision-based navigation strategy embedded on a miniature fully-actuated hovercraft (size: $36 \times 21 \times 17$ cm, mass: 0.878 kg) allowing it to navigate safely on the horizontal plane of an unknown corridor. The design of this autopilot, called LORA (Lateral Optic flow Regulation Autopilot), follows the ethological findings made on honeybees in other laboratories and more recently in our laboratory, which led us to elaborate the principle of the *optic flow regulation* which might be used by insects to control their flight.

The bee-inspired LORA autopilot is a *dual optic flow regulator* which consists in two intertwined visuomotor feedback loops, each one has its own optic flow set-point and controls its own degree of freedom. The first loop is a bilateral optic flow regulator which controls the forward speed of the robot, whereas the second loop is an unilateral optic flow regulator controlling the clearance of the robot to the obstacles. The keystone of this bio-inspired guidance system is a heading-lock system enabling the robot to move in translations and therefore experience a purely translational optic flow which depends only on the ratio “speed/clearance to obstacles” thanks to the measurements of both a micro-gyrometer and a micro-magnetic compass. The estimation of optic flow is made by a minimalist compound eye, constituted of two or four Elementary Motion Detectors (EMDs) (only 4 or 8 pixels), which is sufficient for the autopilot to control the ratio “speed/clearance to obstacles” and thus control jointly both the speed and the position of the robot without having to measure or estimate any of these parameters.

The hovercraft is therefore able to cross without crashing a straight or a tapered corridor, presenting a frontal sloping terrain, a bend, a textureless wall, or even a non-stationary section by automatically adapting both its forward speed and its clearance to the walls imitating the honeybee. This bio-inspired visual strategy not only provides an elegant navigation solution in an unknown environment aimed to equip fully-actuated miniature vehicles but also to explain how a 100mg honeybee can navigate with few computational resources, i.e., without any SONAR, RADAR, LIDAR or GPS.

Table des matières

Remerciements	3
Liste des publications	6
Résumé de thèse en français	9
Résumé de thèse en anglais	11
1 Introduction	20
I Préambule	20
II Qu'est ce que le flux optique ?	24
II.A Définition générale	24
II.B Flux optique généré lors d'un mouvement de rotation	26
II.C Flux optique généré lors d'un mouvement de translation	27
III Les modalités sensorielles chez l'insecte ailé	28
III.A La modalité inertielle	28
III.B La vision	31
III.B.1 L'œil composé	31
III.B.2 Le système visuel rétinotopique : les lobes optiques	33
III.C Les neurones détecteurs de mouvement à large champ visuel	35
III.C.1 Les neurones VT pour le flux optique de translation	36
III.C.2 Les neurones optomoteurs pour le flux optique de rotation	37
IV Lien entre comportement et neurophysiologie chez les insectes ailés	37
IV.A Stabilisation du vol : la réaction optomotrice	38
IV.B Pilotage dans le plan vertical	40
IV.B.1 Pilotage par le flux optique	40
IV.B.2 Pilotage par le suivi de lignes	44
IV.C Pilotage dans le plan horizontal	44
IV.C.1 La réaction de centrage	44
IV.C.2 Le contrôle de vitesse	46
IV.C.3 Le suivi de paroi	47

V	Capteurs de flux optique bio-inspirés	50
V.A	Détecteur élémentaire de mouvement : le principe du « temps de passage »	52
V.B	Évolution des capteurs de flux optique basé sur le « temps de passage »	55
V.C	Les capteurs VLSI	59
V.D	Les capteurs de souris optique	61
V.E	Quelques yeux composés artificiels	64
VI	État de l'art sur quelques plateformes robotiques spécifiques	68
VI.A	Les micro-aéronefs	68
VI.B	Les robots terrestres holonomes, type aéroglisseur	71
VI.C	Les micro-robots de la taille d'un insecte	73
VI.D	Guidage visuel bio-inspiré par le flux optique en robotique	74
VI.D.1	La stratégie d'équilibrage des flux optiques latéraux	76
VI.D.2	La régulation unilatérale du flux optique	78
VI.D.3	Contrôle de la vitesse d'avance par une régulation bilatérale du flux optique	79
VI.D.4	La stratégie de convergence visuo-motrice ou <i>Wide Field Integration</i>	80
VII	Nouveautés du projet de thèse par rapport à l'état de l'art	83

2	Article I. A fully-autonomous hovercraft inspired by bees : wall following and speed control in straight and tapered corridors	86
	Abstract	88
I	Introduction	88
II	The LORA hovercraft robot	89
II.A	The robotic platform	89
II.B	The bio-inspired visual system	89
II.C	Hardware architecture	89
III	Dual lateral optic flow regulation	90
IV	Dynamic model and control of the hovercraft	90
V	Experimental set-up	92
VI	Experimental results	92
VII	Conclusion and future works	93
	Acknowledgments	93
	Appendix	93
	Résumé	96

3 Article II. A biomimetic vision-based hovercraft accounts for bee's complex behaviors in various corridors	98
Abstract	99
I Introduction	99
II The LORA hovercraft robot	101
II.A Dynamic model and identification of the hovercraft robot . . .	101
II.B The bio-inspired robot's visual system	101
II.C Hardware architecture	102
III The bee-inspired LORA autopilot	103
III.A The heading-lock system	103
III.B The bio-inspired dual lateral Optic Flow regulation	104
III.C Visual motion fusion	104
III.C.1 The case of a compound eye consisting of 2 pairs of pixels	105
III.C.2 The case of a compound eye consisting of 4 pairs of pixels	105
IV Experimental results with a 4-pixel compound eye	105
IV.A Wall-following and centring behaviours in both straight and tapered corridors	105
IV.B Automatic speed control and lateral positioning in corridors with a sloping terrain	107
IV.C Automatic reaction to a 4-m « no contrast zone » on one of the corridor walls	109
IV.D Automatic reaction to an « optic flow step perturbation » introduced by a moving wall	111
IV.E Automatic navigation in a 18°-bending corridor	112
IV.F Repeatability of the LORA robot's performance with a 4-pixel compound eye	114
V Experimental results with a frontal and wider field of view 8-pixel compound eye	114
V.A Safe navigation in stringent corridor configurations with two additional frontal eyes	114
V.B Repeatability of the LORA robot's performance with a 8-pixel compound eye	114
VI Discussion	114
VII Conclusion	116
Acknowledgements	116

Appendix	116
Résumé	119
4 Article III. A two-directional 1-gram visual motion sensor inspired by the fly's eye	123
Abstract	125
I Introduction	125
II Description of the device	126
III Experiment	128
IV Results	129
V Estimation of the direction and the magnitude of the visual motion . .	129
V.A Device description	129
V.B Optimization of the motion direction estimates	130
V.C Experiment	130
V.D Results	131
VI Conclusion	132
Acknowledgements	134
References	134
Résumé	136
5 Article IV. Honeybees' speed depends on dorsal as well as lateral, ventral and frontal optic flows	141
Abstract	143
I Introduction	143
II Material and methods	144
II.A Doubly tapered flight tunnel	144
II.B Pattern	144
II.C Experimental procedure	145
II.D Video recordings and flight path analysis	145
II.E Analysis	145
III Results	146
IV Discussion	147
IV.A Honeybees adjusted their speed in the same way, regardless of whether the tunnel narrowed vertically or horizontally.	148
IV.B Maintaining the perceived optic flows at a constant level.	148
Acknowledgements	151
References	151

Résumé	153
6 Discussion	157
I Similitudes comportementales entre le robot LORA et l'abeille	160
I.A Comportement de centrage	160
I.B Comportement de suivi de paroi	162
I.C Réaction automatique à une perturbation en échelon de flux optique dans un tunnel non-stationnaire	163
I.D Réaction automatique à une absence de texture ou une « ou- verture »	164
I.E Réaction automatique de contrôle de la vitesse d'avance dans un tunnel fuselé	170
II Robustesse du pilote automatique LORA aux perturbations	172
III Une double régulation du flux optique chez l'abeille?	175
IV Pistes d'amélioration du robot LORA	175
V La double régulation du flux optique pour guider les robots de demain? 178	
7 Conclusion	180
8 Annexes	183
I Synthèse des correcteurs d'avance et latéral	183
I Synthèse des correcteurs d'avance et latéral	183
I.A Correcteur d'avance	184
I.A Correcteur d'avance	184
I.B Correcteur latéral	184
I.B Correcteur latéral	185
II Étude du rejet des perturbations par les boucles sensorimotrices LORA	185
II Étude du rejet des perturbations par les boucles sensorimotrices LORA	185
II.A Boucle d'avance	185
II.A Boucle d'avance	185
II.B Boucle latérale	186
II.B Boucle latérale	187
III Quelques précisions sur la conception du robot LORA	188
III.A La carte « Cerveau » : centre névralgique du robot LORA . .	188
III.B La carte moteur et les actionneurs : la partie motrice du robot LORA	192
III.B.1 Les actionneurs	193

III.B.2	Réalisation d'une carte « régulateur de vitesse sans capteur » pour les pousseurs	194
III.B.3	Réalisation d'une carte « régulateur de vitesse avec capteur » de la turbine <i>Brushless</i>	199
Bibliographie		205

Chapitre 1

Introduction

I Préambule

Les aéronefs sans pilote (drone) connaissent un essor initialement militaire (missions de sécurité) mais se généralisent de nos jours à des applications civiles tel que la cartographie de zone géographique ou encore la surveillance d'incendies [Valanis, 2007]. Il se pose alors le problème de la navigation de ces drones en environnement urbain ou naturel encombrés (immeubles, canyon, forêts), lesquels pouvant gêner la réception d'un signal GPS et donc limiter l'autonomie de navigation de ces drones sans supervision humaine. En effet, les pilotes automatique actuels (e.g., Procerus Technologies Kestrel, MicroPilot MP Series) nécessitent tout un panel de capteurs dont notamment un récepteur GPS pour contrôler la trajectoire du drone. La robotique mobile traditionnelle s'appuie largement sur les domaines de la *vision par ordinateur* [Horn, 1986, Amidi et al., 1999, Hrabar and Sukhatme, 2003, Li and Chellappa, 2005] ou de la *vision industrielle* [Davies, 2004] pour proposer des solutions de navigations basées sur un flux d'images provenant d'une caméra. Mais ces algorithmes restent gourmands en ressources calculatoires ce qui est difficilement compatible avec les contraintes drastiques de taille (envergure $< 15\text{ cm}$), de masse ($< 100\text{ g}$) et de charge utile ($< 15\text{ g}$) d'un micro-aéronef que l'on désire rendre totalement autonome sans supervision humaine. Les manœuvres d'évitement d'obstacles qu'elles soient ventrales, frontales ou latérales sont encore, aujourd'hui, basées sur des capteurs de proximité actifs tels que les télémètres lasers qui tendent à être lourd (e.g., modèle de chez Fibertek Inc., masse : 3 kg [Scherer et al., 2008] ; Hokuyo UTM-30LX, masse : 370 g [Bry et al., 2012] ; [Shen et al., 2012]), chers (5600 pour le Hokuyo UTM-30LXs) et consommateurs en énergie (10 W pour le Hokuyo UTM-30LX). Ces derniers ne sont pas les plus adaptés pour être embarqués sur des cibles robotiques où la course vers la miniaturisation (et donc de la charge utile) figure parmi une des principales contrainte

de ce type de cible [Fearing et al., 2002, Wood, 2008, Ma et al., 2013].

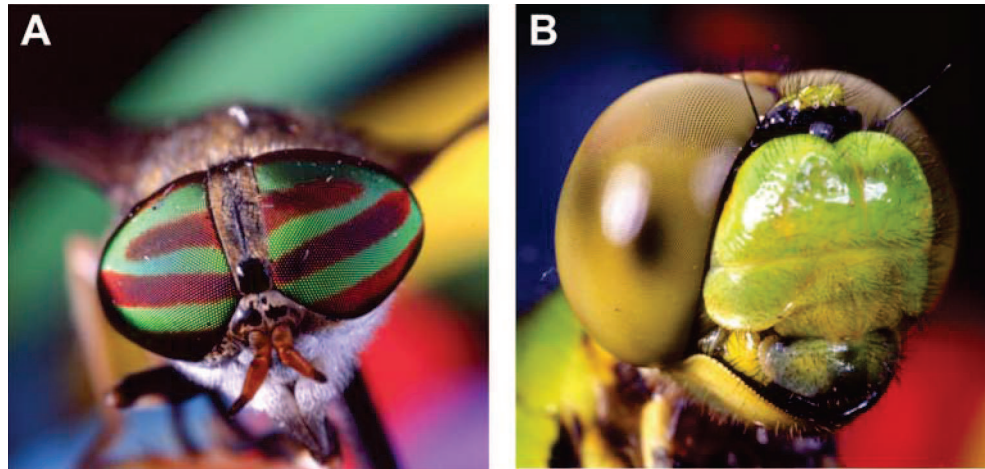


FIGURE 1.1 – Yeux composé d’insectes. (A) Taon ou ceux d’une libellule (B). (Ces images ont été prises sur le site <http://photos.yahoo.com/geoffwoodard>)

Les insectes ailés montrent des capacités de navigation époustouflantes en environnement *a priori* inconnu et sont dotés de caractéristiques de vol (tableau 1.1) qu’aucune invention humaine à ce jour ne parvient à égaler. De nombreuses études (drosophile : [David, 1982, Wagner, 1982, Egelhaaf and Borst, 1993, Tammero and Dickinson, 2002, Borst, 2009, Straw et al., 2010], papillon : [Kuenen and Baker, 1982], abeille : [Kirchner and Srinivasan, 1989, Srinivasan et al., 1991, 1993, 1996, Baird et al., 2005, 2006, Serres et al., 2008b, Baird et al., 2010, Portelli et al., 2010a, 2011], articles de synthèse : [Collett et al., 1993, Borst and Haag, 2002, Franceschini et al., 2007, Taylor and Krapp, 2007, Franceschini et al., 2009, Borst et al., 2010]) ont pu montrer que cette virtuosité de vol, notamment en termes de contrôle de vitesse et d’évitement d’obstacles, est attribuée, entre autres, à la vision du mouvement qu’ils perçoivent au moyen de leurs yeux composés (figure 1.1).

Insectes	Longueur	Masse	V_{max}	Ω_{max} en lacet	$(dV/dt)_{max}$	$(d\Omega/dt)_{max}$
Mouche bleue <i>Calliphora Vicina</i>	~ 20 mm	100 mg	10 m/s	~ 4000 °/s	~ 20 m/s ²	~ 10 ⁵ °/s ²
Abeille <i>Apis Mellifera</i>	~ 12 mm	100 mg ±20 mg	8 m/s	~ 2000 °/s	~ 15 m/s ²	~ 5.10 ⁴ °/s ²

TABLEAU 1.1 – Caractéristiques dynamiques de la mouche bleue *Calliphora Vicina* et de l’abeille *Apis Mellifera*. (D’après [Srinivasan and Lehrer, 1988, Serres, 2008]).

La vision du mouvement (le flux optique) peut reposer sur l’utilisation de capteurs

non-émissoifs plus économiques d'un point de vue énergétique. L'estimation du flux optique peut s'effectuer par différents moyens : à partir d'un flux d'images issues d'une caméra (i.e., méthode de Lucas et Kanade [Lucas and Kanade, 1981]) ou encore par un capteur de flux optique dédié [Blanes, 1986, Ruffier et al., 2003, Pudas et al., 2007, Viollet et al., 2010, Expert et al., 2011b, Roubieu et al., 2011, Sabiron et al., 2013b] (voir partie V pour plus de détails). La navigation par le flux optique constitue dès lors une branche de la navigation sans carte car elle permet d'accomplir des tâches évoluées, comme le contrôle de vitesse et l'évitement d'obstacles, sans aucune connaissance pré-requise de l'environnement. Cette méthode de navigation devient alors très précieuse pour le guidage de micro-robots, à faible charge utile, car elle permet de restreindre au strict minimum l'avionique embarquée.

Pour toutes ces raisons, il devient alors particulièrement intéressant de se pencher sur ces incroyables animaux afin de comprendre les mécanismes sensorimoteurs susceptibles d'intervenir au sein de leur système nerveux minimaliste (moins d'un million de neurones chez l'abeille [Strausfeld, 1976, Menzel and Giurfa, 2001]).

Ainsi, les résultats présentés dans cette thèse découlent directement d'une approche bio-inspirée inscrite dans les travaux de notre laboratoire depuis maintenant une trentaine d'années. Cette approche gagne en popularité dans le monde de la recherche actuellement et de plus en plus de travaux traitent de biomimétisme et de bio-inspiration dans la conception de systèmes innovants issus de l'observation (pour un article de synthèse, voir [Lepora et al., 2013])

Notre démarche de recherche mêle alors les domaines de la biologie, à travers des études anatomique, électrophysiologique [Franceschini, 1985, Franceschini et al., 1989] ou encore éthologique [Serres et al., 2008b, Portelli et al., 2010a, 2011, Viollet and Zeil, 2013] des insectes ailés, ainsi que dans la simulation [Martin and Franceschini, 1994, Mura and Franceschini, 1994, Serres et al., 2008a, Portelli et al., 2010b] et la conception de systèmes intelligents s'en inspirant [Blanes, 1991, Pichon, 1991, Franceschini et al., 1992, Mura and Franceschini, 1996, Viollet and Franceschini, 1999, Netter and Franceschini, 2002, Ruffier and Franceschini, 2003, 2004, Ruffier, 2004b, Ruffier and Franceschini, 2005, 2008, Viollet and Ruffier, 2009, Expert and Ruffier, 2012]. Tout ceci dans un seul but : comprendre par l'observation et la modélisation les traitements sensorimoteurs susceptibles d'intervenir au sein du système nerveux des insectes ailés dans le contrôle de leur vol. La validation d'un modèle bio-inspiré par la conception robotique constitue dès lors une condition *sine qua none* et une démarche originale qui nous permet d'une part d'apporter des solutions de guidage robotique innovantes et d'autres part de jeter une lumière nouvelle sur le modèle biologique inspiré de l'observation.

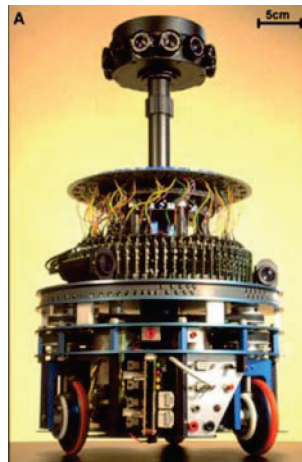


FIGURE 1.2 – « Robot mouche » mis au point dans notre laboratoire, capable d'éviter une forêt d'obstacles sur la base de la vision du mouvement fournie par son œil composé (visible à mi-hauteur) en procédant à des mouvements de translations élémentaires à vitesse constante égale à 50 cm.s^{-1} [Pichon, 1991, Blanes, 1991, Franceschini et al., 1992].

Cette méthode de recherche a ainsi permis, tout au long de ces décennies, des avancées remarquables dans la compréhension de la perception du mouvement chez la mouche qui, grâce à des expériences électrophysiologiques, a contribué à l'élaboration du principe de fonctionnement d'un *Détecteur Élémentaire de Mouvement* (DEM) [Blanes, 1986] : le tout premier capteur de flux optique bio-inspiré. Ce capteur, véritable révolution à son époque, a pu être incorporé sur un robot mobile totalement autonome : le « robot mouche » [Pichon et al., 1989, Pichon, 1991, Blanes, 1991, Franceschini et al., 1992] (figure 1.2). Équipé de capteurs de flux optique analogiques [Blanes, 1986], ce robot est le premier en date capable de naviguer en environnement inconnu, uniquement sur la base du flux optique. Le « robot mouche » effectue des mouvements de translation à une vitesse constante de 50 cm.s^{-1} , vitesse que le robot maintient constante au moyen d'un tachymètre monté sur ses roues [Franceschini et al., 1992]. Cette vitesse maintenue constante, couplée à la mesure du flux optique permet au robot de détecter les zones de danger à fort flux optique et de se diriger dans la direction de l'espace lui semblant le plus dégagé, tout en gardant le but de rejoindre une source de lumière. Cette connaissance de la vitesse est une hypothèse forte qui est encore formulée dans de nombreux travaux actuellement.

Ce n'est que quelques années plus tard avec les travaux de thèse de Franck Ruffier [2004b], que le concept de la *régulation du flux optique* fut formalisé et mis en œuvre sur un robot aérien captif : OCTAVE (figure 1.3). Ce dernier était alors capable sans

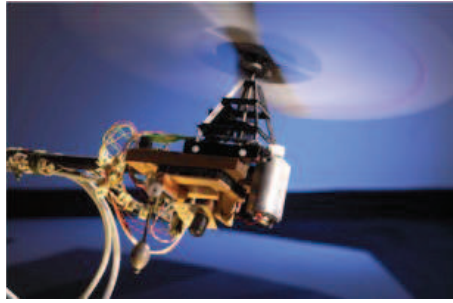


FIGURE 1.3 – Le robot OCTAVE (environ 100 g) exploite le flux optique ventral de translation pour réaliser un suivi de terrain. (D’après [Ruffier, 2004b, Ruffier and Franceschini, 2005, Franceschini et al., 2007]).

aucune connaissance, ni de sa vitesse, ni de sa distance aux obstacles, de procéder à des comportements évolués de décollage, de suivi de terrain et d’atterrissage automatique [Ruffier and Franceschini, 2003, 2004, Ruffier, 2004a, Ruffier and Franceschini, 2005, 2008] sur la seule base de la régulation du flux optique de la région ventrale, mesure fournie par un capteur de flux optique dédié [Ruffier et al., 2003]. Cette hypothèse du régulateur de flux optique fut reprise, un peu plus tard, en 2008, pour modéliser le contrôle du vol des abeilles sur le plan horizontal issu de l’observation [Serres et al., 2008b] puis fut porté sur un robot simulée, les résultats de simulation montrant que le robot pouvait contrôler sa vitesse et éviter les obstacles latéraux en environnement inconnu [Serres et al., 2008a].

Nous utilisons, dans ces travaux, cette hypothèse de la régulation du flux optique pour l’appliquer au guidage visuel sur le plan horizontal d’un aéroglisseur miniature *réel* totalement actionné. Cette étape de mise en œuvre sur un robot vient compléter notre démarche de travail bio-inspirée sur la navigation en environnement inconnu grâce au flux optique. Enfin, de manière à bien comprendre tous les aspects et les enjeux de ce travail de thèse, il nous importe maintenant d’introduire la notion du flux optique.

II Qu’est ce que le flux optique ?

II.A Définition générale

Dans le but d’assurer leur survie, les animaux disposent d’un système de perception des informations et d’un système locomoteur avec lequel ils interagissent avec leur environnement. L’interaction de l’animal avec ses congénères, ou encore avec les obstacles jonchant l’environnement, s’opère par la vision. La *vision du mouvement* renvoie notamment des informations de mouvement relatif lié au mouvement propre



FIGURE 1.4 – Champ de flux optique généré sur la rétine du pilote par le mouvement de translation d'un avion à l'atterrissage. Chaque vecteur représente le sens et le module de la vitesse angulaire des fronts contrastés dans l'environnement. Le point au centre de l'image a une vitesse angulaire nulle : c'est par définition le *foyer d'expansion* ou *pôle* du flux optique. (D'après [Gibson, 1950]).

de l'animal dans la structuration tridimensionnelle de son environnement [Gibson, 1950, 1958, Koenderink, 1986]. Lorsque celui-ci est en mouvement, les objets contrastés présents dans l'environnement, défilent dans son champ visuel avec une *vitesse angulaire* de défilement caractéristique [Gibson, 1950]. Cette vitesse angulaire est perçue par le système visuel comme un défilement optique ou *flux optique*. Ce flux optique peut être représenté par un champ de vecteurs de vitesse angulaire (figure 1.4), noté $\vec{\omega}$, et peut être complexe car il résultera de la nature de l'environnement et du type de mouvement de l'agent dans cet environnement [Koenderink and van Doorn, 1987a,b] (figures 1.4 & 1.5).

Dans l'espace tri-dimensionnel, un agent peut se déplacer selon ses six degrés de liberté à savoir ses trois degrés liés à la translation et ses trois autres liés à la rotation suivant les trois directions orthogonales constituant l'espace. Chaque mouvement de l'agent engendre alors un champ vectoriel de flux optique spécifique qui lui est associé (figure 1.5 & 1.6). Lors d'un mouvement complexe, les différents champs se superposent en une sommation de la composante du flux optique de rotation $\vec{\omega}_R$ et du flux optique de translation $\vec{\omega}_T$ [Koenderink and van Doorn, 1987a], tel que le champ vectoriel résultant $\vec{\omega}$ soit :

$$\vec{\omega} = \vec{\omega}_R + \vec{\omega}_T \quad (1.1)$$

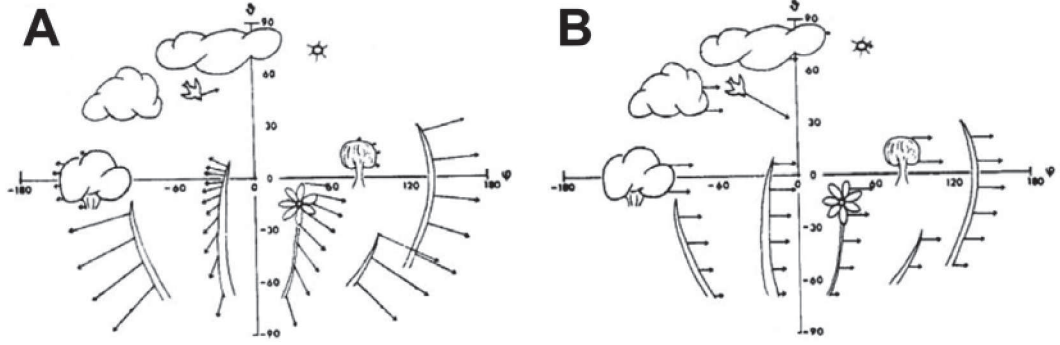


FIGURE 1.5 – Structure du flux optique suivant le type de mouvement effectué. (A) Lors d'un déplacement en *translation* d'un agent vers le centre O, les objets proches, comme la fleur (premier plan), génèrent un flux optique (vecteur vitesse angulaire) d'autant plus important qu'ils sont proches, contrairement aux objets considérés à l'infini (nuages). Pour les objets lointains ou considérés à l'infini, ils génèrent un flux optique faible, voir nul. (B) Lors d'un mouvement de *rotation* pur, tous les objets présent dans l'environnement génèrent un flux optique d'une même magnitude. (D'après [Buchner, 1984]).

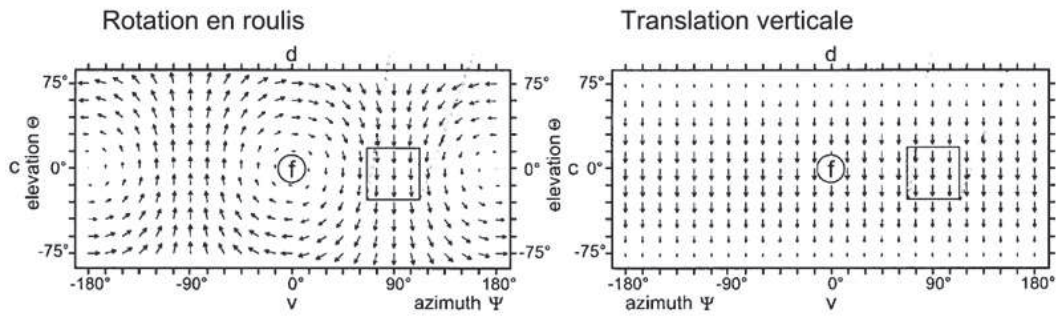


FIGURE 1.6 – Plan de Mercator du champ de vecteur de flux optique d'un agent effectuant un mouvement de translation verticale (A) et de roulis (B). (D'après [Krapp et al., 1998]).

II.B Flux optique généré lors d'un mouvement de rotation

Lors d'une rotation en roulis de l'agent (figure 1.6A), le flux optique généré est nul suivant cet axe, soit l'axe passant par le couple de position en élévation Ψ et en azimuth θ tel que $(\Psi = 0^\circ, \theta = 0^\circ)$ et $(\Psi = 180^\circ, \theta = 0^\circ)$ dans la projection cylindrique (Mercator) (figure 1.6A). Pour ce type de mouvement, l'équation 1.2 montre que la norme du flux optique de rotation $\|\vec{\omega}_R\|$ ne dépend que de la position en élévation et en azimuth de l'axe considéré ainsi que de la norme du vecteur vitesse de rotation $\|\vec{\Omega}_{roulis}\|$ autour de l'axe de roulis :

$$\|\vec{\omega}_R\| = \|\vec{\Omega}_{roulis}\| \cdot \sqrt{(1 - \cos^2 \Psi \cdot \cos^2 \theta)} \quad (1.2)$$

La figure 1.5B illustre l'équation 1.2 pour lequel tout les objets de l'environnement, proches ou éloignés, génèrent un flux optique lié à la vitesse angulaire de l'agent $\vec{\Omega}_{roulis}$. Cette composante du flux optique ne renseigne pas l'agent sur sa proximité aux obstacles mais plutôt sur la dérivée de son *attitude*, ne permettant pas de réaliser des tâches de navigation liées à l'évitement d'obstacles mais plutôt à la stabilisation du vol (partie IV.A).

II.C Flux optique généré lors d'un mouvement de translation

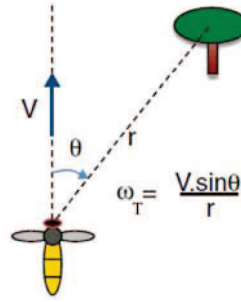


FIGURE 1.7 – Illustration montrant les paramètres dont dépendent le flux optique de translation ω_T : la vitesse de l'agent V , sa distance à l'obstacle r ainsi que l'écart angulaire θ entre la direction du vecteur vitesse et l'objet. (D'après [Srinivasan, 2011b]).

Lors d'un mouvement de *translation* pur, il existe deux points dans le champ visuel pour lequel le flux optique est nul : le foyer d'expansion ($\Psi = 0^\circ; \theta = 90^\circ$) d'où les vecteurs de flux optique $\vec{\omega}$ divergent (figures 1.4 & 1.5B) et le foyer de contraction ($\Psi = 0^\circ; \theta = -90^\circ$) d'où les vecteurs $\vec{\omega}$ convergent (figure 1.5B). Ainsi lors d'une translation pure, le champ de flux optique généré va dépendre du module de la vitesse de l'agent V , de la distance de son œil par rapport à l'objet considéré r ainsi que de l'angle de visée (θ) entre l'objet et la direction du vecteur vitesse (figure 1.7) tel que [Whiteside and Samuel, 1970] :

$$\omega_T = \frac{V}{r} \cdot \sin \theta \quad (1.3)$$

L'équation 1.3 nous montre que la composante de translation du flux optique, contrairement à la composante de rotation, dépend de la proximité aux obstacles. C'est précisément ce flux optique de translation qui trouve toute son importance dans les tâches de contrôle de vitesse et d'évitement d'obstacles en environnement inconnu.

Ainsi l'insecte ailé, qui utilise la vision du mouvement dans le contrôle de son vol, doit être capable de dissocier à la fois le flux optique de translation et de rotation, de manière à interagir correctement avec son environnement. Nous pouvons nous poser les

questions suivantes : quelles modalités sensorielles interviennent dans la stabilisation de son vol ? Comment son système nerveux lui permet-il de dissocier le flux optique de rotation et de translation qui servira au contrôle de son vol ? La partie suivante nous permettra d'éclairer ces différents points et de comprendre comment un cerveau d'un millimètre cube, dont les deux-tiers des neurones sont spécialisés dans la vision, est capable d'extraire ces différentes grandeurs.

III Les modalités sensorielles chez l'insecte ailé

Dans leur difficile tâche pour assurer leur survie, les insectes doivent pouvoir composer avec toutes les difficultés de l'environnement qui les entourent pour chercher leur nourriture, chasser leur proie, échapper aux prédateurs ou encore poursuivre leur congénères pour la reproduction. Pour effectuer de pareilles tâches, les insectes ailés sont pourvus de tout un panel de modalités sensorielles qui leurs sont adaptés comme les antennes, les cils, les ocelles, les balanciers (pour les diptères) ou encore les yeux composés (article de synthèse : [Taylor and Krapp, 2007]). Néanmoins, afin de bien garder en vue l'objectif de comprendre comment s'inspirer de la nature pour contrôler un robot qui aura pour tâche de « percevoir » le monde et de contrôler sa trajectoire à la manière d'un insecte ailé, nous nous intéresserons principalement aux modalités sensorielles chez l'insecte ailé liées à la stabilisation de son vol et à l'interaction avec son environnement ou ses congénères, c'est à dire les modalités inertielles et visuelles.

III.A La modalité inertielle

Contrairement aux abeilles, les mouches (qui sont des diptères) possèdent une paire de balanciers (figure 1.8). Ces derniers correspondent à une paire d'ailes atrophiée qui s'est transformée par phylogenèse. Les balanciers post-alaires (figure 1.8A) oscillent à la même fréquence de battement que les ailes mais en opposition de phase avec ces dernières. Lorsqu'une mouche tourne selon un axe, une force de Coriolis est générée perpendiculairement au plan d'oscillation du balancier. Cette force agit principalement sur l'extrémité du balancier (figure 1.8B) et vient le déformer avec une amplitude proportionnelle au produit vectoriel entre la vitesse linéaire de déplacement de ce dernier et la vitesse angulaire de rotation de la mouche [Hengstenberg, 1988]. De ce fait, les balanciers sont sensibles directement à une vitesse angulaire de rotation [Hengstenberg, 1988]. Ces balanciers officient alors comme de véritables capteurs inertiels ou gyromètres trois axes. Cette déformation est ensuite mesurée par des neurones mécano-récepteurs cuticulaires placés à la base du balancier (~ 335 neurones)

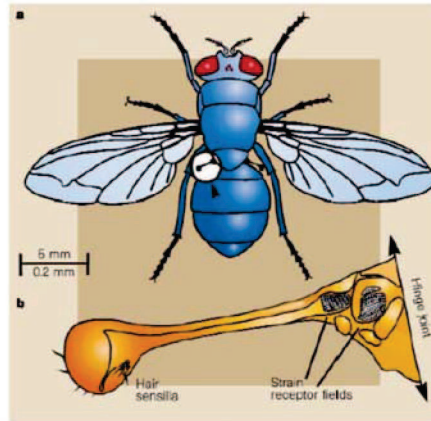


FIGURE 1.8 – Illustration montrant l'emplacement des balanciers et leur aspect. Ces derniers se déforment sous l'action des forces de Coriolis générées par les rotations de l'insecte autour de ses axes et ce sont ces déformations qui sont ensuite mesurées par les neurones mécano-récepteurs situés à la base du balancier. (D'après [Hengstenberg, 1988]).

[Hengstenberg, 1988]. Il a été montré chez la mouche bleue *Calliphora* que cette information inertielle intervient dans le réflexe de compensation en roulis dans une gamme de vitesse angulaire en roulis de $50^\circ.s^{-1}$ à $1500^\circ.s^{-1}$ [Hengstenberg, 1998]. En deçà de $50^\circ.s^{-1}$, c'est l'information visuelle qui devient prépondérante dans le réflexe de compensation en roulis. Les balanciers jouent néanmoins un rôle prépondérant dans le contrôle du vol chez les diptères, une ablation des balanciers chez la mouche rend impossible le contrôle de son vol qui s'écrase inévitablement au sol [Hengstenberg, 1988]. D'autres études comportementales ont mis en évidence ce réflexe de stabilisation [Hengstenberg, 1988, Nalbach, 1993, 1994, Nalbach and Hengstenberg, 1994] mais ont aussi montré que l'information inertielle provenant des balanciers permet aussi de stabiliser leur vol [Faust, 1952]. Une étude montre également que les insectes ailés qui ne disposent pas de balanciers pourraient utiliser des capteurs mécano-récepteurs tels que les antennes dans un même but [Sane et al., 2007].

Une récente étude [Ristroph et al., 2010] a étudié la correction d'une perturbation en couple de lacet sur une drosophile en vol libre (figure 1.9A-B). Un système de trois caméras rapides, capturant le vol de l'insecte à une vitesse de 35 images par période T de battement d'ailes ($T = 4.5ms$), a permis d'observer que ces dernières peuvent corriger, avec une précision de 2° une déviation maximale de leur cap, en lacet, d'environ $\Delta\Psi_{max} = 45^\circ$ (figure 1.9C) en, tout au plus, $60 ms$. Les auteurs montrent que grâce à la modalité inertielle provenant des balanciers, qui fournissent une mesure de la vitesse angulaire de l'insecte, les drosophiles sont alors capables de réorienter leur

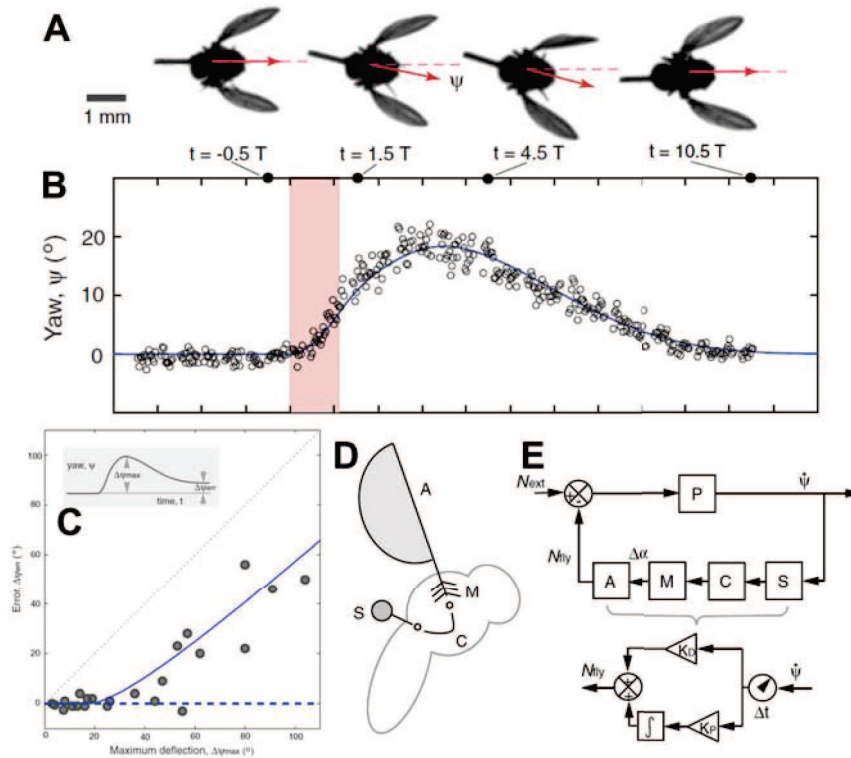


FIGURE 1.9 – (A) Vue de dessus d’une drosophile avant la perturbation, pendant la perturbation en rotation en lacet vers la droite, pendant la phase de correction en lacet vers la gauche et enfin après le rétablissement. L’angle de lacet est donné par une flèche rouge. (B) Angle de lacet Ψ affiché en fonction du temps exprimé en période de battement d’ailes ($T = 4.5 \text{ ms}$). La bande rouge indique la durée (5 ms, environ une période T) de la perturbation en couple de lacet $N_{ext} = 0.8 \times 10^{-9} \text{ N} \cdot \text{m}$. Le cap est mesuré expérimentalement et un modèle du contrôle (Proportionnel-Dérivé) mis en évidence est tracé (courbe bleue). (C) Précision de la correction en lacet. Pour une déviation en lacet maximale $\Delta\Psi_{max}$ de moins de 45° , la drosophile est capable de corriger son cap avec une erreur de moins de 2° par rapport à son cap d’origine. (D) Les balanciers (S) sont sensibles aux mouvements de rotation du corps, le circuit neuronal (C) traite l’information et le circuit de contrôle moteur (M) pilote le mouvement des ailes qui génère alors un couple aérodynamique de correction (A). (E) Schéma bloc du modèle du contrôle du vol chez la drosophile. Le schéma bloc inférieur montre un détail du modèle de contrôle. Après un retard temporel Δt , un terme qui est proportionnel à la vitesse angulaire en lacet $\dot{\Psi}$ et un terme intégrant ce signal sont ajoutés pour déterminer le couple correctif exercé sur la mouche. (D’après [Ristroph et al., 2010]).

corps en appliquant un couple correctif en lacet. Ce couple de correction est généré par les ailes qui battent avec une différence de l’angle d’attaque d’une aile par rapport à l’autre. Cependant, pour une perturbation trop forte, l’insecte ne parvient pas à retrouver son cap originel avant la perturbation. L’élément très intéressant de cette

étude est que ces auteurs ont été jusqu'à établir un modèle de la dynamique en lacet de la drosophile et de montrer que le correcteur intervenant dans cette boucle n'est autre qu'un simple correcteur Proportionnel-Dérivé (PD) qui reçoit en entrée les signaux des balanciers (figure 1.9D-E). Cette étude montre directement le rebouclage de la modalité intertielle sur l'actionnement moteur : le battement des ailes.

Enfin, pour en revenir aux hyménoptères qui sont dépourvus de balanciers, de récents travaux menés chez la guêpe (*Polistes humilis*) montrent que le réflexe de compensation en roulis est purement basé sur la vision, et donc par la perception du flux optique de rotation [Viollet and Zeil, 2013]. Cette observation renforce l'idée qu'un mécanisme similaire puisse également être présent chez l'abeille, qui est, elle aussi, un hyménoptère.

Pour la sous-partie suivante, nous revenons à la vision et nous procéderons à une description brève des yeux composés des insectes ailés. Pour de plus amples détails, on pourra se référer à des études plus complètes [Goodman, 2003, Srinivasan, 2009].

III.B La vision

III.B.1 L'œil composé

Une description schématique de l'œil composé de l'abeille est donnée en figure 1.10. Les abeilles ouvrières *Apis Mellifera* possèdent deux yeux composés et comptent, en moyenne, 5500 ommatidies par œil [Seidl and Kaiser, 1981] (figures 1.10A). Chacune de ces ommatidies comporte une petite lentille : la cornée (figures 1.10B), qui vient concentrer la lumière, provenant d'une direction particulière de l'environnement, sur un groupe de neuf photorécepteurs organisés de manière concentrique. Une coupe longitudinale est donnée en figure 1.10B. Chaque ommatidie adjacente est séparée d'un angle $\Delta\varphi$, appelé angle *inter-ommatidial* (figure 1.11), qui varie suivant les régions de l'œil. Cet échantillonnage de l'espace s'effectue à pas variable allant de $\sim 1.9^\circ$, dans les régions frontales, à $\sim 3.5^\circ$ dans les régions latérales de l'œil composé [Seidl, 1982], intervenant dans l'acuité visuelle de l'insecte [Land and Collett, 1997]. En effet, plus l'angle $\Delta\varphi$ est faible, plus l'insecte est en mesure de détecter un mouvement relatif (flux optique) faible provenant d'un objet - proie, prédateur, feuillage - situé à une grande distance [Land and Collett, 1997] mais aussi de pourvoir l'insecte d'une plus grande finesse dans l'échantillonnage spatial de son environnement visuel. En plus de cet échantillonnage spatial, un filtrage spatial passe-bas, résultant d'un phénomène de diffraction de la lumière dû au faible diamètre de l'optique de chaque ommatidie ($\sim 18 \mu m$) [Praagh et al., 1980], entraîne une directivité angulaire du photorécepteur de type gaussienne [Götz, 1964, Hardie, 1985] reproduisant un effet de « flouté » sur

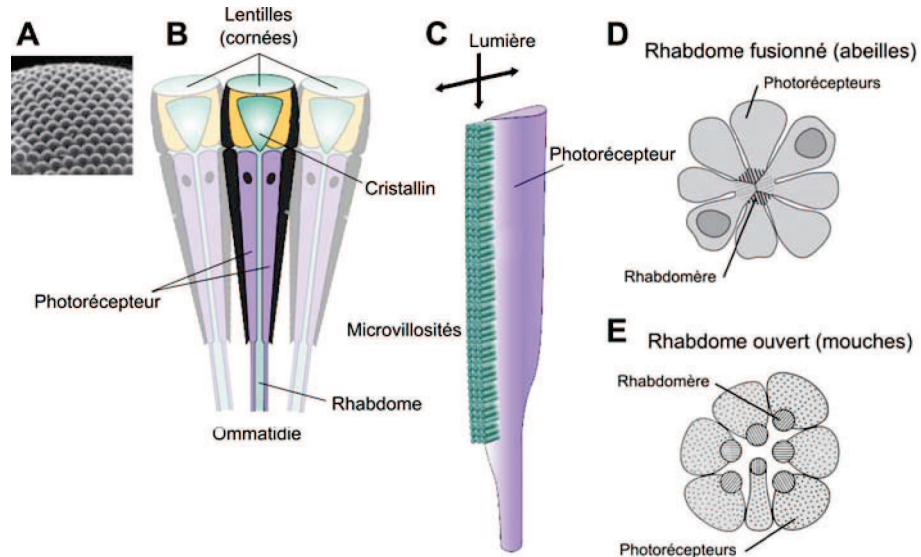


FIGURE 1.10 – Illustration schématique d’une structure d’œil composé d’un insecte. (A) Surface de l’œil composé montrant les ommatidies. (B) Coupes longitudinales d’une ommatidie composée d’une lentille et d’un cristallin concentrant la lumière sur des cellules photoréceptrices. (C) Structure d’une cellule photoréceptrice à l’intérieur d’une ommatidie montrant les microvillosités, où se trouve la partie photosensible (le rhabdomère) contenant les photopigments. (D) Rhabdomère *fusionné* chez l’abeille. (E) Pour le cas de la mouche, comme pour tous les diptères, chaque axe optique d’un photorécepteur est séparé (rhabdomère *ouvert*) et peut alors être stimulé indépendamment [Kirschfeld and Franceschini, 1968]. (D’après [Collins, 1997, Srinivasan, 2011a]).

l’image renvoyée aux photorécepteurs. Cette directivité gaussienne est caractérisée par sa largeur à mi-hauteur, appelée l’angle d’acceptance $\Delta\rho$ (figure 1.11), et vaut 2.6° dans les régions frontales [Eheim and Wehner, 1972, Labhart, 1980] pour ensuite suivre les variations de l’angle inter-ommatidial $\Delta\varphi$ suivant les régions de l’œil. Ainsi, plus $\Delta\rho$ est petit et plus le nombre de détails spatial renvoyés aux photorécepteurs sera grand.

Enfin, prises dans leur ensemble, les ~ 11000 ommatidies des deux yeux composés capturent une image quasi-panoramique de l’environnement avec une petite zone « aveugle » à l’arrière de la tête [Seidl and Kaiser, 1981].

Les neuf photorécepteurs présents dans chaque ommatidie [Waterman, 1981, Menzel and Backhaus, 1991] sont regroupés en trois classes caractérisant la sensibilité spectrale des photopigments qu’ils contiennent : l’ultra-violet, le bleu et le vert. Les photorécepteurs vert sont majoritaires dans chaque ommatidie et constituent le système visuel *achromatique* de l’abeille intervenant dans la *perception du mouvement*. Ils constituent en effet les entrées des *neurones détecteurs de mouvement* des ganglions optiques de l’abeille [Bishop, 1970, Kaiser and Liske, 1974, Franceschini, 1975,

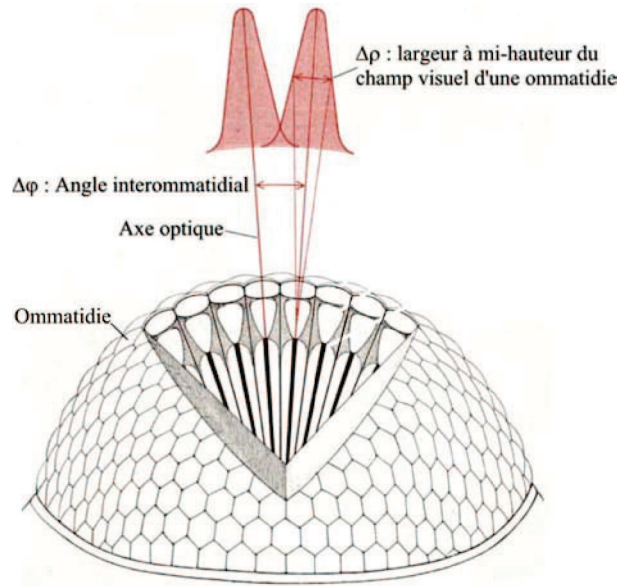


FIGURE 1.11 – Schéma d'un œil composé. L'œil est constitué de petits yeux élémentaire appelés ommatidies, chacune regardant une région spécifique de l'espace. Chaque ommatidie adjacente est séparée d'un angle inter-ommatidial $\Delta\varphi$. La directivité du photorécepteur présent dans l'ommatidie est caractérisée par une gaussienne de largeur à mi-hauteur appelée l'angle d'acceptance ($\Delta\rho$) dont la valeur avoisine $\Delta\varphi$ dans les mêmes régions. Cette directivité photoréceptrice gaussienne entraîne un filtrage spatial passe-bas sur l'image projetée sur les photorécepteurs. (D'après [Horridge, 1977]).

Hausen and Egelhaaf, 1989] qui offrent une résolution temporelle très fine (200 Hz) dans la perception de patterns achromatique en mouvement [Srinivasan and Lehrer, 1984]. Une ommatidie constitue alors un pixel de l'image. Les axones des neuf photorécepteurs sont ensuite connectés aux ganglions optiques : la *lamina*, puis la *medulla* et enfin la *lobula* (figure 1.12) pour des traitements plus avancés.

Ainsi l'œil composé de l'abeille constitue la première étape de la chaîne visuelle de l'insecte ailé. Les signaux provenant de ces dizaines de milliers de photorécepteurs sont traités, par la suite, par les ganglions optiques situés dans le cerveau de l'animal (figure 1.12&1.13). Nous nous limiterons uniquement, dans ce travail, au système visuel achromatique de l'abeille, responsable de la perception du mouvement.

III.B.2 Le système visuel rétinotopique : les lobes optiques

Le système visuel de l'abeille est dit *rétinotopique* du fait de l'organisation des ganglions ou lobes optiques intervenant dans le traitement des signaux visuels provenant des photorécepteurs. Cette organisation du système visuel de l'abeille, ou des diptères en général, montre que les informations visuelles sont traitées, étape par étape, par

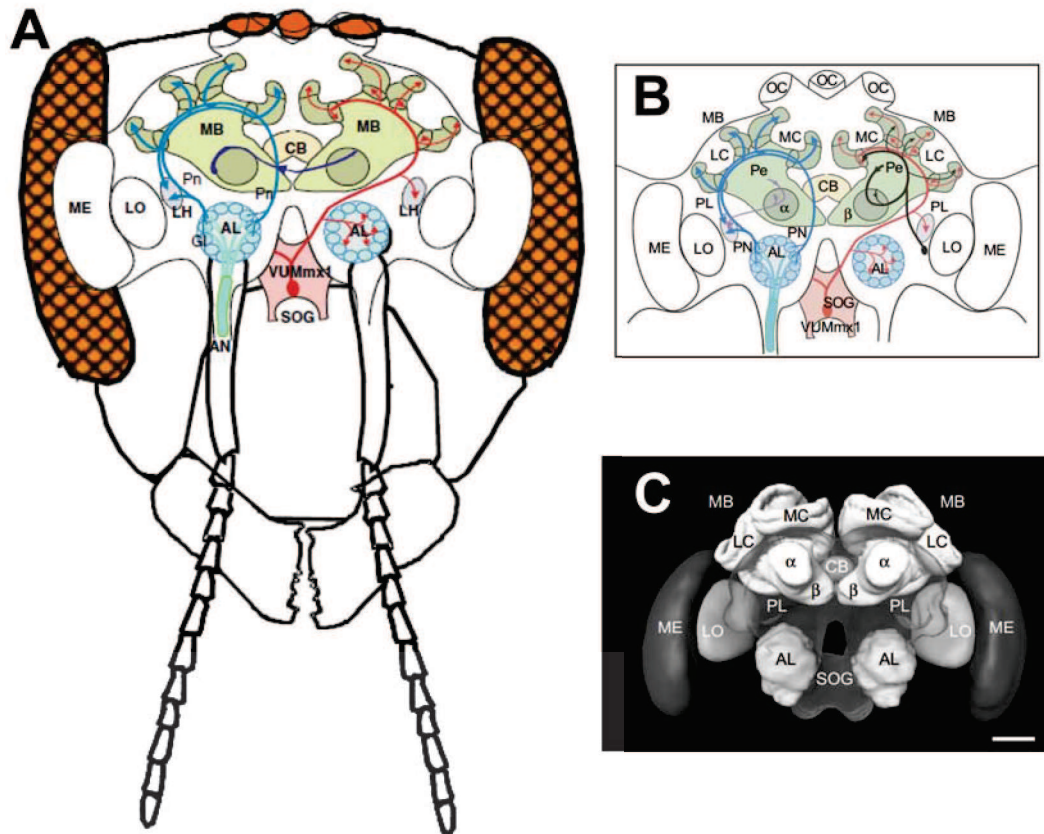


FIGURE 1.12 – (A) Représentation basique de l'organisation d'un cerveau d'abeille. (B) Schéma représentant une vue frontale d'un cerveau d'abeille. Les ommatidies des yeux composés (A) comportent trois types de photorécepteurs (ultra-violet, bleu et vert). Tous les photorécepteurs sont connectés à la *lamina* (LA, non représenté) puis se projettent dans la *medulla* (ME). Les neurones présents de la *medulla* sont interconnectés dans la *lobula* (LO) puis se projettent à nouveau dans le lobe protocérébral (PL). On y trouve également le lobe antennaire (AL), les ocelles (OC) ou encore le corps pédonculé (MB) (C) Reconstruction tri-dimensionnelle d'une vue frontale d'un cerveau d'abeille. (D'après [Giurfa, 2003, 2007].)

une zone spécifique du cerveau assurant une fonction bien spécifique. Ces ganglions optiques s'organisent autour de la *lamina* (LA), la *medulla* (ME) et la *lobula* (LO) (figure 1.12). L'abeille partage de nombreuses similarités avec le traitement visuel mis en œuvre chez la mouche. Chez cette dernière, la *lamina* renferme des neurones de second ordre qui effectuent un filtrage passe haut temporel (suppression du fond lumineux de l'image) et un contrôle automatique de gain afin de maintenir, indépendamment de la luminance, une amplitude constante des transitions de contraste lié au mouvement. Chez la mouche encore une fois, la *medulla* (figure 1.12) comporte environ 50 neurones par pixel et opère une fonction qui reste encore assez méconnue. Elle intervient dans la vision des couleurs, mais aussi dans la vision du mouvement

grâce à des neurones détecteurs de mouvement [Douglass and Strausfeld, 1996]. Elle interviendrait également dans la séparation des transitions « ON » (transition noir vers blanc) et « OFF » (transition blanc vers noir) [Franceschini et al., 1989]. Enfin la *lobula* (figure 1.12) constitue le dernier ganglion optique, chez l'abeille, et comprend des *neurones détecteurs de mouvement à large champ* qui répondent en fonction d'un pattern de vecteurs champ de flux optique caractéristique d'un mouvement particulier. Ces neurones se projettent ensuite dans les ganglions céphaliques centraux dont le *protocerebrum* (figure 1.12). Certains neurones de la *lobula* rejoignent aussi le système locomoteur de l'animal et descendent la corde nerveuse à travers le cou afin d'activer les neurones moteurs du thorax.

III.C Les neurones détecteurs de mouvement à large champ visuel

Contrairement à l'abeille, la *lobula* présente chez la mouche est divisée en deux sous-structures : la *lobula antérieure* (LO) et la *lobula postérieure* ou *lobula plate* (LP) (figure 1.13A). Cette dernière contient les neurones détecteurs de mouvement à large champ dont deux exemples de réponse sont montrés dans les figures 1.13B&C. Des études anatomiques et neurophysiologiques menées directement sur la *lobula plate* de la mouche ont permis de mettre en évidence l'existence de neurones sensibles à un mouvement particulier [Hausen, 1982a,b, Egelhaaf and Borst, 1993, Krapp et al., 1998, Borst et al., 2010]. Ces neurones détecteurs de mouvement à large champ, appelés *cellules tangentielles de la lobula plate* (LPTCs), répondent à des stimuli visuels correspondant à une *direction préférée* du mouvement (sens et magnitude) et s'inhibent lorsque le mouvement correspond à une autre direction. On note plusieurs classes de neurones LPTCs dans un même œil qui répondent à un mouvement particulier : dix cellules VS sensibles à des mouvements verticaux du haut vers le bas (cellules VS, figure 1.13B) et trois cellules répondant à un mouvement « de l'avant vers l'arrière » (cellules HS, figure 1.13C). Chez l'abeille, cette fois, des enregistrements électrophysiologiques, menés dans la corde nerveuse descendante de l'abeille reliée à la *lobula*, ont permis d'identifier des neurones à larges champs sensibles à des mouvements privilégiés [Ibbotson and Goodman, 1990, Ibbotson, 1991] comme le neurone DNV_1 sensible à un mouvement de rotation en lacet, les neurones $DNIV_2$ et $DNIV_4$ sensibles à un mouvement de rotation en roulis ou encore le neurone $DNIV_2$ sensible à un mouvement de rotation en tangage. D'autres neurones chez l'abeille répondent à un mouvement de translation de l'avant vers l'arrière : les neurones VT [Ibbotson, 2001].

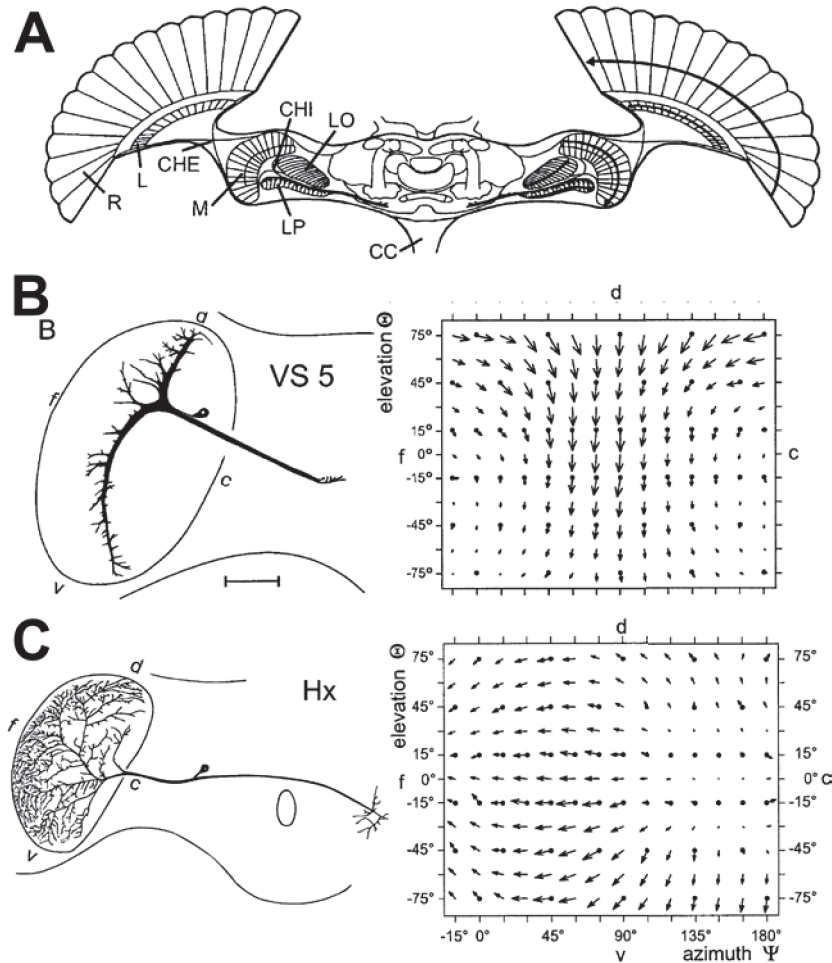


FIGURE 1.13 – (A) Schéma d'une section horizontale du système visuel de la mouche, d'où apparaissent la rétine (R), la lamina (L), la medulla (M) la *lobula antérieure* (LO) et la *lobula plate* (LP). Contrairement à l'abeille, la *lobula* est divisée en deux sous-structures chez la mouche : la *lobula antérieure* et la *lobula postérieure* ou *lobula plate*. (B) Réponses de neurones à large champ V_{s5} et H_x présents dans la *lobula plate* d'une mouche *Calliphora erythrocephala* sensibles respectivement à un mouvement de rotation en roulis (B) ou de translation de l'avant vers l'arrière (C) avec leur plan de Mercator respectif. (D'après [Krapp et al., 1998]).

III.C.1 Les neurones VT pour le flux optique de translation

Des neurones sensibles à un mouvement de *translation* de l'avant vers l'arrière ont été découverts dans la corde nerveuse descendante de l'abeille, Ibbotson les a nommé *Velocity Tunes neurons* ou neurones VT [Ibbotson, 2001]. Ibbotson a pu tester la réponse de ces neurones dans une gamme de vitesse angulaire de $40^\circ/s^{-1}$ à $1000^\circ.s^{-1}$ (figure 1.14) avec un jeu de quatre mires contrastés dont la période spatiale angulaire variait de 11° à 76° . Ces neurones ont la remarquable propriété de fournir une réponse monotone croissante avec la vitesse du mouvement (agissant comme de véritables cap-

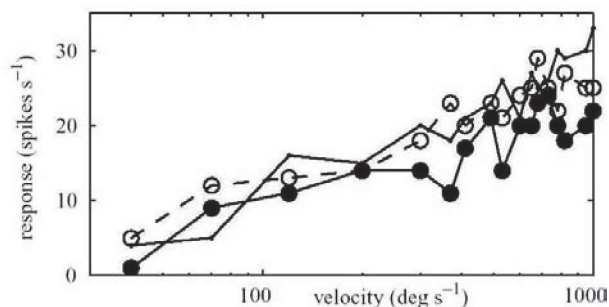


FIGURE 1.14 – Réponse monotone croissante avec la vitesse angulaire d'un neurone VT à un mouvement de translation « de l'avant vers l'arrière » dans une gamme de $[40^{\circ} \cdot s^{-1}, 1000^{\circ} \cdot s^{-1}]$. Cette réponse se révèle indépendante de la périodicité angulaire des motifs de stimulation (mires dont la périodicité spatiale variait de 11° à 76°). (D'après [Ibbotson, 2001]).

teurs de flux optique) et ce, indépendamment de la fréquence spatiale de stimulation. Cette dernière propriété les différencie nettement des neurones optomoteurs.

III.C.2 Les neurones optomoteurs pour le flux optique de rotation

Les neurones optomoteurs répondent à des mouvements de *rotation* stimulant une grande partie du champ visuel et seraient impliqués dans la stabilisation en *attitude* du vol de l'insecte. Ils ont pu être mis en évidence chez la mouche [Hausen, 1984], mais aussi chez l'abeille [Ibbotson and Goodman, 1990, Ibbotson, 1991]. Contrairement aux neurones détecteurs de mouvement à large champ, les neurones optomoteurs ont la particularité de répondre, en fonction de la fréquence temporelle des fronts de contraste constituant le stimulus optique. Cette fréquence temporelle se définit comme le quotient entre la vitesse angulaire et la période angulaire du motif. Ces neurones sont dits *optomoteurs* car il a été montré que leur réponse concordait avec la réaction comportementale observée chez l'insecte ailé (voir sous-partie IV.A), aussi bien chez l'abeille [Kunze, 1961] que chez la mouche [Götz, 1964, Reichardt, 1969, Buchner, 1984].

IV Lien entre comportement et neurophysiologie chez les insectes ailés

Les recherches de ces 50 dernières années ont permis de découvrir comment les insectes ailés extraient les informations visuelles de la structuration de leur environnement et comment ils les utilisent pour stabiliser et guider leur vol sur la base de la vision du flux optique. Nous avons vu que le système visuel de l'insecte est pourvu de neurones

dans ses ganglions optiques qui répondent à un mouvement dans une direction particulière ou *préférée* et ne répondent pas ou s'inhibent pour une direction *opposée*. Les neurones optomoteurs répondent à des *mouvements de rotation* impliquant un *flux optique de rotation* et les neurones VT, par exemple, à des *mouvements de translation* d'avant en arrière impliquant un *flux optique de translation*. La présence de ces neurones dans le système visuel de l'animal montre qu'il existe des comportements pour lesquels ces neurones s'activent. Dans cette partie, nous présentons une partie des découvertes éthologiques faites chez l'insecte ailé ; découvertes qui constituent une étape fondamentale dans la modélisation d'un pilote automatique et la conception d'un robot bio-inspiré utilisant la vision du mouvement comme indice visuel.

IV.A Stabilisation du vol : la réaction optomotrice

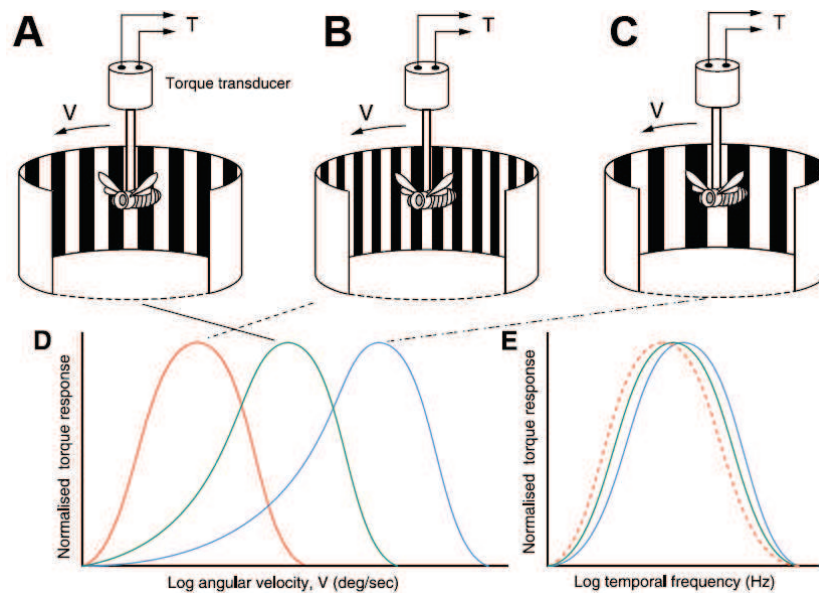


FIGURE 1.15 – Propriétés de la réponse optomotrice chez l'insecte. Dans cette expérience, un insecte ailé en vol au point fixe est placé au centre d'un tambour motorisé tapissé de bandes contrastées. (A-C) À la mise en rotation du tambour, l'insecte génère un couple de lacet dans la direction de rotation du tambour comme pour stabiliser son environnement visuel. Ce comportement résulte de la réponse *optomotrice* de l'insecte. L'intensité de la réponse varie en une courbe en forme de cloche, avec un pic d'intensité pour une vitesse de défilement des motifs qui va dépendre de la période angulaire des motifs (D). En traçant les mêmes courbes de réponse (D), cette fois en fonction de la fréquence temporelle des motifs, montre qu'elles se superposent. La réponse *optomotrice*, conséquence de la réponse des neurones *optomoteurs*, ne dépend que de la fréquence temporelle des contrastes. (D'après [Srinivasan, 2011a]).

Les insectes doivent être capables de compenser les différentes perturbations qui les éloignent de leur but à atteindre. Lors d'un vol en ligne droite, une bourrasque de

vent peut, par exemple, entraîner une *rotation en lacet* vers la gauche et générer un défilement de l'image vers la droite dans son champ visuel, i.e., un décalage du foyer d'expansion de l'image vers la droite. L'insecte compense cette perturbation en générant un couple antagoniste de lacet vers la droite lui permettant de conserver son cap et reprendre sa route. La réponse *optomotrice* en lacet (figure 1.15), responsable de ce comportement, agit comme un stabilisateur d'*attitude* (en lacet) du vol de l'insecte en compensant toutes rotations (en lacet) intempestives qui viendraient générer un flux optique de rotation afin de ne privilégier que des mouvements de translation, et donc du flux optique de translation qui, comme on l'a vu précédemment, est le seul apte à renseigner sur la proximité des obstacles dans l'environnement en fonction de la vitesse de l'agent (équation 1.3).

Une manière de tester ce comportement est de placer un insecte en vol au point fixe dans un tambour dont la paroi est tapissée de contrastes (figure 1.15A-C). Lorsque le tambour tourne dans une direction, l'insecte aura tendance à tourner dans la direction de rotation du tambour [Reichardt, 1969] comme pour stabiliser son environnement visuel. Si le tambour tourne dans le sens des aiguilles d'une montre, l'insecte va générer un couple de lacet dans la même direction de rotation du tambour, et vice-versa. En faisant varier la fréquence spatiale des contrastes, on s'aperçoit que la réponse de l'insecte suit une courbe de type gaussienne avec un pic correspondant à une vitesse angulaire de défilement des motifs particulière (figure 1.15D). Plus la résolution spatiale des motifs est faible, plus le pic de la réponse correspond à une vitesse angulaire de défilement élevée (figure 1.15D). Un tracé dans une échelle logarithmique de ces mêmes courbes en fonction de la fréquence temporelle des stimuli visuels (défini comme le quotient entre la vitesse angulaire de défilement et la période angulaire des motifs) montre qu'elles se superposent toutes pour une fréquence temporelle particulière (figure 1.15E). Ce résultat montre que la réponse optomotrice dépend de la *fréquence temporelle des contrastes*. Plusieurs équipes de chercheurs qui ont étudiées la réponse optomotrice en lacet que ce soit chez l'abeille [Kunze, 1961, Kaiser and Liske, 1974] ou encore chez la mouche [Götz, 1964, Reichardt, 1969, Buchner, 1984] ont montré cette dépendance avec la fréquence temporelle du stimulus visuel atteignant un pic maximal pour une fréquence de 8 Hz à 10 Hz [Kunze, 1961]. Les travaux d'Ibbotson and Goodman [1990] ont permis d'identifier clairement les neurones responsables de ce comportement, à savoir les neurones optomoteurs. Ces études ont montré que ces neurones répondent, de façon identique au comportement, avec un pic de sensibilité à 10 Hz [Ibbotson and Goodman, 1990, Ibbotson, 1991].

Cependant, toutes rotations intempestives selon les trois axes (tangage, roulis et lacet) sont susceptibles de perturber le vol de l'insecte. Aucune ne relate encore d'une

réponse optomotrice en tangage et en roulis chez l'abeille, mais il est à noter qu'un comportement similaire a pu être observé chez la mouche [Srinivasan, 1977].

Ce comportement de stabilisation du cap s'avère essentiel dans la navigation afin de supprimer toute composante de *rotation* du flux optique qui viendrait « polluer » le flux optique de translation, qui constitue « l'information utile » de navigation. Ainsi, lors d'une mise en œuvre robotique, il convient d'éliminer toute perturbation en rotation (tangage, roulis, lacet) du véhicule afin de ne privilégier que du flux optique de *translation*.

IV.B Pilotage dans le plan vertical

IV.B.1 Pilotage par le flux optique

Chez l'abeille, un comportement d'atterrissage à angle constant (figure 1.19B) a été observé à maintes reprises par des chercheurs de l'Université de Canberra [Zhang et al., 1990, Srinivasan et al., 1996, 2000]. Ces chercheurs ont noté que l'abeille effectue cette manœuvre d'atterrissage en maintenant sa vitesse d'avance V_f proportionnellement à sa hauteur sol h et donc en maintenant le ratio $\frac{V_f}{h}$ à un niveau constant (figure 1.19C-D). Ce ratio n'est autre que le flux optique ventral maintenu à une valeur constante [Srinivasan et al., 1996] (figure 1.19). Sur ces faits, Srinivasan et al. [2000] ont alors proposé une modélisation de cette stratégie d'atterrissage chez l'abeille à travers deux points dans lequel, selon eux, l'abeille maintient :

- un angle d'atterrissage constant sans pour autant préciser comment cet angle serait mesuré.
- un flux optique ventral constant sans non plus préciser comment ce flux optique serait mesuré par l'animal.

Un bras robotisé dénué de dynamique [Srinivasan et al., 2000] et un avion miniature [Green et al., 2004] ont tenté de reproduire ces atterrissage, mais les résultats se sont montrés peu probant, la réponse en boucle fermée avec le flux optique était sensiblement la même qu'en boucle ouverte, c'est à dire sans utiliser le flux optique.

Les travaux menés dans notre laboratoire ont permis d'apporter un éclairage à ce comportement, à travers l'exploration d'une hypothèse de *régulation du flux optique ventral* agissant sur la force de sustentation de l'insecte, lui permettant ainsi, pour une vitesse d'avance donnée, de contrôler sa hauteur sol en fonction d'une vitesse de défilement *préférée* du sol dans son plan rétinien [Franceschini et al., 2007]. Cette stratégie de régulation du flux optique ventral a alors été adaptée dans l'élaboration

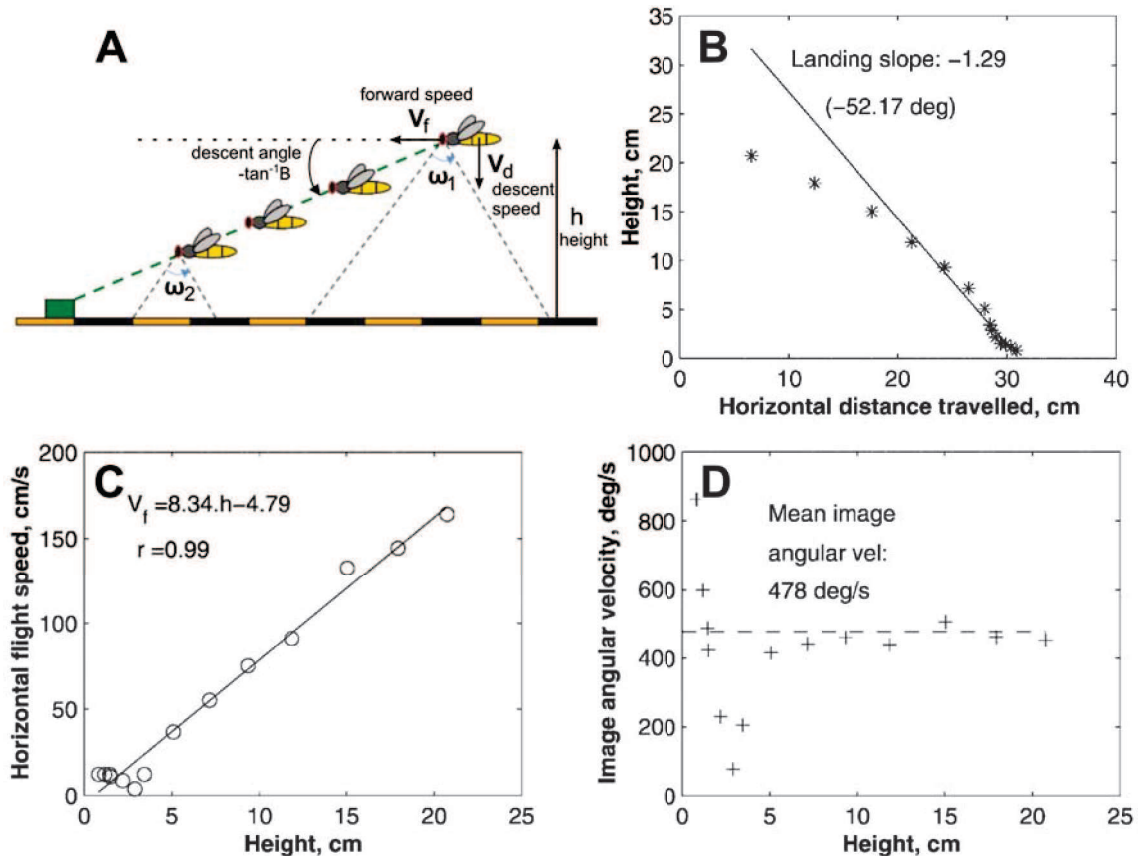


FIGURE 1.16 – (A) Paramètres physiques intervenant dans le modèle de la stratégie d’atterrissage de l’abeille : la hauteur de vol (h), la vitesse d’avance et de descente (V_f et V_d), l’angle de descente $-\tan^{-1} B$ et enfin le flux optique ventral ($\omega_{1,2}$). (B) Profil d’atterrissage à angle constant de l’abeille, ici $-\tan^{-1} B = -52$ $^{\circ}.s^{-1}$. (C) Courbe de la vitesse d’avance en fonction de la hauteur, la pente correspond au flux optique ventral. (D) Flux optique ventral déterminé à partir des paramètres de vol, nous pouvons voir qu’au-delà d’une hauteur de 5 cm , le flux optique ventral est maintenu à une valeur constante de 478 $^{\circ}.s^{-1}$. (D’après [Srinivasan et al., 2000, Srinivasan, 2011a]).

d’un système de contrôle de l’altitude et mis en œuvre sur un robot aérien captif : *OCTAVE* (*Optic flow Control sysTem for Aerial VEhicles*) [Ruffier and Franceschini, 2003, 2004, Ruffier, 2004b, Ruffier and Franceschini, 2005, 2008] (figure 1.17C). Ce micro-aéronef était alors capable d’opérer automatiquement des manœuvres de décollage, de suivi de terrain, de réaction au vent et d’atterrissage à angle constant, comme observé chez l’abeille, sur la simple régulation du flux optique ventral (fournie par un capteur de flux optique [Ruffier et al., 2003]) sans avoir à connaître ni sa vitesse ni sa hauteur sol. Le retour sur la biologie de ces observations est intéressant d’autant que cette hypothèse de la régulation du flux optique formulée par l’équipe de Franceschini apparaît plus claire et plus explicite que celle formulée par Srinivasan

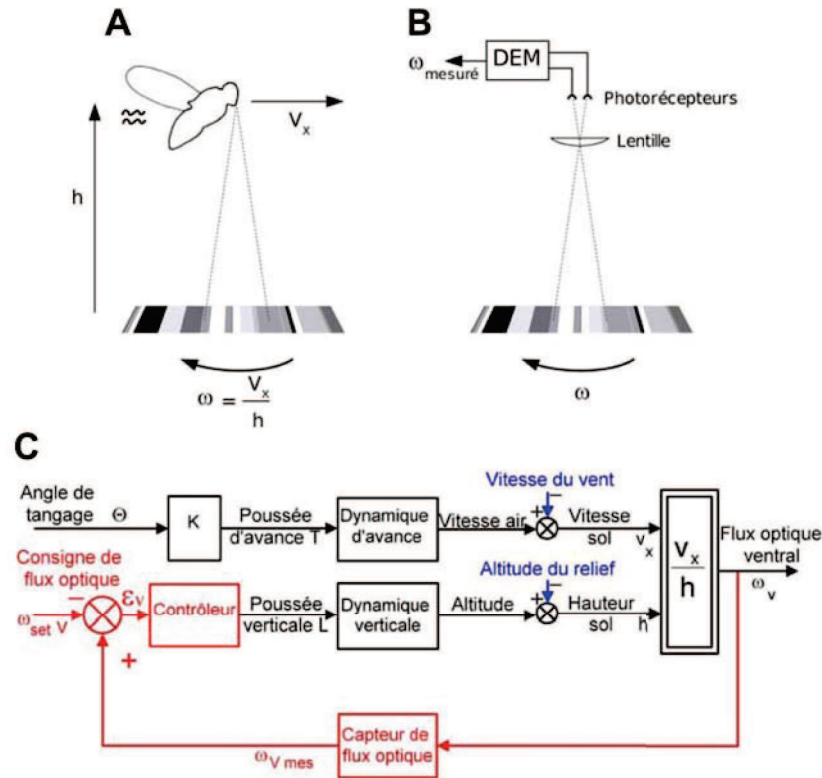


FIGURE 1.17 – (A) Le flux optique ventral perçu par l’insecte ailé est la vitesse angulaire de défilement des éléments contrastés situés dans la zone ventrale de son champ visuel. (B) Le capteur utilisé est un DEM qui génère un signal ω_{mesur} servant dans la boucle de rétroaction *OCTAVE*. Ce capteur est constituée d’une lentille et de deux photorécepteurs dirigés à l’aplomb du robot. (C) Schéma de contrôle explicite *OCTAVE* qui consiste en un régulateur du flux optique ventral contrôlant la force de sustentation verticale. (D’après [Ruffier, 2004b, Franceschini et al., 2007]).

et al. [2000] puisqu’elle repose sur la mesure d’un capteur de flux optique (DEM) (figure 1.17A-B) et d’une covariance des forces de sustentation et de poussée, tout deux présent chez l’insecte ailé [Franceschini et al., 2007]. Dès 1950, Kennedy a évoqué que les insectes volants ont une *vitesse de défilement rétinienne du sol préférée* leur permettant de contrôler de manière appropriée leur hauteur sol en fonction d’un vent de face ou de dos (moustique : [Kennedy, 1939], criquet : [Kennedy, 1951]). Cette théorie est entièrement reprise par la *régulation d’un flux optique ventral*, i.e., le ratio « vitesse/hauteur sol », à une valeur *préférée*. Cette dernière fut observée également chez d’autres insectes comme la drosophile [David, 1982], le papillon [Kuenen and Baker, 1982], l’abeille [Baird et al., 2006, Barron and Srinivasan, 2006, Portelli et al., 2010a] mais a permis de relier des comportements visuo-moteurs chez bien d’autres insectes encore (mites, criquets, bousiers, moustiques), des comportements qui restaient inexplicables sans cette hypothèse [Franceschini et al., 2007].

Le principe de la régulation du flux optique que nous venons de traiter dans cette

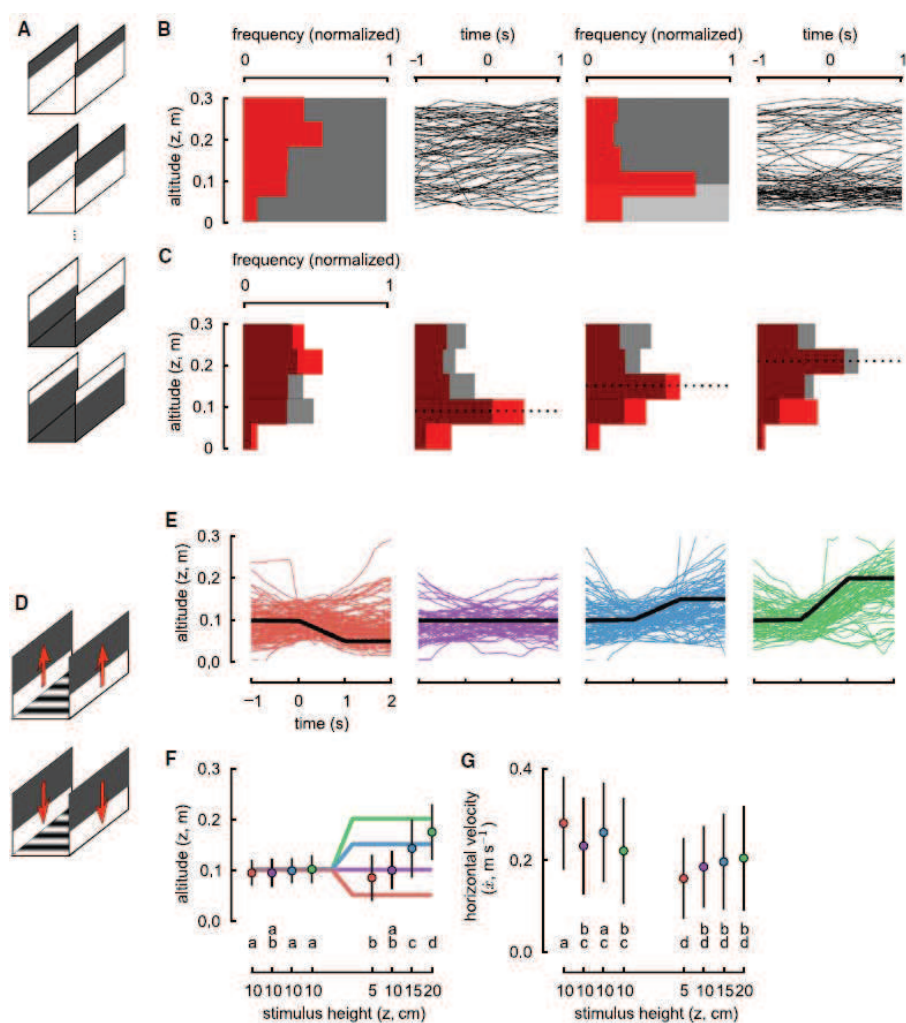


FIGURE 1.18 – (A, D) Représentation schématique d’une transition de contraste « blanc-noir » ou « noir-blanc » formant une ligne horizontale disposée latéralement sur les murs du tunnel. (B, E, F) Les drosophiles modifient leur altitude de manière à suivre cette ligne horizontale ainsi formée. (D’après [Straw et al., 2010]).

sous-partie est un véritable pilier dans la navigation autonome en environnement inconnu et permet d’expliquer comment, sans aucun capteur de distance ni tachymètre, un insecte ailé procède pour décoller d’une fleur, suivre un terrain, réagir face au vent ou encore atterrir vers une autre source de nectar. Ce principe fixe les bases de travail du pilote automatique LORA qui sera mis en œuvre sur un robot et que nous présenterons plus tard dans cette thèse. Enfin, la régulation du flux optique n’est probablement pas le seul mécanisme sensori-moteur qui intervient dans le pilotage dans le plan vertical, les lignes semblent y être aussi pour quelque chose.

IV.B.2 Pilotage par le suivi de lignes

Des travaux plus récents [Straw et al., 2010] montrent que, chez la mouche *Drosophila*, le régulateur de flux optique ventral pourrait coexister avec d'autres réflexes de stabilisation du vol dont le mécanisme d'*edge tracking* qualifié par ces auteurs. Ainsi, ces chercheurs montrent qu'une mouche, qui voyage dans un tunnel comportant une ligne d'horizon projetée sur les murs latéraux d'un tunnel, au moyen d'un système de vidéo-projection, suivrait les variations en hauteur de cette ligne d'horizon, en dépit des variations du flux optique ventral induites par cette variation d'altitude [Straw et al., 2010] (figure 1.18). Cette observation tend à remettre en cause, selon ces chercheurs, l'hypothèse de la régulation du flux optique ventral formulée dans notre laboratoire [Ruffier and Franceschini, 2005, Franceschini et al., 2007]. Selon ces expérimentations, le flux optique d'expansion ventral interviendrait également dans la contrôle de la hauteur chez la drosophile [Straw et al., 2010]. Cependant, les auteurs ne parviennent pas à mettre totalement en compétition le mécanisme d'« edge tracking » et l'hypothèse de la régulation du flux optique ventral, et n'excluent pas l'existence de ce dernier mais appuient plutôt une coexistence relative avec d'autres mécanismes visuo-moteurs [Straw et al., 2010].

Cette dernière trouvaille est tout de même intéressante et d'autres travaux ont déjà mis en évidence ce comportement de suivi de ligne chez la drosophile Horn and Wehner [1975] mais aussi chez d'autres insectes comme le scarabée Collett et al. [1993] et l'abeille [Riley et al., 2005]. Cette hypothèse ne nous sera pas utile dans mise en œuvre robotique mais son étude nous montre que de nombreux mécanismes sensori-moteurs, dont la régulation du flux optique, semblent régir le vol de l'insecte ailé.

IV.C Pilotage dans le plan horizontal

IV.C.1 La réaction de centrage

Sur la simple observation que les abeilles volent centrées à travers une ouverture (de type fenêtre par exemple), des chercheurs de l'Université de Canberra, en Australie, ont entraîné des abeilles à naviguer dans un tunnel étroit (largeur 12 *cm*) afin de mettre en évidence ce même comportement. Ces chercheurs ont observé que les abeilles, en vol libre, se centrent dans un tunnel étroit stationnaire et ce, indépendamment de la fréquence spatiale des motifs (figure 1.19A-B) [Kirchner and Srinivasan, 1989, Srinivasan et al., 1991]. Ces expérimentations étendues à un tunnel non-stationnaire où l'une des parois était mis en mouvement soit dans le sens d'avance, soit le sens contraire d'avance de l'abeille ont révélé des résultats encore

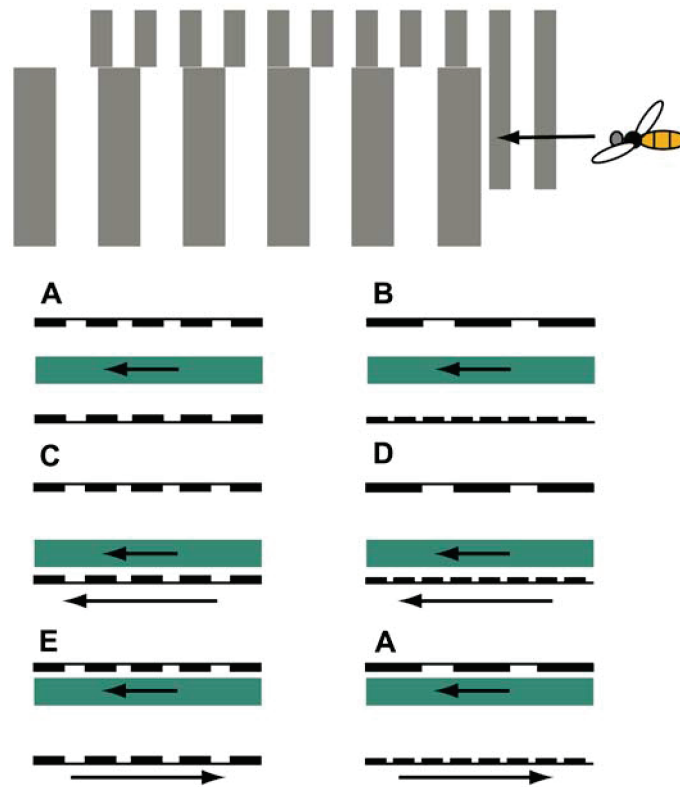


FIGURE 1.19 – Illustration résumant les observations comportementales faites sur la navigation de l'abeille dans un tunnel étroit. Ces observations ont amené les chercheurs à formuler l'hypothèse d'*équilibre des flux optiques latéraux* intervenant dans la navigation chez l'abeille. Ceci afin d'expliquer le comportement de *centrage* dans un tunnel étroit (A-D), et de *décentrage* dans un tunnel non-stationnaire (B-C, E-F) et ce, indépendamment de la fréquence spatiale des motifs. Les flèches représentent la trajectoire moyenne de l'abeille et les zones vertes représentent l'écart-type, toutes deux calculées sur un jeu de plusieurs centaines de trajectoires. (D'après [Srinivasan, 2011a]).

plus surprenants. La mise en mouvement d'une des parois vient modifier la vitesse apparente de défilement des motifs du tunnel perçue par l'abeille. Ils ont alors observé que, suivant le sens de défilement du mur, les abeilles se décentrent, soit en se rapprochant, soit en s'éloignant du mur en mouvement (figure 1.19 C-F) [Kirchner and Srinivasan, 1989, Srinivasan et al., 1991]. Ils ont également entraîné des abeilles à naviguer dans un tunnel étroit dont l'un des murs était recouvert d'un gris homogène et ont observé ce même comportement de décentrage vers le mur uniforme, sans que les abeilles n'entrent en collision avec ce dernier [Kirchner and Srinivasan, 1989, Srinivasan et al., 1991].

Ces observations ont alors amené les chercheurs à élaborer l'*hypothèse d'équilibre des flux optiques latéraux* visant à expliquer ces comportements observés. Selon ces chercheurs, l'abeille chercherait à équilibrer la vitesse angulaire de défilement des

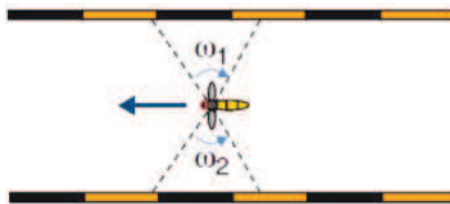


FIGURE 1.20 – Illustration sur l’hypothèse d’équilibre des flux optiques latéraux ($\omega_1 = \omega_2$) visant à expliquer la réaction de centrage chez l’abeille. (D’après [Srinivasan, 2011a]).

zones latérales de son œil composé ($\omega_{1,2}$, figure 1.20), expliquant selon eux la réaction de centrage dans un tunnel étroit stationnaire et de décentrage dans un tunnel étroit non-stationnaire ou présentant un mur uniformément contrasté.

Cette réaction de centrage constitue un mécanisme visuo-moteur à distinguer de celui de la réponse optomotrice. Effectivement, des recherches plus récentes ont pu montrer que la navigation de l’abeille sur le plan horizontal se révèle finalement indépendante de la fréquence temporelle des motifs [Srinivasan et al., 1993] dont on sait que cette dépendance constitue une caractéristique des neurones optomoteurs (sections III.C.2&IV.A).

IV.C.2 Le contrôle de vitesse

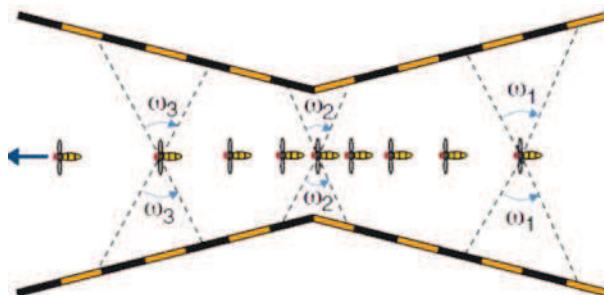


FIGURE 1.21 – Contrôle de vitesse observé chez l’abeille dans un tunnel fuselé. L’abeille adapte sa vitesse proportionnellement à la largeur locale du tunnel, ce qui amena les chercheurs à penser qu’elle conserve une vitesse de défilement constante de l’image dans son champ visuel [Srinivasan et al., 1996]. (D’après [Srinivasan, 2011a]).

Des études portées sur le contrôle de la vitesse chez l’abeille ont pu montrer qu’elle adapte sa vitesse en fonction de l’encombrement de son environnement. Lors d’expérimentations menées dans un tunnel de largeur constante, l’abeille conserve une vitesse constante [Srinivasan et al., 1996] alors que dans un tunnel fuselé où les murs latéraux convergent puis divergent, l’abeille décélère dans la partie convergente et accélère dans la partie divergente [Srinivasan et al., 1996] (figure 1.21). Ces observations montrent

que l'abeille adapte sa vitesse en fonction de la largeur locale du tunnel et ont amené ces chercheurs à penser que l'abeille conserve la vitesse angulaire de défilement, perçue par ses deux yeux composés, constante ($\omega_1 = \omega_2 = \omega_3$, figure 1.21) [Srinivasan et al., 1996].

Plus récemment Baird et al. [2005] ont entraîné des abeilles à naviguer dans un tunnel non-stationnaire dont les deux parois latérales étaient motorisées. Les résultats ont pu montrer que les abeilles adaptent leur vitesse en maintenant une vitesse angulaire de défilement des murs perçue par les régions latérales de ses yeux à un niveau constant [Baird et al., 2005].

Cependant, d'autres expérimentations montrent que le contrôle de la vitesse chez l'abeille est mis en œuvre de manière plus complexe qu'une simple régulation bilatérale. En effet, il dépendrait également du flux optique perçu dans la région ventrale de ses yeux [Baird et al., 2006, Barron and Srinivasan, 2006].

IV.C.3 Le suivi de paroi

Un nouveau protocole expérimental, mis en place dans notre laboratoire et visant à tester les limites de l'hypothèse d'équilibrage de régulation des flux optiques latéraux, a permis de découvrir un comportement supplémentaire chez l'abeille. En effet, les expériences de Kirchner et Srinivasan [Kirchner and Srinivasan, 1989] ont mis en évidence la réaction de centrage chez l'abeille dans un tunnel étroit [Kirchner and Srinivasan, 1989, Srinivasan et al., 1991]. Ce nouveau protocole expérimental [Serres et al., 2008b] consistait cette fois à entraîner les abeilles dans un tunnel d'une largeur environ cinq à dix fois plus grande que celui de l'équipe australienne. Les résultats ont révélé que, dans un tunnel large, les abeilles peuvent tout aussi bien adopter un comportement de *centrage* (figure 1.22A) qu'un comportement de *suivi de paroi* (figure 1.22B-D) [Serres et al., 2008b]. Les abeilles suivent la paroi dont l'entrée du tunnel et la récompense sont placées près du même mur et ce, même en l'absence d'un pan du mur (figure 1.22D) [Serres et al., 2008b].

Cette nouvelle observation remet directement en cause l'hypothèse formulée par l'équipe de recherche australienne [Kirchner and Srinivasan, 1989, Srinivasan et al., 1991] qui ne permet pas d'expliquer ce nouveau comportement observé. En effet, dans le cas du tunnel large comportant une ouverture, cette hypothèse aurait prédit une déviation de la trajectoire de l'abeille vers l'ouverture, ce qu'elle ne fait pas. Cette observation montre bien qu'un mécanisme sensorimoteur autre que l'équilibrage des flux optiques latéraux intervient dans le système nerveux de l'abeille.

Une autre hypothèse a alors été formulée en lieu et place de cette dernière : la *régu-*

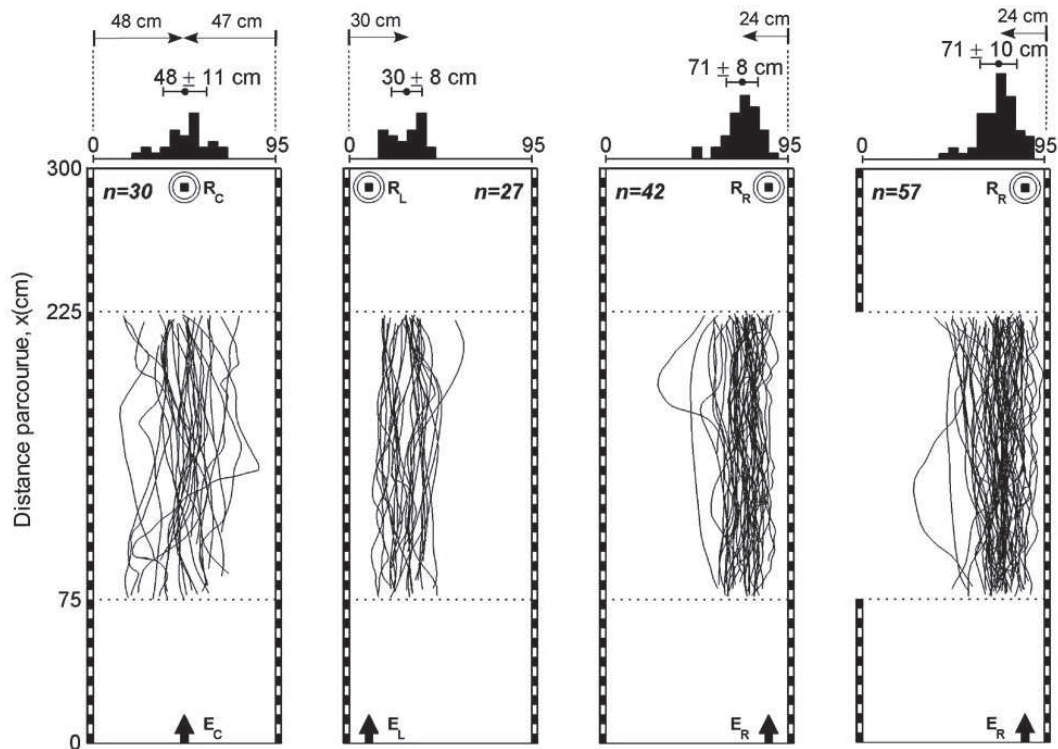


FIGURE 1.22 – Trajectoires d’abeilles correspondant à quatre conditions expérimentales différentes dans un tunnel d’une largeur de 95 cm. (A) L’entrée et la récompense sont centrées. (B-C) L’entrée et la récompense sont du côté du même mur. (D) L’entrée et la récompense sont du côté du mur droit, une partie du mur gauche est retirée rendant le flux optique venant de cette direction négligeable par rapport à celui du mur droit. Les histogrammes représente la distribution des ordonnées moyennes évaluées pour chaque abeille, l’ordonnée moyenne et l’écart-type associé sont indiqués ainsi que le nombre n de trajectoires. Les résultats mettent en avant le comportement de centrage (A) mis en évidence par Kirchner et Srinivasan [Kirchner and Srinivasan, 1989] vingt ans auparavant, mais montrent également que l’abeille *ne se centre pas systématiquement dans un tunnel large* et peut également adopter un comportement de *suiivi de paroi* (B-C) même en l’absence momentanée d’une paroi (D). (D’après [Serres et al., 2008b]).

lotion du flux optique dans le plan horizontal [Serres et al., 2008a,b].

Les observations menées par Serres et al. [2008b] sur l’abeille ont ainsi amené ces chercheurs à élaborer le pilote automatique LORA III (*Lateral Optic flow Regulation Autopilot, mark III*) (figure 1.23) consistant en un *double régulateur de flux optique latéral* [Serres et al., 2008a] dans lequel chacun possède sa propre consigne de flux optique (ou flux optique « préféré », ω_{setFwd} et $\omega_{setSide}$) et chacun contrôle un degré de liberté en agissant de manière complémentaire :

- le premier régulateur de flux optique (figure 1.23, boucle bleue) contrôle la *poussée arrière* de l’abeille (déterminant sa vitesse d’avance V_x) afin de réguler

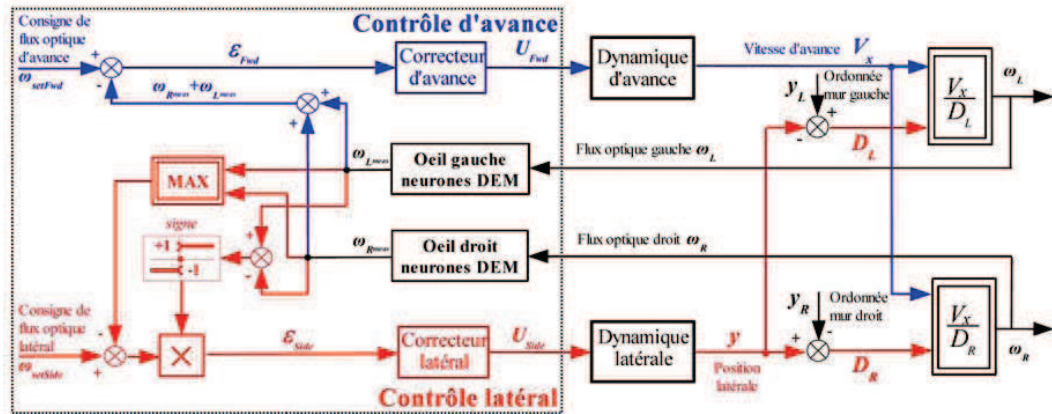


FIGURE 1.23 – Schéma blocs de la boucle visuo-motrice LORA III du contrôle conjoint de la vitesse d'avance V_x et de la position latérale y de l'abeille sur la base d'un double régulateur de flux optique latéral. (D'après [Serres, 2008]).

la somme des flux optiques latéraux à une consigne de flux optique *bilatérale* ω_{setFwd} .

- le second régulateur de flux optique (figure 1.23, boucle rouge) contrôle la *poussée latérale* de l'abeille (déterminant sa vitesse latérale et donc sa position latérale y) de manière à conserver la distance latérale à la paroi suivie (droite ou gauche) proportionnelle à la vitesse d'avance V_x . Le régulateur maintient le *maximum* des flux optiques latéraux perçus, à une consigne de flux optique *unilatérale* $\omega_{setSide}$.

Une remarquable propriété de ce pilote automatique est qu'il ne nécessite aucune connaissance *a priori* de l'environnement ainsi qu'aucune mesure ou estimation ni de la vitesse, ni de la position par rapport aux obstacles. L'abeille n'aurait donc besoin ni d'un régulateur de vitesse ni d'un régulateur de distance mais d'un régulateur de flux optique qui lui permet de piloter le ratio « vitesse/distance », à une valeur préférée dans certaines zones du champ visuel. On sait par ailleurs que certaines études prouvent que les abeilles adoptent un comportement de manière à conserver un flux optique préféré dans certaines régions de leur œil [Srinivasan et al., 2000, Baird et al., 2006, Barron and Srinivasan, 2006, Franceschini et al., 2007]. Le seul capteur exigé est un capteur de flux optique dont on sait qu'il existe chez l'abeille (neurones VT, voir partie III.C.1).

Ce principe du double régulateur de flux optique a été testé sur un agent simulé totalement actionné [Serres et al., 2008a] et a permis de reproduire des comportements de navigation similaires à ceux observés chez l'abeille. Le choix d'une plateforme totalement actionnée permet de se rapprocher au mieux du mode de déplacement d'une

abeille qui possède, elle aussi, une dynamique d'avance [Esch et al., 1975] et latérale [Ellington, 1984] découplée. De cette manière, l'approche bio-inspirée prend encore plus d'importance dans le projet si à la fois la cible robotique et le principe de navigation sont biomimétiques.

Cette partie clos maintenant l'étude du modèle neurophysiologique et comportemental de l'abeille pour la navigation. Nous avons vu, tout au long de cette introduction, que les insectes ailés utilisent plusieurs mécanismes sensori-moteurs, dont la régulation du flux optique, pour naviguer dans leur environnement. Ils stabilisent aussi leur vol par un moyen visuel (réaction optomotrice) mais aussi par un moyen non-visuel (les balanciers chez les diptères), ce dernier étant équivalent au gyromètre trois axes de l'avionique classique. Leur système nerveux minimaliste traite le flux optique par des neurones détecteurs élémentaires de mouvement qui permettent de générer des comportements tels que la réaction optomotrice pour la stabilisation du vol ou encore la réaction de centrage et de suivi de paroi pour l'évitement d'obstacles latéraux par exemple. Nous avons vu que l'hypothèse de la régulation du flux optique est à même d'expliquer bon nombre de ces comportements observés depuis ces dernières décennies chez l'insecte ailé. Ce principe repose sur la régulation directe du flux optique sans nécessiter aucun autre capteur qu'un simple capteur de flux optique, ce dernier formant le thème de la partie suivante de cette introduction.

V Capteurs de flux optique bio-inspirés

La conception d'un robot bio-inspiré dont le principe de navigation repose sur la perception du mouvement (flux optique) nécessite la mise en œuvre de capteurs de flux optique. De nombreuses équipes à travers le monde ont utilisé le flux optique comme indice visuel dans le guidage de robots ou de micro-robots aériens ou terrestres (e.g., [Franceschini et al., 1992, Weber et al., 1997, Barrows and Neely, 2000, Ruffier and Franceschini, 2005, Beyeler et al., 2009]). Contrairement à l'imagerie classique basé sur des techniques de traitement d'images (e.g., reconnaissance de formes) qui peuvent être lourdes en termes de calculs (un imageur haute résolution CCD ou CMOS génère un flux vidéo de plusieurs mégabits par seconde) pour estimer une quelconque grandeur physique (figure 1.24). Des progrès ont pourtant été atteints dans l'estimation du flux optique à partir d'un système visuel basé sur une caméra montée sur un système catadioptrique pour obtenir un grand champ visuel. Un récent travail [Bazin et al., 2010] s'appuie sur l'extraction de lignes dans un environnement de type urbain (ou maîtrisé par l'Homme) pour estimer le flux optique de rotation

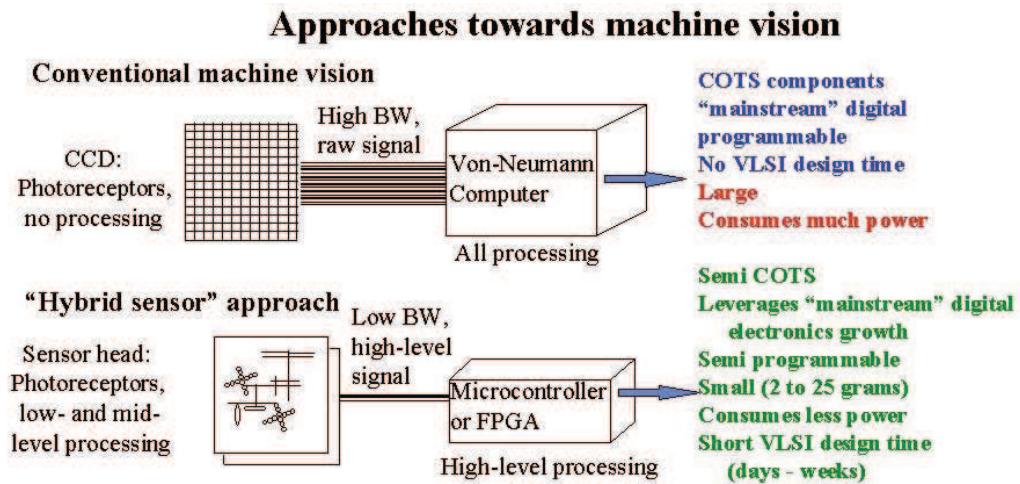


FIGURE 1.24 – Comparatif entre l’approche classique de la vision par ordinateur et de celle basée sur un capteur dédié utilisant une unité de calcul à faible ressources calculatoires (e.g., microcontrôleur, FPGA). (Modifié de [Barrows and Neely, 2000]).

et de translation issu du mouvement d’une caméra (ou d’un robot qui embarque ce système). Cette technique d’estimation du flux optique pourrait fonctionner en temps réel sur un ordinateur traitant un flux vidéo d’une résolution de 1024×768 *pixels* à 30 *fps*, mais cette technique nécessite la présence d’un environnement constitué de lignes et pourrait être moins adapté à un environnement naturel comportant des formes plus aléatoires.

Enfin, grâce à notre approche minimaliste bio-inspirée, le flux optique est une grandeur qui nécessite peu de ressources calculatoires pour la mesurer. Une approche que nous abordons tout au long de ce travail de thèse est celle basée sur l’utilisation de capteurs de flux optique dédiés (figure 1.24) qui présente de nombreux avantages pour notre domaine d’application dans la navigation de micro-robots. D’abord, ce type de capteur ne mesure que le flux optique dans un champ visuel restreint nécessaire à l’exécution d’une tâche donnée (ce qui limite les calculs) et deuxièmement, la conception de tels capteurs peut utiliser des technologies analogiques et numériques dont une matrice de photodiodes qui peut être de très faible résolution (seulement quelques pixels), contrairement à un imageur traditionnel CCD ou CMOS, ce qui permet de concevoir une solution compacte en taille et légère en termes de calculs. Nous ferons dans cette partie un inventaire des capteurs de flux optique utilisés actuellement dans le guidage des robots, notamment les capteurs de flux optique basés sur le principe du « temps de passage », les capteurs basés sur les technologies *VLSI* (*Very Large Scale Integration*) ou encore les capteurs de souris optique. Nous ne décrirons pas toutes les techniques d’estimation du flux optique mais nous référons le lecteur vers des articles

de synthèse [Barron et al., 1994, Srinivasan, 1994] qui, à ce sujet, complètent l'étude abordée dans cette partie.

V.A Détecteur élémentaire de mouvement : le principe du « temps de passage »

Des études électrophysiologiques menées sur des neurones détecteurs de mouvement du système visuel de l'insecte, en l'occurrence la mouche, ont permis d'étudier le traitement neuronal en réponse à un stimulus visuel particulier, de manière à concevoir un capteur dont le fonctionnement reste au plus proche de ce qui est observé chez l'animal. Ainsi, des études électrophysiologiques précises [Riehle and Franceschini, 1984, Franceschini, 1985, Franceschini et al., 1989] portées sur un seul des 60 neurones à large champ situés dans la *lobula plate* de la mouche (voir partie III.C), le neurone H1, ont permis la conception, en technologie analogique, du premier capteur opto-électronique de flux optique ou DEM [Blanes, 1986]. Afin de parvenir à ce résultat, Franceschini [1985] ont enregistré, à l'aide de micro-électrodes, la réponse de ce neurone à des micro-stimulations optiques de deux photorécepteurs adjacents au sein d'une même ommatidie [Franceschini et al., 1989] (figure 1.25).

Dans une même ommatidie, les photorécepteurs de la mouche ont des axes optiques regardant dans des directions différentes [Kirschfeld and Franceschini, 1968]. Une stimulation lumineuse de deux photorécepteurs adjacents l'un après l'autre, fait « croire » au système visuel de la mouche à un « micro-mouvement apparent » dans le champ visuel de l'ommatidie considérée. Ces chercheurs ont alors pu observer la réponse du neurone H1 par une salve de potentiels d'action correspondant à un micro-mouvement apparent dans une direction préférée. Le neurone ne répondait pas pour une absence de stimulation ou s'inhibait pour un « micro-mouvement » dans une direction *opposée* à la direction préférée (figure 1.25A). Ces observations sont cruciales et montrent la spécificité de la réponse du neurone H1 à un mouvement dans une direction *préférée*. C'est ainsi grâce à ce type d'expériences et en jouant sur les paramètres comme la durée de stimulation [Franceschini, 1985, Franceschini et al., 1989] et l'intervalle de temps inter-stimuli (figure 1.25B) que l'équipe de Franceschini ont pu concevoir le premier modèle bio-inspiré du DEM [Blanes, 1986] constitué d'une seule paire de pixels et reposant sur le principe du « temps de passage » [Pichon et al., 1989]. Ce DEM relève d'avantage d'une mise en correspondance du bord d'un contraste sur les deux photorécepteurs du DEM ou de transitions lumineuses consécutives (*token*

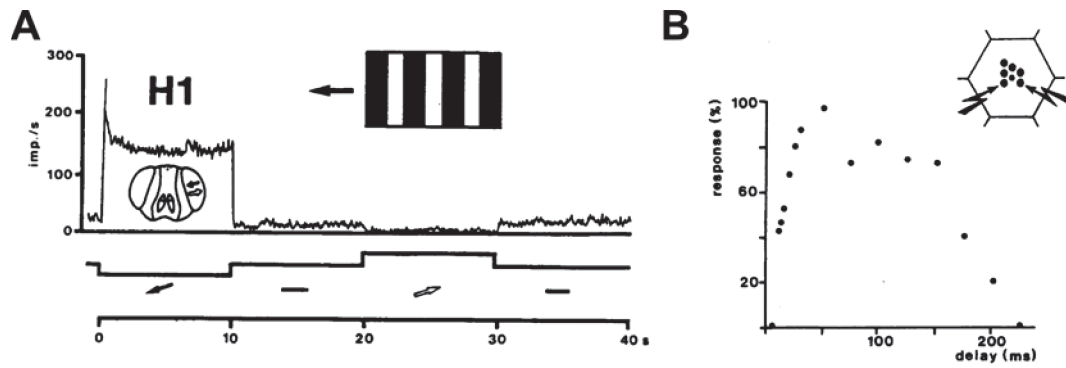


FIGURE 1.25 – (A) Caractéristiques de réponse d’un neurone H1 à un mouvement de translation d’un motif contrasté défilant à une vitesse angulaire de $47 \text{ }^\circ \cdot \text{s}^{-1}$ dans une direction préférée \leftarrow et non-préférée \rightarrow de défilement. On constate que le neurone répond par une salve de potentiels d’action dans le défilement des contrastes dans la direction préférée (ici, de l’arrière vers l’avant), puis par une chute de la réponse en stimulation stationnaire (symbole « - ») et enfin par une inhibition dans la direction non-préférée. (B) Variation de l’intervalle de temps inter-stimuli entre le photorécepteur R1 et le photorécepteur R6, on observe la caractéristique de réponse du neurone pour ces différentes stimulations. Une moyenne des neuf enregistrements portés sur neuf mouche différentes a permis d’obtenir cette caractéristique. (D’après [Riehle and Franceschini, 1984, Franceschini et al., 1989]).

matching [Ullman, 1981]).

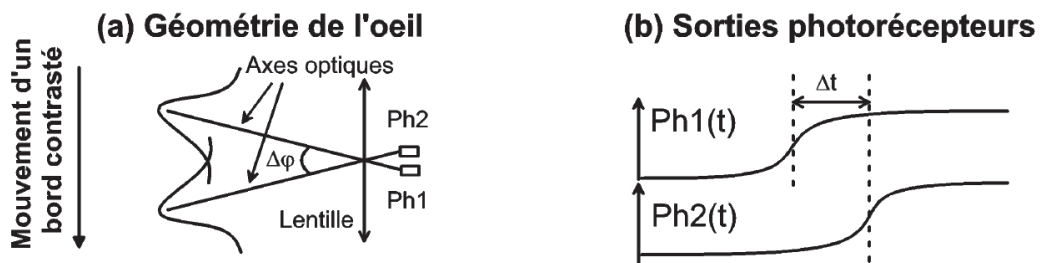


FIGURE 1.26 – (A) Le contraste croise la première photodiode Ph_1 puis la deuxième photodiode Ph_2 décalée spatialement d’un angle $\Delta\varphi$ (angle inter-photodiode). (B) La vitesse angulaire de déplacement ω d’un contraste de la photodiode Ph_1 vers Ph_2 transforme le décalage spatial $\Delta\varphi$ des deux photodiodes en un retard temporel Δt relatif au temps de passage du contraste de la photodiode Ph_1 vers Ph_2 . C’est ce retard Δt qui est mesuré pour estimer le flux optique ω équation 1.4). (Extrait de [Ruffier, 2004b]).

En effet, le schéma du DEM met ainsi en correspondance un même bord contrasté détecté par deux photodiodes voisines séparées d’un angle inter-photodiode $\Delta\varphi$ (figure 1.26). Le délai Δt résulte du parcours du bord contrasté pour se déplacer de $\Delta\varphi$ dans le champ visuel du capteur. La vitesse angulaire ω de ce bord contrasté (ou flux

optique) se détermine de la manière suivante :

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \quad (1.4)$$

Ainsi, de la même manière que le neurone H1 présent chez la mouche, le circuit DEM basé sur le « temps de passage » génère une impulsion proportionnelle au flux optique de stimulation dans le champ visuel du capteur. Ce dernier peut être sensible qu'à un sens préféré de déplacement du contraste et à un seul type de contraste (transition « blanc-noir » ou « noir-blanc »). Enfin, pour une description détaillée du schéma originel du DEM, nous renvoyons le lecteur vers la thèse de Franck Ruffier [2004b] qui en a fait une description complète.

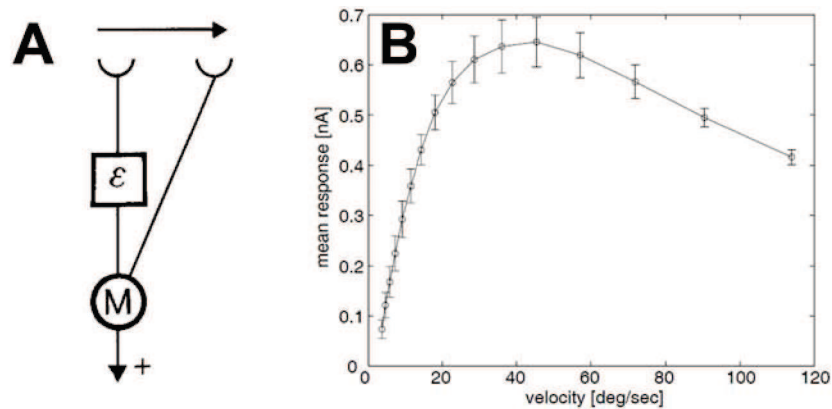


FIGURE 1.27 – (A) Structure élémentaire du corrélateur de Reichardt pour une détection du mouvement dans une direction préférée (flèche). (B) Réponse d'un DEM, basé sur le modèle de Reichardt, en fonction de la vitesse angulaire. La réponse du capteur n'est pas monotone, deux sorties identiques peuvent correspondre à deux vitesses angulaires différentes. (D'après [Reichardt, 1987, Harrison and Koch, 1999]).

Il existe cependant un autre modèle du détecteur élémentaire de mouvement : celui du corrélateur de Reichardt [Reichardt, 1957, 1969, 1987] (figure 1.27A). Le modèle du « temps de passage » se démarque remarquablement de celui du corrélateur de Reichardt [Reichardt, 1957, 1969, 1987] en se montrant insensible aux fréquences spatiales et à l'éclairement, contrairement à ce dernier. En effet, le modèle du corrélateur se révèle non seulement sensible à la vitesse d'un motif dans le champ visuel, mais aussi à son contraste, son éclairement, mais aussi à sa fréquence spatiale. La dépendance de ces paramètres donne lieu à des ambiguïtés (figure 1.27B) dans l'estimation du flux optique et ne rejoint pas les observations électrophysiologiques de la réponse monotone croissante des neurones VT identifiés chez l'abeille [Ibbotson, 2001]. En effet, ces derniers adoptent une réponse monotone croissante en fonction

d'un mouvement apparent de translation de l'avant vers l'arrière et ce, indépendamment de la fréquence spatiale (voir sous-partie III.C.1).

De récents travaux de recherche ont pourtant proposé une version améliorée du corrélateur de Reichardt conduisant à une insensibilité au contraste et aux fréquences spatiales des stimuli utilisés [Brinkworth et al., 2009]. Mais des expériences électrophysiologiques menées chez la mouche [Eichner et al., 2011] montrent que le DEM élaboré par Franceschini et ses collaborateurs pourrait être plus plausible face à celui du corrélateur [Eichner et al., 2011].

V.B Évolution des capteurs de flux optique basé sur le « temps de passage »

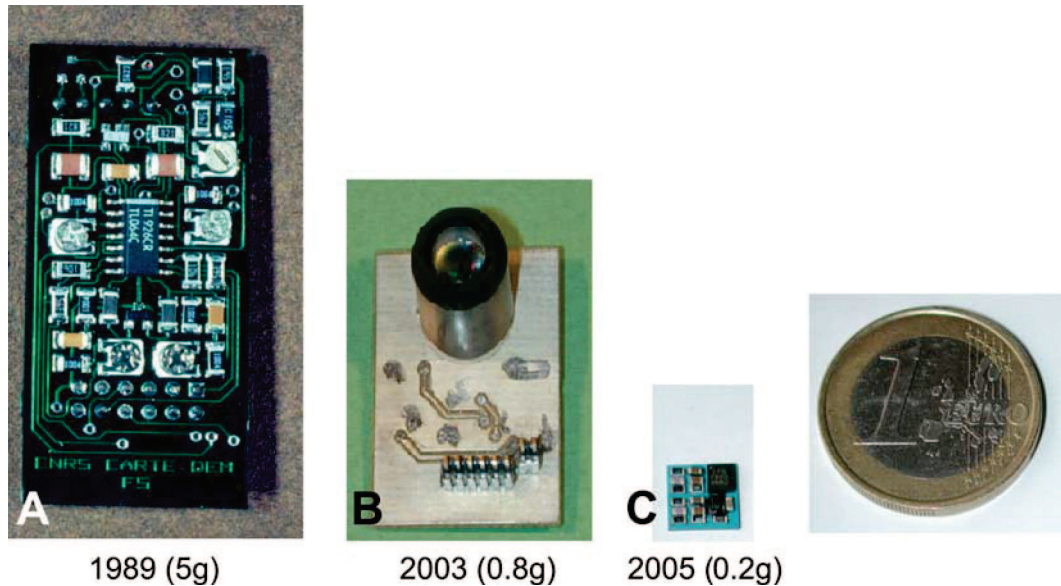


FIGURE 1.28 – Évolution des capteurs de flux optique basé sur le « temps de passage » entre la version originelle en technologie CMS de 1989 [Pichon et al., 1989] (A), la technologie dite mixte « analogique/numérique » de 2003 [Ruffier et al., 2003] (B) et la version en technologie LTCC (*Low Temperature Co-fired Ceramic*) de 2005 [Pudas et al., 2007] (C).

Plusieurs versions du DEM basé sur le principe du « temps de passage » ont été conçues dans notre laboratoire au fil des années. D'une conception totalement analogique en 1989 en technologie CMS [Pichon et al., 1989] ou encore en technologie FPAA (*Field-Programmable Analog Array*) en 2003 [Ruffier et al., 2003], elle a évolué vers une architecture analogique/numérique dite mixte [Amic, 2002], puis s'est décliné en plusieurs versions adaptées soit sur une architecture de type FPGA (*Field-Programmable Gate Array*) [Aubépart and Franceschini, 2007], soit de type

[Pichon et al. 1989] DEM analogique (1989)	[Ruffier et al. 2003] DEM analogique (FPAA) (2003)	[Ruffier et al. 2003] DEM mixte (2003)	[Pudas et al. 2007] DEM LTCC (2007)	[Aubépart et al. 2007b] DEM FPGA (2007)	[Sabiron et al. 2013] DEM mixte (2013)
1 DEM double sens	1 DEM	1 DEM	1 DEM	7 DEMs	6 DEMs + 1 sortie médian
1250mm ² soit 625mm ² /DEM	2000mm ²	540mm ²	50mm ²	2250mm ² soit 320mm ² /DEM	1320mm ² soit 220mm ²
100µW soit 50µW/DEM	750µW	40µW	40µW	400µW soit 57µW/DEM	inconnu
5g soit 2.5g/DEM	5g	0.8g	0.2g	7g soit 1g/DEM	29.4g soit 4.9g/DEM

TABLEAU 1.2 – Evolution des circuits DEMs

micro-contrôleur [Ruffier et al., 2003, Pudas et al., 2007, Viollet et al., 2010, Expert et al., 2011b,a, Roubieu et al., 2011, Ruffier and Expert, 2012, Roubieu et al., 2011, Expert et al., 2012, Sabiron et al., 2013a] (figure 1.28). Cette technologie de type mixte est basée sur un pré-traitement des signaux visuels analogique et sur un filtrage et une mesure du flux optique discrétisé (e.g., sur microcontrôleur), ce qui permet de considérablement réduire la taille et la consommation des capteurs en comparaison d'une technologie totalement analogique ou encore FPAA (tableau 1.2).

Cette évolution dans la conception permet alors de faciliter l'intégration de ces capteurs sur robots voués à être de plus en plus petits. À titre d'exemple pour notre laboratoire, certains circuits DEMs ont été intégrés sur des cibles robotiques comme le circuit DEM analogique [Pichon et al., 1989] (figure 1.28A) sur le « robot mouche » (masse : 11 *kg*) [Pichon, 1991, Blanes, 1991, Franceschini et al., 1992] et le circuit DEM mixte ([Ruffier et al., 2003], figure 1.28B) sur l'hélicoptère captif OCTAVE (masse : 100 *g*) [Ruffier and Franceschini, 2005].

Ainsi le capteur qui est intégré sur notre plateforme robotique est un capteur de flux

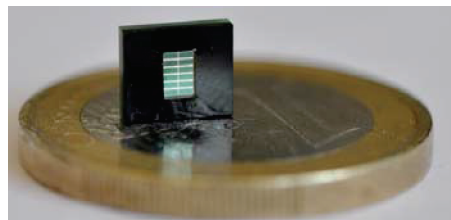


FIGURE 1.29 – Rétine iC-LSC avec sa matrice deux colonnes de six photorécepteurs.

optique en technologie mixte (microcontrôleur) utilisant une rétine iC-LSC (from

iCHaus Company, <http://www.ichaus.de>), qui est une matrice deux colonnes de six photodiodes (figure 1.29). Un amplificateur en courant est intégré pour chaque photodiode. Les photodiodes de chaque colonne ont été appairé de manière à augmenter la surface photosensible de chaque pixel (de $300\mu m \times 800\mu m$ à $300\mu m \times 1600\mu m$) (pour plus de détails sur la conception optique du capteur, voir la thèse de Julien Serres [2008]).

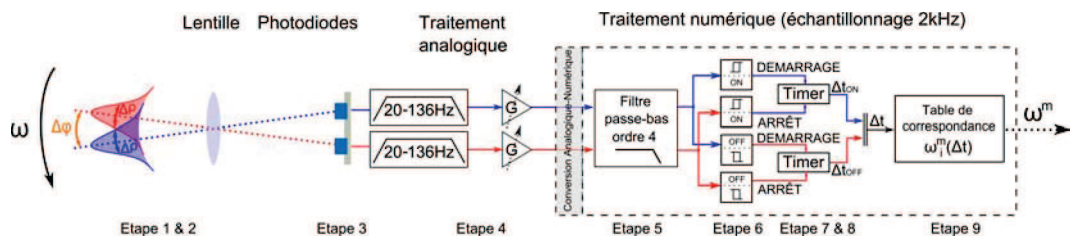


FIGURE 1.30 – Schéma du principe du « temps de passage » pour estimer le flux optique (voir texte pour plus de détails). Modifié de [Ruffier and Expert, 2012].

Le traitement DEM (figure 1.30) a, quant à lui, été amélioré depuis celui présenté dans cette dernière thèse, en voici les étapes :

- Étape 1 : Échantillonnage spatial des éléments contrastés présents dans l'environnement par deux photodiodes séparées spatialement d'un angle inter-photodiode $\Delta\varphi$. Cette étape est similaire à l'échantillonnage spatial de l'oeil composé de la mouche dans lequel chaque ommatidie est séparée d'un angle inter-ommatidial $\Delta\varphi$ [Götz, 1964],
- Étape 2 : Filtrage spatial passe-bas par défocalisation de la lentille procurant à chaque photodiode une sensibilité angulaire gaussienne caractérisée par une largeur à mi-hauteur $\Delta\rho$ (angle d'acceptance). Les photorécepteurs de la mouche possède une même sensibilité angulaire gaussienne caractérisée par un angle d'acceptance $\Delta\rho$ [Götz, 1964],
- Étape 3 : Phototransduction linéaire des photodiodes de la rétine afin d'avoir un gain maximal dans la gamme de luminance utile,
- Étape 4 : Filtrage analogique des signaux photodiodes, un premier filtrage passe-haut actif du 1^{er} ordre ($f_c = 20 \text{ Hz}$) sert à supprimer la composante continue de l'éclairage. Il suit également une étape de filtrage passe-bas actif du 1^{er} ordre ($f_c = 136 \text{ Hz}$). Une étape de contrôle de gain programmable par SPI supplémentaire a été ajoutée de manière à donner une amplification supplémentaire aux signaux filtrés [Ruffier and Expert, 2012],

- Étape 5 : Conversion analogique-numérique des signaux photodiodes et filtrage numérique passe-bas de Butterworth du 4^{me} ordre ($f_c = 30 \text{ Hz}$). Cette étape de filtrage supprime le bruit généré par l'éclairage artificiel 100 Hz ,
- Étape 6 : Seuillage par séparation des fronts de contraste « ON » et « OFF »,
- Étape 7 : Génération sur la voie 1 d'une impulsion de démarrage du compteur caractérisée dans la gamme de mesure ,
- Étape 8 : Génération sur la voie d'une impulsion d'arrêt du compteur,
- Étape 9 : Estimation de la vitesse angulaire de défilement ω^m au moyen d'une table de correspondance admettant en entrée le retard Δt mesuré.

Pour plus de détails sur les caractéristiques statiques et dynamiques de ce type de capteur utilisant une rétine iC-LSC, le lecteur peut se reporter à une caractérisation complète présentée dans [Expert et al., 2011b], quelques résultats figurent cependant dans la sous-partie suivante. De récents travaux [Sabiron et al., 2013b] (figure 1.31)

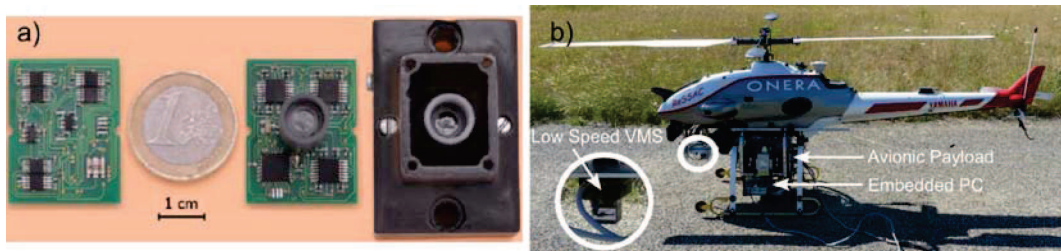


FIGURE 1.31 – (A) Capteur de flux optique de 2.8 g (taille : $33 \times 40 \text{ mm}$) capable de mesurer le flux optique dans la gamme de $[1.5 \text{ }^\circ.\text{s}^{-1}; 25 \text{ }^\circ.\text{s}^{-1}]$. Ce dernier a été implémenté sur l'hélicoptère sans pilote ReSSAC (mass : 80 kg). (D'après [Sabiron et al., 2013b]).

inspirés de ceux que nous présentons dans cette thèse [Roubieu et al., 2011] (voir aussi chapitre 4) ont permis la conception d'un capteur qui estime le mouvement dans une gamme très faible $[1.5 \text{ }^\circ.\text{s}^{-1}; 25 \text{ }^\circ.\text{s}^{-1}]$. Ce capteur présente une bonne précision de mesure ($Std_{error} \approx 2.54 \text{ }^\circ.\text{s}^{-1}$) et une bonne fréquence de rafraîchissement ($\sim 7 \text{ Hz}$) en dépit des faibles flux optiques mesurés et malgré les vibrations de l'hélicoptère dû au rotor (étape de filtrage coupe-bande supplémentaire) [Sabiron et al., 2013b]. La mise en œuvre sur un hélicoptère sans pilote a permis de montrer qu'un capteur de flux optique basé sur une simple rétine LSC iC-Haus de 6 pixels peut détecter les variations de défilement entre les éléments jonchant le sol et d'autres éléments de l'environnement comme le toit ou les arbres [Sabiron et al., 2013b].

Il est maintenant temps de faire un état de l'art plus étendu vers d'autres technologies de capteurs de flux optique.

V.C Les capteurs VLSI

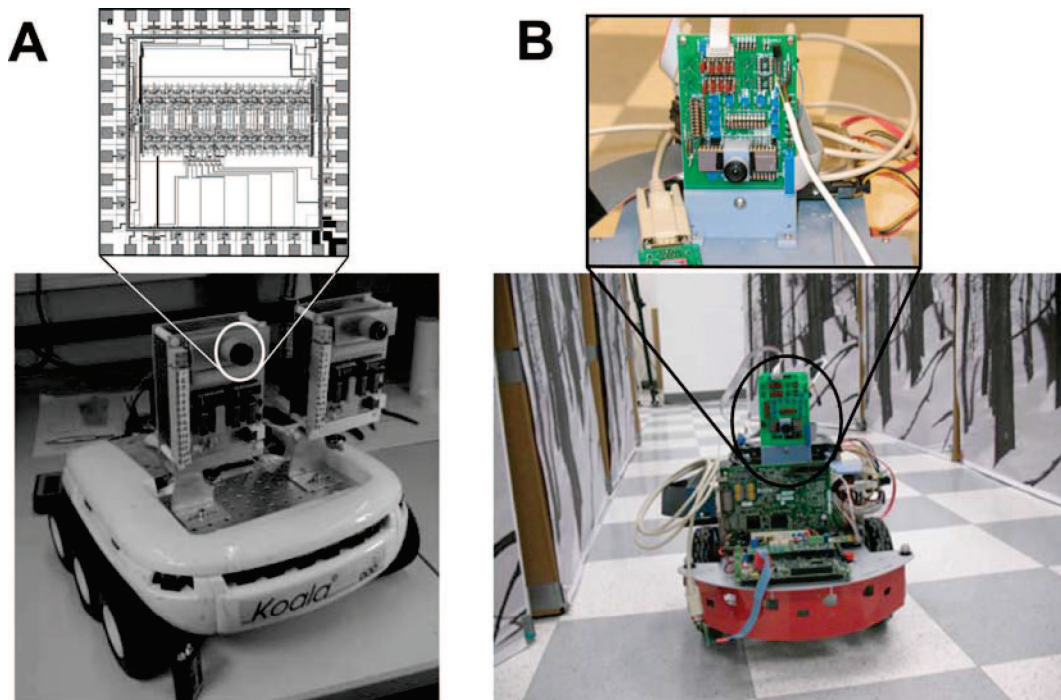


FIGURE 1.32 – Exemples de robots dotés de capteur de flux optique en technologie VLSI. (A) Le robot *Koala* embarque deux capteurs VLSI estimant le mouvement sous 6 décades de luminance [Liu and Usseglio-Viretta, 2001]. Robot intégrant un comportement d'équilibrage des flux optiques latéraux grâce à son capteur de 19 pixels [Xu et al., 2011].

La technologie VLSI figure parmi les technologies fréquemment utilisée dans la conception de capteurs de flux optique et peuvent comporter un faible ou un grand nombre de pixels (4 pour Miller and Borrows [1999]; 64×32 pour celui de [Abbott et al., 1997]). Ces derniers peuvent être dotés d'une sensibilité à la luminance pouvant couvrir plusieurs décades avec le développement de pixels auto-adaptatifs (e.g., 6 décades pour le capteur de [Delbrück and Mead, 1994]). Certains adaptent le modèle du corrélateur de Reichardt (mise en œuvre sur un robot à roue : [Harrison and Koch, 1999, Liu and Usseglio-Viretta, 2001, Harrison, 2005, Xu et al., 2011], banc de test : Harrison and Koch [1999, 2000], Higgins and Pant [2005], Brinkworth et al. [2009]) (figure 1.32) ou encore celui du « temps de passage » (banc de test : [Indiveri et al., 1995, 1996a,b, Moeckel and Liu, 2007, Viollet et al., 2010, Expert et al., 2011b]). Parmi ces travaux, peu proposent une étude en détail des caractéristiques de réponse des capteurs [Harrison and Koch, 1999, Brinkworth et al., 2009]. En revanche, plusieurs articles font un état de l'art plus étendu encore sur les différents capteurs de flux optique adaptés en technologie VLSI [Mead, 1989, Krammer and Koch, 1997,

Moini, 2000, Moeckel and Liu, 2009, Xu et al., 2011].

Certaines applications robotiques ont été dotées, au moyen de ces capteurs, de comportements d'équilibrage des flux optique latéraux [Xu et al., 2011], de stabilisation de trajectoires par la réponse optomotrice [Harrison and Koch, 1999, Liu and Usseglio-Viretta, 2001] ou encore de détection de collisions inspiré du criquet [Harrison, 2005]. Il reste à noter que les capteurs de flux optique VLSI présentent plusieurs désavantages. En effet, d'une conception relativement spécifique, ce type de technologie nécessite un temps de conception relativement long pouvant conduire à des coûts relativement élevés. Plusieurs inconvénients peuvent venir s'ajouter à cela [Moeckel and Liu, 2009] :

- Un capteur VLSI est caractérisé par sa surface photosensible et par un circuit d'estimation du mouvement. Le nombre de pixels du circuit VLSI va alors dépendre de la complexité de l'algorithme mis en œuvre pour estimer le mouvement. Un algorithme complexe nécessitant des fonctions en technologie VLSI volumineuses ne permettra pas d'intégrer beaucoup de pixels et donc un *fill factor* faible (c'est à dire un pourcentage d'aire occupée par la zone photosensible du pixel faible),
- En dépit des progrès des technologies micro-électroniques, les concepteurs de circuits VLSI doivent pouvoir tenir compte des problèmes de désalignement de transistor. Les pixels (constitués d'un assemblage de transistors) peuvent ne pas répondre de la même manière, ce qui fait apparaître des caractéristiques électriques différentes. Ainsi, de manière à obtenir une faible variance, dans les caractéristiques des transistors oblige le concepteur à adopter un compromis dans leurs tailles [Serrano-Gotarredona and Linares-Barranco, 1999],
- Des problèmes de fidélité peuvent apparaître entre la fonction espérée de l'algorithme et celle effectuée par le circuit VLSI. Par exemple, une opération de multiplication n'est pas toujours bien adaptée en circuit VLSI et l'opération n'est précise que pour une certaine gamme de tensions d'entrée. Le concepteur doit alors choisir les caractéristiques de son circuit VLSI lui permettant d'effectuer une fonction qui soit la plus proche possible de l'algorithme attendu.

Enfin, grâce à des projets de collaboration avec le Centre de Physique des Particules de Marseille (CPPM), plusieurs rétines basées sur des pixels auto-adaptatifs de Delbrück and Mead [1994] ont vu le jour dans notre laboratoire : une rétine pouvant couvrir une gamme de luminance de 7 décades [Aubépart et al., 2007] et une autre rétine appelée APIS (pour *Adaptive Pixels for Insect-based Sensors*). Cette dernière

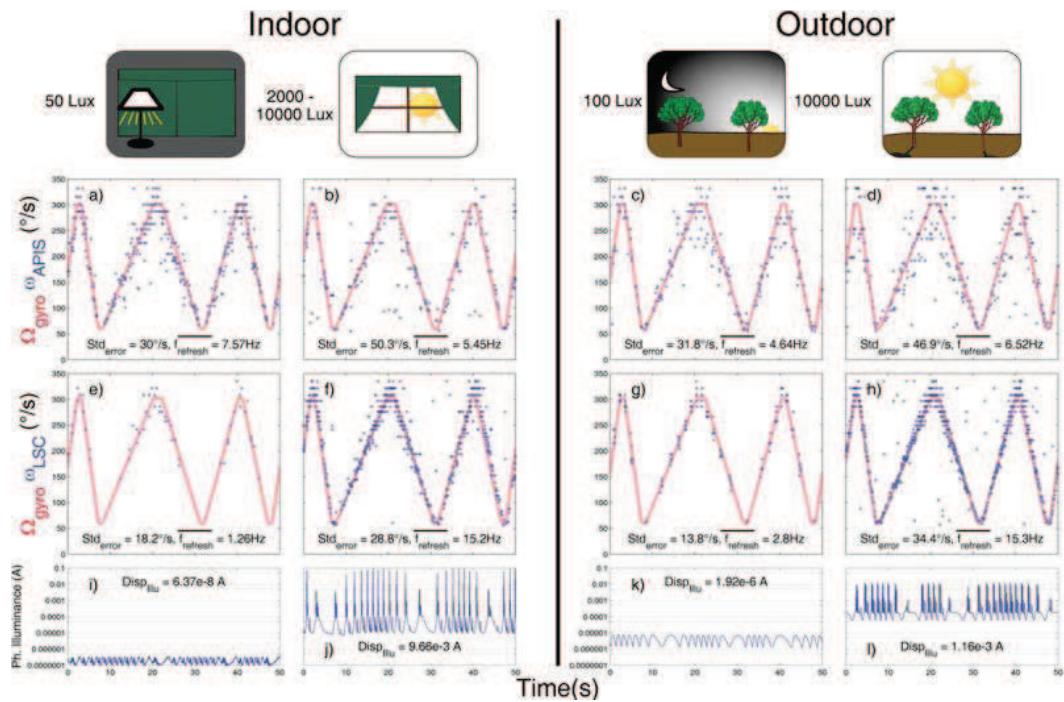


FIGURE 1.33 – Caractéristiques dynamiques de réponse d’un capteur de flux optique basé sur une rétine à réponse linéaire LSC iC-Haus (ω_{LSC}) et d’un capteur basé sur une rétine APIS réalisée en technologie micro-électronique XFAB $0.35 \mu m$ et composée de pixels auto-adaptatifs (ω_{APIS}). Ces réponses sont obtenues par rotation d’une carte électronique dont la vitesse est enregistrée par un gyromètre ADIS16100 Ω_{gyro} . [Expert et al., 2011b].

est une rétine de 5×5 pixels et ses caractéristiques statiques et dynamiques ont été comparées avec celles d’une rétine à réponse linéaire (LSC iC-Haus) [Viollet et al., 2010, Expert et al., 2011b]. Les résultats ont montré que le DEM basé sur la rétine à réponse linéaire (LSC iC-Haus) fournit une réponse plus précise et plus rafraîchie que le DEM basé sur la rétine APIS mais dans une gamme d’illuminance plus faible (1.5 décades pour le capteur basé LSC et 3 décades pour le capteurs basé APIS) (figure 1.33) [Expert et al., 2011b].

V.D Les capteurs de souris optique

Des capteurs de souris optique ont été détournés de leur usage initial pour être utilisés en tant que capteurs de flux optique aussi bien dans la robotique terrestre [Jackson et al., 2007, Dahmen et al., 2009] que la robotique aérienne [Griffiths et al., 2006, Barber et al., 2007, Griffiths et al., 2007, Rodriguez et al., 2007, Beyeler et al., 2009]. Ces capteurs ont l’avantage d’être léger (figure 1.34), disponibles en série (e.g., Avago

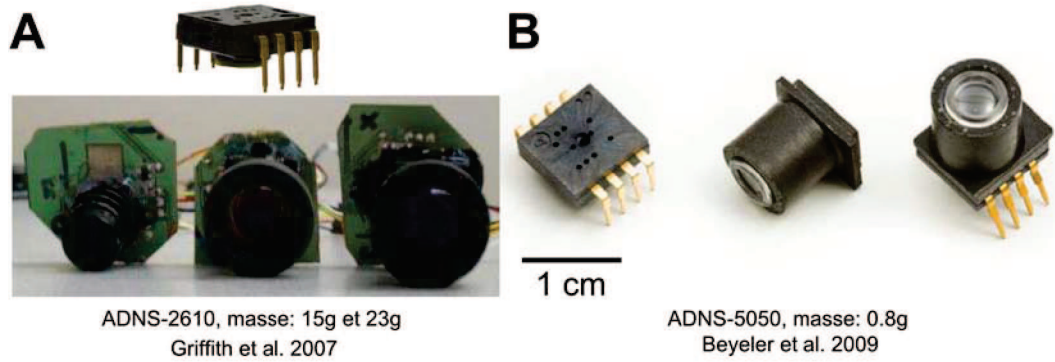


FIGURE 1.34 – Exemples de capteurs de souris optique avec leur masse respective utilisés tous deux au guidage aérien d’une aile fixe. (D’après [Griffiths et al., 2007, Beyeler et al., 2009]).

technologies *www.avagotech.com*), facile à interfacer et ne requièrent pas de traitements supplémentaires dans la mesure où l’extraction du flux optique est effectuée « on-chip ». Ils procurent également une mesure du flux optique indépendante des contrastes et de l’intensité lumineuse dans la direction de visé du capteur. Cependant, chaque capteur ne fournit qu’une seule mesure du flux optique dans sa direction de visé et il faut autant de capteurs que de directions du champ visuel à couvrir pour une application robotique donnée [Beyeler et al., 2009].

Assez peu de travaux [Beyeler et al., 2009, Expert et al., 2011a] fournissent une étude complète des caractéristiques de capteurs de souris optique. Une autre étude, celle de Chan et al. [2010] n’en fournit qu’une étude partielle et celle de Beyeler et al. [2009] n’étudie la réponse du capteur qu’en environnement extérieur sans étudier l’influence d’importantes variations lumineuses. Dans notre laboratoire, une étude complète a été menée afin de tester, dans une variation de 1.5 décades de luminances (environnement intérieur : luminosité de 100 à 350 *lux*, environnement extérieur : 10000 *lux*), les caractéristiques statiques et dynamiques de réponse d’un capteur de souris optique Avago ADNS-9500 (rétine de 900 *pixels*, masse : ~ 2 g) et d’un capteur de flux optique de 2 *pixels* (masse : 1 g) mesurant le flux optique sur la base du principe du « temps de passage » [Expert et al., 2011a].

Les capteurs de souris optique sont généralement utilisés avec une source lumineuse de type laser (e.g., ADNS-9500 [Expert et al., 2011a]) qui fournit une luminosité importante au capteur. En dépit d’un grand nombre de *pixels* (900 *pixels* pour Avago ADNS-9500) constituant la rétine de ces capteurs, les performances en environnement intérieur apparaissent considérablement dégradés dans la gamme de luminance étu-

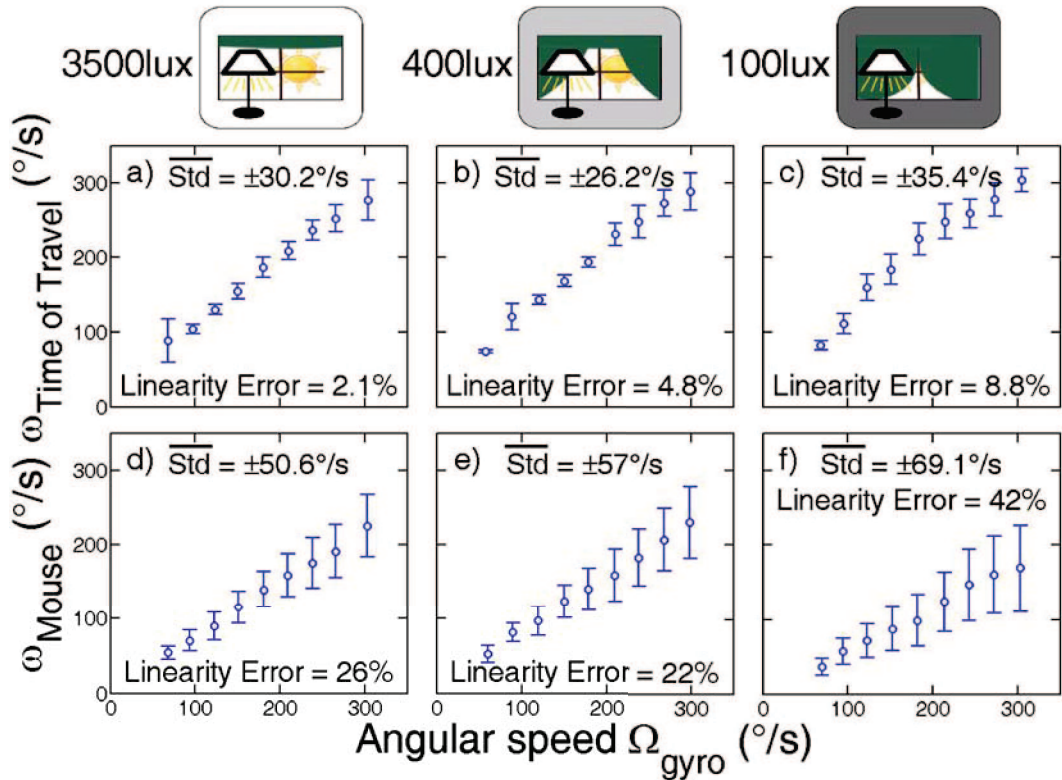


FIGURE 1.35 – Caractéristiques statiques obtenues entre un capteur de flux optique basé sur une rétine LSC iC-Haus (principe du « temps de passage », $\omega_{Time\ of\ Travel}$) et un capteur de souris optique Avago ADNS-9500 (ω_{Mouse}). La réponse de chaque capteur a été enregistrée pendant 15 s dans une gamme de $60\ ^{\circ}.s^{-1}$ à $300\ ^{\circ}.s^{-1}$ par pas de $30\ ^{\circ}.s^{-1}$ et comparée avec la vitesse de rotation de la carte enregistrée par un gyromètre ADIS16100 Ω_{gyro} . (D’après [Expert et al., 2011a]).

diée en environnement intérieur comparées à celles obtenues avec un capteur de flux optique constitué d’uniquement 2 pixels [Expert et al., 2011a] (figure 1.35).

Une très récente étude [Honegger et al., 2013] compare un capteur de souris optique Avago ADNS2080 avec le capteur *PX4FLOW* (figure 1.36). Ce dernier mesure le flux optique avec une fréquence de rafraîchissement de $250Hz$ grâce à son microcontrôleur ARM M4 Cortex cadencé à $168MHz$ et un capteur natif CMOS MT9V034 de $752 \times 480\ pixels$ dégradé à $64 \times 64\ pixels$. Même si le capteur *PX4FLOW* présente de meilleures caractéristiques de mesures de flux optique en environnement intérieur qu’un capteur de souris optique, il mesure le flux optique dans une gamme qui s’étend seulement de -86 à $+86\ ^{\circ}.s^{-1}$, alors que des applications d’évitement d’obstacles peuvent nécessiter une gamme plus importante de mesure en cas de forte proximité.

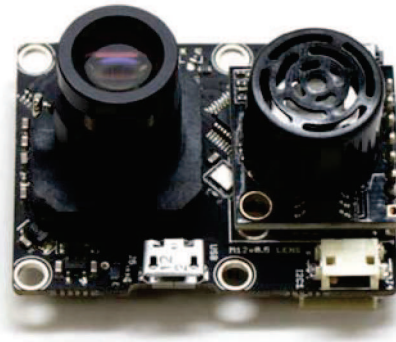


FIGURE 1.36 – Le capteur *PX4FLOW* intègre un gyromètre trois axes de manière à fournir une mesure du flux optique de translation. Le capteur ultra-sonore est utilisé en complément pour déterminer la distance séparant le capteur de la scène visée et fournir une mesure métrique de sa vitesse de défilement. (D’après [Honegger et al., 2013]).

V.E Quelques yeux composés artificiels

Les yeux composés artificiels constituent une des clés dans les futures solutions de navigation autonome pour micro-robot en offrant des capteurs d’une grande compacité et doté d’un très large champ visuel.

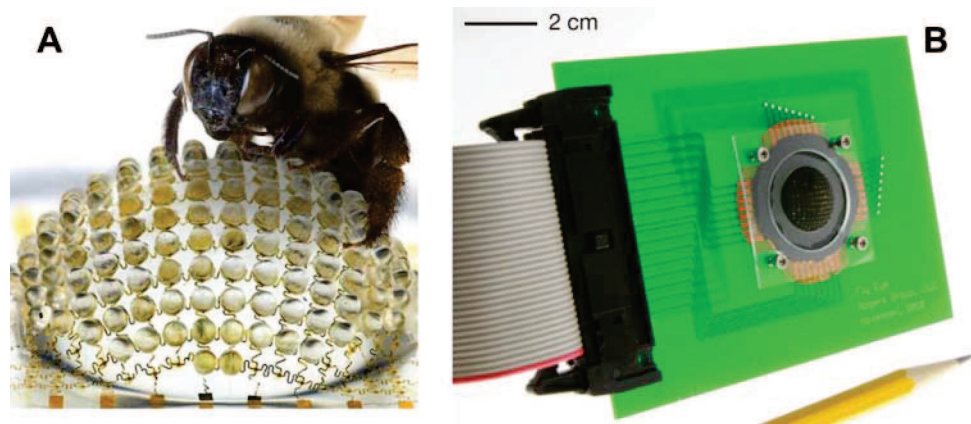


FIGURE 1.37 – (A) Œil composé dans une configuration sphérique d’environ 1.5 cm de diamètre, doté de 180 pixels et d’un champ visuel de 160°. (B) Aspect de l’œil composé monté sur un PCB. (D’après [Song et al., 2013]).

L’équipe de John Rogers de l’Université de l’Illinois à Urbana-Champaign travaille sur le développement de nouveaux capteurs optique bio-inspirés dont un œil camérolaire doté d’une rétine courbe en technologie micro-électronique sur substrat plastique [Ko et al., 2008]. Des travaux plus récents de ces chercheurs portent sur la mise au point d’un dispositif minuscule de caméra numérique biomimétique (figure 1.37) doté de 180

pixels le rendant comparable à l'œil composé présent chez la fourmi rouge *Solenopsis fugax* ou encore le scarabée *Hylastes nigrinus*. Le réseau de photodiode est coiffé d'une matrice de micro-lentilles en matière souple de type élastomère ($\Delta\varphi = 9.7^\circ$ et $\Delta\rho = 11^\circ$) [Song et al., 2013]. Cependant, les capacités de ce capteur à mesurer le flux optique n'ont pas été démontrées.

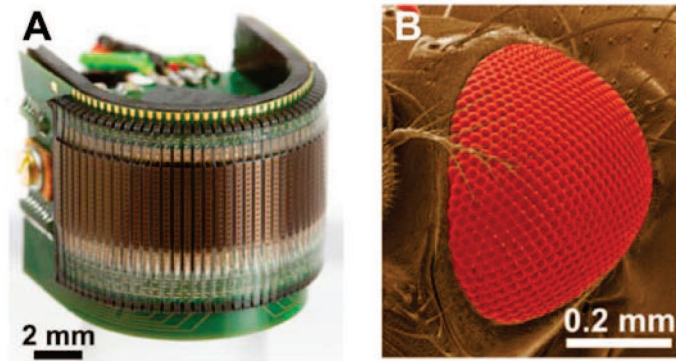


FIGURE 1.38 – (A) Configuration cylindrique de l'œil composé artificiel CurvACE constitué de 630 pixels regardant (B) un champ visuel total de $180 \times 60^\circ$. (C) Comparaison avec l'œil composé de la mouche *Drosophila Melanogaster*. (D'après [Floreano et al., 2013]).

Pour en revenir aux capteurs de flux optique, de récentes recherches [Floreano et al., 2013] menées lors du projet Européen CurvACE (www.CurvACE.org) ont permis de concevoir un premier prototype d'œil composé artificiel fonctionnel, dans une configuration cylindrique, capable de détecter et de mesurer le flux optique dans une grande gamme de luminance grâce à ses 630 pixels (inspirés des cellules de Delbrück [Delbrück and Mead, 1994]), tout ceci pour une masse totale de 1.95 g (figure 1.38).

Ce prototype figure comme le seul capteur à rassembler autant de caractéristiques similaires à celles rencontrées chez un œil composé de mouche *Drosophila Melanogaster* dont notamment la résolution spatiale, l'angle d'acceptance, le nombre d'ommatidies, l'adaptation en fonction de la luminosité ou encore un champ visuel, certes plus petit, mais proche (voir tableau 1 dans [Floreano et al., 2013]).

Enfin, il a été possible d'étudier sous trois niveaux de luminances différents les caractéristiques dynamiques de réponse du capteur à estimer le flux optique sur la base du « temps de passage » (figure 1.39) [Floreano et al., 2013].

Nous allons maintenant nous diriger vers la robotique où nous allons tout d'abord

	CurvACE	Œil de la mouche <i>Drosophila</i> [Refs.]
No. d'ommatidies	630	600-700
Diamètre d'une facette (μm)	12.8	0.36 [Franceschini and Kirschfeld, 1971]
Diamètre de l'œil (mm)	172	16 [Franceschini and Kirschfeld, 1971]
Diamètre d'une facette/Diamètre de l'œil (%)	1.3	4.4
Angle interommatidial, $\Delta\varphi$ ($^\circ$)	~ 4.2	$\sim 4.7 - 5.5$ [Franceschini and Kirschfeld, 1971]
Angle d'acceptance, $\Delta\rho$ ($^\circ$)	4.2	~ 4.5 [Götz, 1965]
Champ visuel, ($^\circ$)	180×60	160×180 [Heisenberg and Wolf, 1984]
Bande passante, (Hz)	300	< 100 [Laughlin and Weckstrom, 1993]
Auto-adaptation à la luminance	Oui	Oui [Gu et al., 2005]
Suppression du « Cross-talk » ¹	Oui	Oui [Götz, 1965]

TABLEAU 1.3 – Spécifications du prototype CurvACE comparées aux caractéristiques de l'œil composé de la mouche *Drosophila melanogaster*

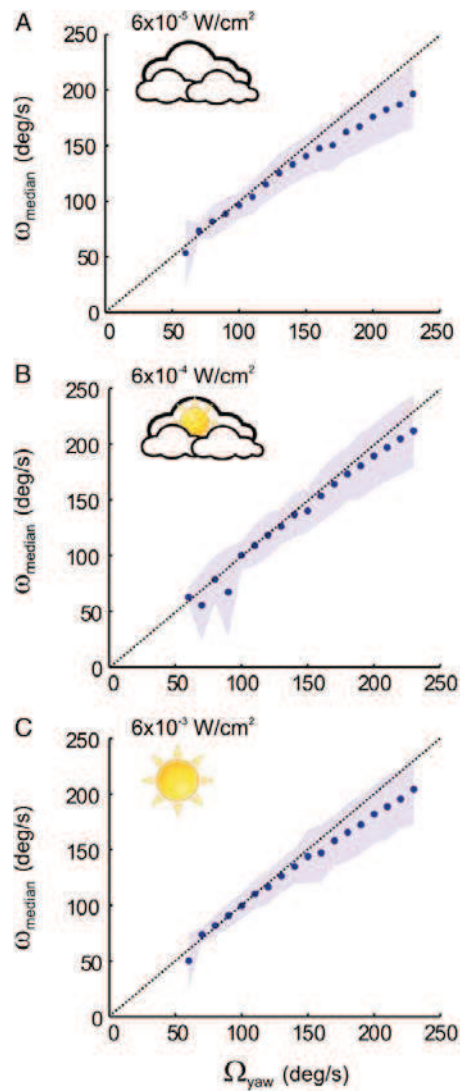


FIGURE 1.39 – (A-C) Caractéristiques de réponse du prototype CurvACE à mesurer le flux optique sur le principe du « temps de passage » évaluées sous trois niveaux de luminance différents et en appliquant des échelons de vitesse de rotation du capteur Ω_{yaw} par pas de $10 \text{ }^\circ.s^{-1}$, durant chacune 10 s. Le prototype CurvACE est placé au centre d’une arène de 105 cm de diamètre dont la surface est recouverte d’une image représentant un environnement naturel. La courbe pointillée représente la ctendance théorique. (D’après [Floreano et al., 2013]).

présenter, sous la forme d’un état de l’art, un certain nombre de plateformes robotique utilisées dans la recherche actuelle puis nous terminerons cette introduction par un état de l’art des systèmes robotiques intégrant des principes de navigation bio-inspirés.

VI État de l'art sur quelques plateformes robotiques spécifiques

L'état de l'art que nous abordons dans ce chapitre se veut une liste non exhaustive de la grande diversité que propose la recherche actuelle en matière de conception de robots aériens. Cette typologie des micro-robots abordée ici ne traitera pas de la robotique mobile traditionnelle dotée de roues ou de chenilles qui constituent, en grande majorité, des cibles non-holonomes et sous actionnées.

VI.A Les micro-aéronefs

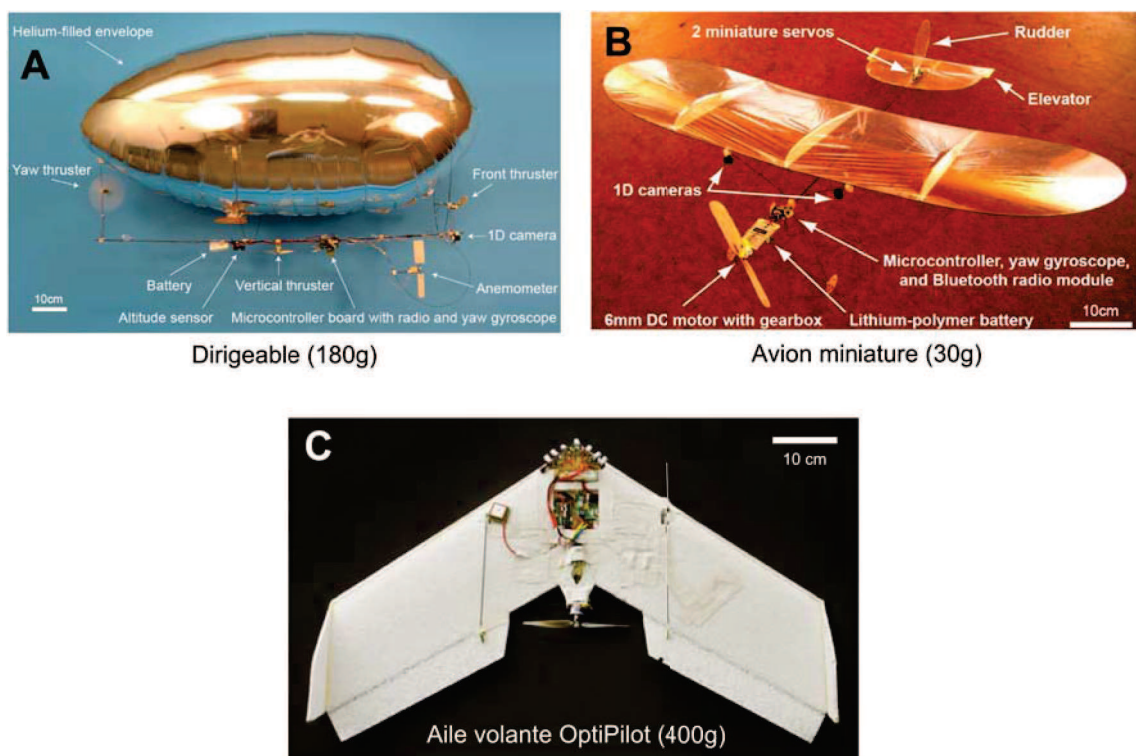


FIGURE 1.40 – Micro-aéronefs sous actionnés.

(A) Ballon dirigeable développé à l'EPFL, d'une masse de 180 g, il peut se déplacer jusqu'à 1 m.s^{-1} et dispose d'une autonomie de 3 h [Zufferey, 2005].

(B) Avion miniature développé à l'EPFL, d'une masse de 30 g (batterie incluse), il peut se déplacer à une vitesse maximale de 2.5 m.s^{-1} pour une autonomie de 30 min [Zufferey and Floreano, 2006].

(C) Aile volante doté du pilote automatique OptiPilot développé également à l'EPFL, cette plateforme peut se déplacer jusqu'à 20 m.s^{-1} pour une autonomie maximale de 30 min [Beyeler et al., 2009, Zufferey et al., 2010].

Le laboratoire LIS de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) a travaillé sur la conception de plusieurs plateformes robotiques aériennes ultra-légères dont un ballon dirigeable (taille : $110 \times 60 \times 60$ cm, figure 1.40A) [Zufferey, 2005] et plusieurs versions d'un avion miniature ultra-légers basé sur une plateforme « microCeline » de 5.2 g (vendue sur *www.didel.com*) (version 30 g : [Zufferey and Floreano, 2006], version 10 g : [Zufferey et al., 2007]).

Le ballon dirigeable contrôle sa hauteur par un moyen non-visuel (capteur de distance actif Sharp GP2Y0A02YK).

Le premier avion miniature (figure 1.40B) ne contrôle pas sa vitesse d'avance (qui varie entre 1.2 et 2.5 $m.s^{-1}$ en vol) mais évite les obstacles frontaux sur la base du flux optique d'expansion détecté par deux caméra 1D placés à 45° (formant un système visuel de 56 pixels) de part et d'autres de l'axe longitudinal du robot [Zufferey and Floreano, 2006]. Une seconde version de cet avion miniature (MC2) contrôle sa vitesse d'avance au moyen d'un anémomètre et évite les obstacles de la même manière que la version précédente. Des travaux plus récents menés au sein de ce laboratoire ont porté sur une aile fixe (figure 1.40C), équipée d'un pilote automatique *Optipilot* [Beyeler et al., 2009, Zufferey et al., 2010] nécessitant toute une suite de capteurs, tel qu'un GPS, un tube pitot et un système visuel constitués 7 capteurs de souris optique disposée dans la région fronto-latérale du champ visuel, pour être fonctionnel. Cette aile volante est capable de contrôler son altitude par régulation du flux optique ventral et d'éviter les obstacles frontaux par des manœuvres en roulis en détectant le flux optique d'expansion. Par contre, le contrôle de la vitesse d'avance s'effectue par un tube Pitot à $\sim 14 m.s^{-1}$ avec une précision de $\pm 2 m.s^{-1}$ [Beyeler et al., 2009]. Les avions miniatures et les ailes volantes ont leur trois dynamiques d'avance, d'élévation et latérale couplées. Ce sont des plateformes holonomes, sous actionnées de par la nature de leur actionnement. Toutefois, une exception réside cependant pour le dirigeable qui découple sa dynamique d'avance et d'élévation mais qui, par son actionnement, demeure quand même sous actionné.

Les plateformes aériennes à voilure tournante (figure 1.41) peuvent se présenter sous diverses formes : les hélicoptères conventionnels avec un seul rotor [Hrabar and Sukhatme, 2003, Hrabar et al., 2005, Garratt and Chahl, 2008, Hrabar and Sukhatme, 2009, Sabiron et al., 2013b], les hélicoptères coaxiaux à voilure contra-rotative (projet Kolibri et LuMAV (masse : 440 g, autonomie : 5 – 10 min) [Barrett, 2004], CoaX [Bouabdallah et al., 2006] (masse : 200 g, autonomie : 20 min), MICOR (masse : 100 g) [Bohorquez et al., 2003, Pines and Bohorquez, 2006], muFly [Bouabdallah

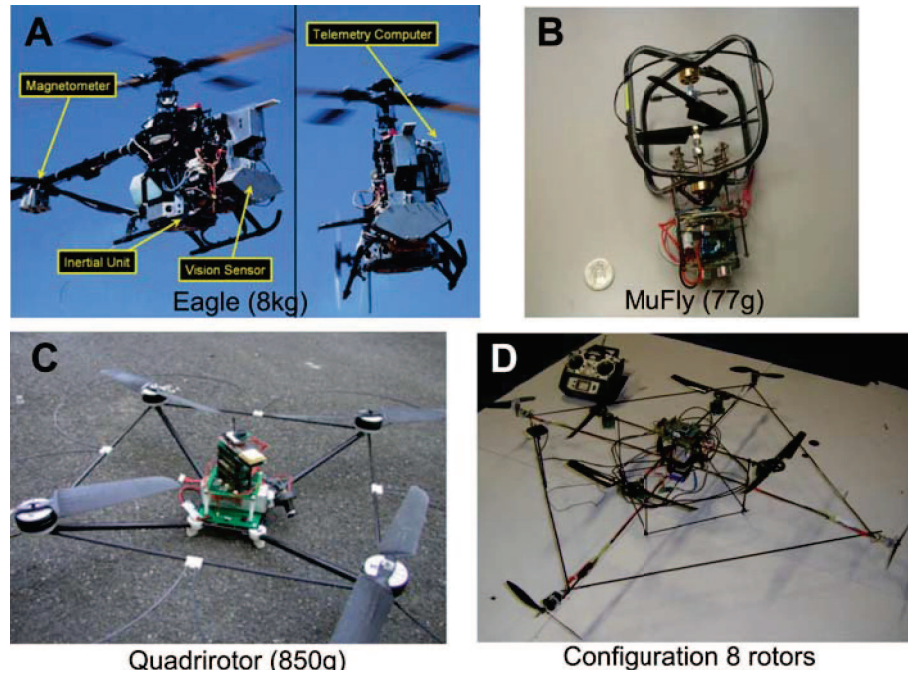


FIGURE 1.41 – Plateformes aériennes à voilures contra-rotatives.

(A) Hélicoptère conventionnel Eagle d'une masse de 8 kg [Garratt and Chahl, 2008].

(B) Hélicoptère coaxial à voilure contra-rotative muFly, d'une masse de 80 g , il dispose d'une autonomie de 5 min [Bouabdallah et al., 2006].

(C) Quadrirotor développé par le Centre d'Énergie Atomique et embarque une centrale inertielle et une caméra pointée vers le bas (champ visuel 70°). Il possède une autonomie de 10 min et utilise le flux optique vertical d'expansion pour suivre le mouvement vertical d'une plateforme. [Herisse et al., 2012].

(D) Plateforme robotique totalement actionnée constituée de 8 rotors [Romero et al., 2007].

et al., 2006, Schafroth et al., 2009, Bermes et al., 2011]) ou encore les quadrirotors [Castillo et al., 2005, Bouabdallah, 2007, Hoffmann et al., 2007, Guenard et al., 2008, Conroy et al., 2009, Kendoul et al., 2009b,a, Herisse et al., 2009, Bloesch et al., 2010, Weiss et al., 2011, Herisse et al., 2012, Plett et al., 2012] (figure 1.41C).

Parmi ces travaux, plusieurs ont utilisé le flux optique pour effectuer des manœuvres de suivi de terrain, d'atterrissage (calcul du flux optique déporté : [Garratt and Chahl, 2008, Herisse et al., 2009, 2012]), d'évitement d'obstacles latéraux (calcul du flux optique à bord : [Hrabar et al., 2005, Hrabar and Sukhatme, 2009]) et aussi d'appontage [Herisse et al., 2012].

L'hélicoptère Hirobo Eagle, par exemple, utilise le flux optique calculé à partir du flux d'images provenant d'une caméra et la vitesse air connue pour estimer sa hauteur sol et effectuer un suivi de terrain [Garratt and Chahl, 2008]. Cependant, ce robot parvient à effectuer un vol en semi-autonomie sur une distance limitée et nécessite un

opérateur au sol capable de reprendre les commandes à tout moment. Le quadrirotor (figure 1.41C) utilisé dans les travaux de Herisse et al. [2012] est équipé d'une centrale inertielle et d'une caméra pointée vers le bas (cadence d'image à 25 *fps*) qui, sur la base du flux optique vertical d'expansion (calculé sur un ordinateur au sol), est capable de suivre les variations verticales d'un sol en mouvement. Cependant, ces robots ne sont pas encore capables d'automatiser toutes les tâches de navigation du vol libre d'un micro-aéronefs comme le décollage, le vol dans une forêt d'obstacles, l'atterrissage, la réaction au vent ou encore le contrôle de vitesse.

D'autres travaux portent sur des principes de navigations uniquement inertielles et visuelles via le flux optique [Kendoul et al., 2009b,a] ou utilisant une technique de localisation de type SLAM [Blosch et al., 2010, Weiss et al., 2011]. Ces chercheurs ont développé des approches très intéressantes, montrant qu'il est possible de s'affranchir du signal GPS notamment pour naviguer dans un environnement inconnu, et d'effectuer des manœuvres de décollage automatique ou encore de suivi de trajectoire en suivant des repères visuels par exemple. Ces systèmes nécessitent néanmoins une caméra pour effectuer ces tâches.

Les micro-aéronefs à voilure tournante permettent de découpler les trois dynamiques de translation. En revanche, elles sont couplées aux dynamiques de rotation rendant ces structures robotisées sous actionnées. Nous pouvons néanmoins citer une exception pour une plateforme aérienne pour le moins originale, développée par l'Université Technologique de Compiègne (Heudiasyc UTC) et qui est constituée de 8 rotors (figure 1.41D). Cette configuration de l'actionnement permet à cette plateforme d'être totalement actionnée [Romero et al., 2007].

Pour contrôler un hélicoptère, il faut piloter ses 6 degrés de liberté (3 degrés de liberté en translation et 3 degrés de liberté en rotation), ce qui complexifie l'instrumentation et les algorithmes de contrôles du robot. Certaines équipes de recherche, pour limiter leur étude sur le plan horizontal et ainsi limiter le nombre de degré de liberté à trois, privilégient les plateformes robotisées de type aéroglisseur.

VI.B Les robots terrestres holonomes, type aéroglisseur

Le CALTECH a conçu plusieurs prototypes d'aéroglisseur, la toute première version nommée MVWT-I (pour *Multi-Vehicle Wireless Testbed, Mark I*) [Cremean et al., 2002] est un aéroglisseur de 5 *kg* en contact avec le sol au moyen de patins et la seconde version (MVWT-II), plus légère, évolue sur un coussin d'air [Jin et al., 2004] (figure 1.42A&C). Ces deux robots ne transportent pas de système visuel et n'ont été

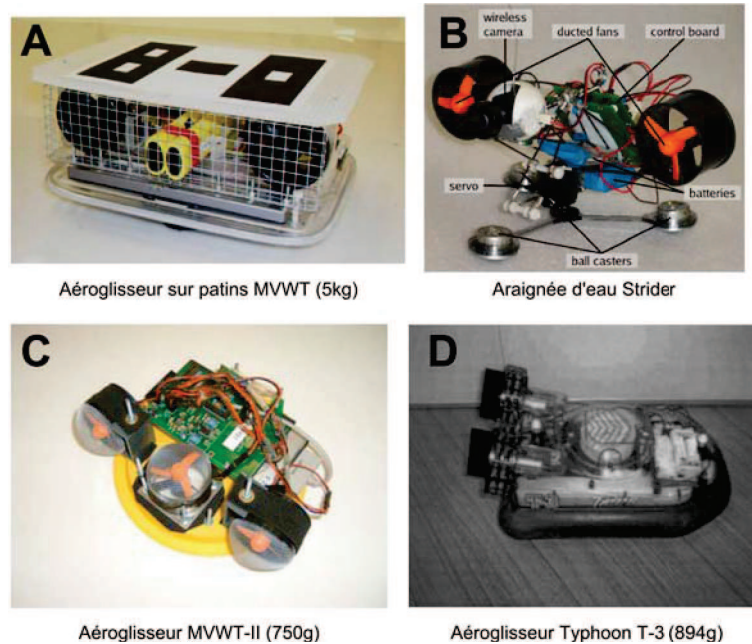


FIGURE 1.42 – Plateformes de type aéroglisseur.

(A) Aéroglisseur *sous actionné* développé par l'équipe américaine du CALTECH [Creamean et al., 2002]. Ce robot est en contact avec le sol au moyen de patins et peut se déplacer à une vitesse maximale de 2.5 m.s^{-1} .

(B) Araignée d'eau *Strider* pouvant se déplacer sur ses 3 billes à une vitesse maximale de 3 m.s^{-1} [Bermudez i Badia and Verschure, 2007, Bermudez i Badia et al., 2010].

(C) Aéroglisseur MVWT-II développé par le CALTECH, celui-ci parvient à créer un coussin d'air d'une épaisseur d'environ 2 mm et parvient à naviguer jusqu'à 2.5 m.s^{-1} pour une masse de 750 g [Jin et al., 2004].

(D) Robot aéroglisseur du modélisme basé sur le modèle Typhoon T-3. Il dispose d'une turbine qui permet de gonfler la jupe et de créer un coussin d'air de quelques millimètres d'épaisseur. [Seguchi and Ohtsuka, 2003].

conçus que pour étudier la coordination multi-véhicule [Aguiar et al., 2003, Jin et al., 2004]. Une équipe de chercheurs de l'Université de Barcelone a conçu une « araignée d'eau » artificielle dotée d'un système visuel inspiré du criquet [Bermudez i Badia and Verschure, 2007, Bermudez i Badia et al., 2010]. D'autres équipes ont travaillé sur des aéroglisseurs mais se sont plutôt intéressés en simulation à la mise en œuvre d'algorithmes non-linéaires de stabilisation de trajectoire [Fantoni and Lozano, 2002, Seguchi and Ohtsuka, 2003] (figure 1.42B&D).

Ces quelques plateformes robotiques sont toutes actionnées à l'aide de deux pousseurs arrières, faisant de ces robots des plateformes sous actionnées.

Une plateforme de type aéroglisseur évoluant sur un coussin d'air est intéressante en terme de contrôle, car elle est naturellement stabilisée en tangage et en roulis, ce qui limite les degrés de liberté à contrôler. Un robot aéroglisseur totalement actionné doit

être doté de deux pousseurs latéraux supplémentaires pour lui permettre de découpler sa dynamique d'avance de sa dynamique latérale. Cette plateforme robotique est holonome dans le plan car elle possède aussi une dynamique de lacet découplée des dynamiques de translation.

VI.C Les micro-robots de la taille d'un insecte

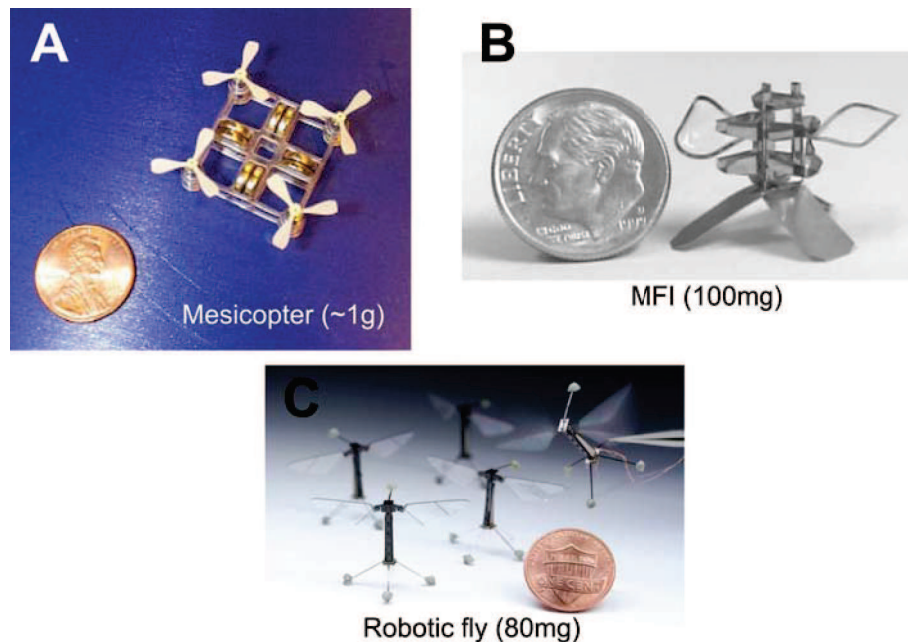


FIGURE 1.43 – (A) Le projet *Mesicopter* de l'Université de Stanford avec ses hélices de ~ 15 mm de diamètre arbore un poids de l'ordre du gramme [Kroo and Kunz, 2001]. (B) Le *Micromechanical Flying Insect* [Yan et al., 2001] possède une paire battant à une fréquence de 150 Hz grâce à un actionneur piézoélectrique [Yan et al., 2001]. (C) Photo du *Robotic fly* doté d'une paire d'aile inspirés de la syrphe *Eristalis*. Chaque aile est mise en mouvement indépendamment par un actionneur piezoélectrique (assimilé à un muscle artificiel) et un mécanisme passif sub-millimétrique officiant comme « charnière » entre l'aile et le « muscle » [Ma et al., 2013].

Le projet *Microbat* [Pornsir-Sirirak et al., 2001] est de la taille d'un gros insecte (envergure : ~ 15 cm, masse : 12.5 g) mais il est néanmoins le tout premier ornithoptère radioguidé doté d'une autonomie de six minutes.

D'autres équipes ont tenté de miniaturiser leur cible robotique jusque parvenir à atteindre la taille de l'insecte, c'est le cas du projet *Mesicopter* proposé par une équipe de recherche de l'Université de Stanford [Kroo and Kunz, 2001] (figure 1.43A). Ce micro-robot est un quadrirotor de très petite taille (cadre de 1.5 cm de côté) pour une masse de l'ordre du gramme, ce qui constitue une véritable prouesse de construction

micro-mécanique.

Enfin d'autres projets visent à reproduire un robot d'une taille similaire à celle de l'insecte, tout en s'inspirant d'un actionnement de type « aile-battante ». C'est le cas du *Micromechanical Flying Insect* (MFI) de Berkeley [Yan et al., 2001] (envergure : 2.5 cm, masse : 100 mg) ou encore du robot développé par l'équipe de Wood à Harvard (projet Robobee : [Wood, 2008, Duhamel et al., 2012, Sreetharan et al., 2012], masse : 60 mg, envergure : 3 cm) dont les deux ailes battantes sont actionnés par un actionneur piezo-électrique. Enfin, un autre ornithoptère ultra-léger (masse : 80mg, envergure : 3 cm) a été conçu et possède deux actionneurs piezo-électriques, chacun actionnant une aile permettant de contrôler indépendamment les trois degrés de liberté en rotation du robot [Ma et al., 2013] (figure 1.43C).

Une étude [Wu et al., 2003] vise à développer toute une suite de capteurs d'inspiration biomimétique (e.g., ocelle, capteurs de flux optique) pour ce type de robots. Cependant, ces trois derniers robots ne sont toujours pas achevés dans la mesure où ils ne transportent pas de capteurs et ne sont, à ce jour, pas capable d'effectuer de vol autonome.

VI.D Guidage visuel bio-inspiré par le flux optique en robotique

Après avoir étudié le système nerveux de l'insecte et défini comment il pouvait extraire les informations visuelles liées au mouvement, traité d'un état de l'art des capteurs de flux optique bio-mimétiques et des différentes plateformes de navigation en micro-robotique, nous décrivons ici un état de l'art des systèmes de navigation s'inspirant des études comportementales menées chez l'abeille depuis ces dernières décennies afin de bien saisir la part de plus value que ce travail de thèse pourra apporter, travail qui va consister à mettre en œuvre sur un aéroglisseur totalement actionné réel le pilote automatique LORA.

La problématique abordée par ce pilote automatique ne concerne que le contrôle sur le plan horizontal, nous nous limiterons alors uniquement à présenter les stratégies bio-inspirées vouées à contrôler la navigation dans ce plan. La présentation de la régulation du flux optique ventral dans la sous partie IV.B.1 n'a été mentionnée que par pure intérêt historique afin de bien comprendre les origines du *régulateur de flux optique*, qui figure comme notre base de travail dans le guidage d'un micro-robot en environnement inconnu.

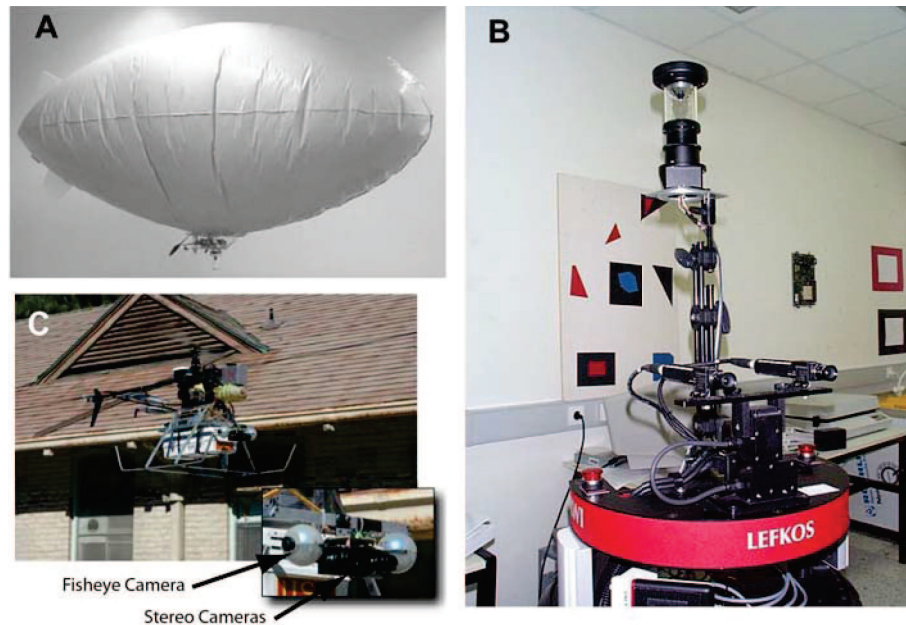


FIGURE 1.44 – Quelques robots intégrant la stratégie d'équilibrage des flux optique latéraux. (A) Le ballon dirigeable *Melissa* nécessite un ordinateur au sol pour effectuer les calculs du flux optique des 50×40 DEMs (corrélateur de Reichardt) issus d'une caméra CCD monté sur un miroir hyperbolique (champ visuel panoramique pour 100×80 pixels utilisés dans la perception du mouvement). (B) Robot à roue RWI B21r de CVRL équipé de son « œil » panoramique *Neuronics*. Ce robot utilise en complémentarité de la vision, un télémètre LASER qui permet d'augmenter la précision de navigation lors de l'évitement des obstacles qu'une méthode purement basé sur la vision. Afin d'effectuer le redressement de l'image, le calcul du flux optique dans plusieurs régions de l'image et la fusion avec le télémètre, le robot embarque deux Pentium III cadencés à 800 Mhz . (C) L'hélicoptère conventionnel AVATAR (*Autonomous Vehicle Aerial Tracking And Reconnaissance*) embarque deux caméras *fish-eye* latérales, deux caméras frontales pour la vision stéréoscopique ainsi qu'un altimètre LASER, une centrale inertielle ISIS, un GPS ainsi que deux ordinateurs (QNX PC6104+, NovAtel RT-2) pour le traitement des flux d'images provenant des caméras et pour la génération des commandes moteurs. Le robot n'est pas totalement autonome et nécessite un ordinateur au sol pour l'envoi des consignes de fonctionnement [Hrabar and Sukhatme, 2009]. (D'après [Iida, 2001, Argyros et al., 2004, Hrabar and Sukhatme, 2009].)

VI.D.1 La stratégie d'équilibrage des flux optiques latéraux

Depuis le début des années 90, la stratégie de pilotage basée sur l'équilibrage des flux optiques latéraux (partie IV.C.1) a amené une ligne directrice bio-inspirée dans le guidage visuel des robots et fut largement mis en œuvre sur un grand nombre de cibles robotiques terrestres [Coombs and Roberts, 1992, Santos-Victor et al., 1993, Duchon and Warren, 1994, Santos-Victor et al., 1995, Weber et al., 1997, Dev et al., 1997, Srinivasan et al., 1999, Baratoff et al., 2000, Carelli et al., 2002, Argyros et al., 2004, Hrabar et al., 2005, Humbert et al., 2007, Souhila and Karim, 2007, Hrabar and Sukhatme, 2009, Guzel and Bicker, 2010, Humbert and Hyslop, 2010, Xu et al., 2011] ou aériennes réelles (ballon dirigeable : [Iida, 2001], hélicoptère conventionnel : [Hrabar et al., 2005, Hrabar and Sukhatme, 2009], quadrirotor : [Conroy et al., 2009], aile fixe : [Griffiths et al., 2006, 2007], aéroglisseur sur patin : [Fuller and Murray, 2011]) ou encore simulées (aéroglisseur : [Humbert et al., 2005, Serres et al., 2008a], hélicoptère conventionnel : [Neumann and Bühlhoff, 2001, 2002, Muratet et al., 2005]) naviguant dans des tunnels ou des canyons urbains (figure 1.44).

Ainsi, rapidement après la formulation de cette hypothèse, de nombreux robots mobiles ont mis en œuvre cette stratégie de navigation couplée à une vitesse d'avance constante relativement faible (*bee-bot* : 10 cm.s^{-1} [Coombs and Roberts, 1992], *robee* : 8 cm.s^{-1} [Santos-Victor et al., 1993]). Cette stratégie fut néanmoins critiquée assez rapidement, en 1994, pour son incapacité à éviter les obstacles frontaux [Duchon and Warren, 1994]. Pour palier à cette limitation, ces chercheurs ont placé une caméra frontale sur leur robot (champ visuel : 65°) et ont subdivisé le champ visuel en deux parties latérales de manière à estimer le flux optique droit et gauche. Enfin, grâce à la mesure du flux optique d'expansion, ils calculent une grandeur supplémentaire : le *Time To Contact* (TTC) qui permet au robot de détecter la proximité d'un obstacle frontal et de l'éviter en tournant de 90° dans la direction du *TTC* le plus faible. Cependant, ce dernier avançait lui aussi à une vitesse constante relativement faible de 4 cm.s^{-1} . La raison de ces vitesses d'avance faible relève des techniques de calcul du flux optique qui était relativement longue.

Baratoff et al. [2000] a également adapté cette stratégie basée sur le *TTC* sur un robot mobile se déplaçant également à vitesse constante (20 cm.s^{-1}). Ces derniers sont parvenus parvenus à obtenir de bons résultats d'évitement d'obstacle frontaux mais ont critiqué la nécessité d'une haute résolution dans la partie centrale du champ visuel.

Weber et al. [1997] ont, à leur tour, mis en œuvre la stratégie d'équilibrage des flux optique latéraux sur un robot se déplaçant à vitesse constante (12 cm.s^{-1}). Ce dernier

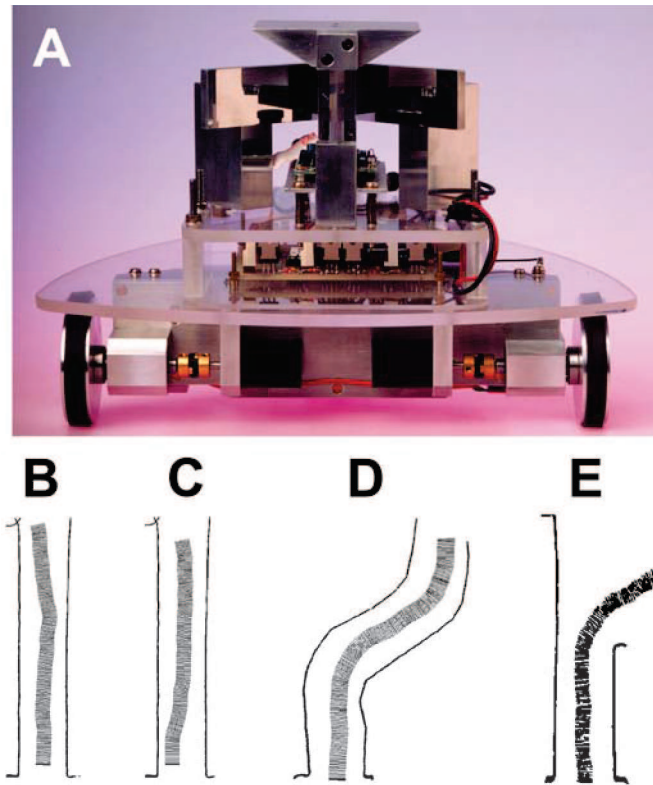


FIGURE 1.45 – (A) Vue frontale d'un robot mobile naviguant selon le principe de l'équilibrage des flux optiques latéraux. (B-D) Performance de navigation du robot effectuant un comportement de centrage dans diverses configurations de tunnels (largeur de ~ 80 cm à 100 cm). (E) Le robot est perturbé en présence d'une ouverture latérale, il se déstabilise et se précipite dans l'ouverture. (D'après [Weber et al., 1997, Srinivasan, 2011a]).

était équipé d'une caméra et d'un système de miroir permettant au robot de capturer des images provenant des régions latérales de son champ visuel. Les images étaient par la suite traitées par un ordinateur au sol qui générait les commandes en lacet adéquates de manière à équilibrer les flux optiques latéraux (figure 1.45).

Cependant toutes ces implémentations robotique proposent des solutions de navigation utilisant des systèmes visuels basés sur une caméra [Coombs and Roberts, 1992, Santos-Victor et al., 1993, Duchon and Warren, 1994, Santos-Victor et al., 1995, Weber et al., 1997, Srinivasan et al., 1999, Baratoff et al., 2000, Carelli et al., 2002, Argyros et al., 2004, Humbert et al., 2007, Souhila and Karim, 2007, Conroy et al., 2009, Guzel and Bicker, 2010, Humbert and Hyslop, 2010, Iida, 2001, Muratet et al., 2005, Humbert and Hyslop, 2010] ou plusieurs caméras (caméras fisheye + stéréoscopie : [Hrabar et al., 2005, Hrabar and Sukhatme, 2009]; deux caméras + réflecteur conique [Srinivasan et al., 1999]) nécessitant une grande puissance de calcul embarquée (e.g., deux processeurs Pentium III [Argyros et al., 2004], Pentium 1.8Ghz

[Guzel and Bicker, 2010]) ou déportée (e.g., [Coombs and Roberts, 1992, Weber et al., 1997, Iida, 2001, Carelli et al., 2002], station de traitement d'images VDS EidoBrain [Santos-Victor et al., 1995]) pour effectuer l'extraction du flux optique. D'autres utilisent une suite de capteurs assez conséquentes pour parvenir à contrôler la navigation (e.g., télémètre Laser [Argyros et al., 2004] ; pilote automatique Kestrel 2.2, télémètre Laser : [Griffiths et al., 2006, 2007]). Les tableaux 1.3&1.4 fournit un résumé de tout ces points.

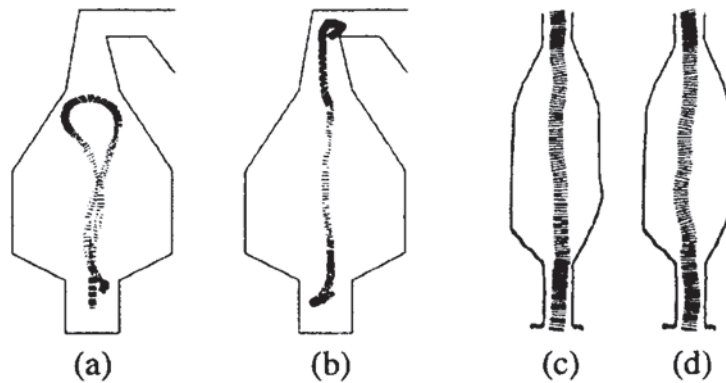


FIGURE 1.46 – Stratégie de contrôle de vitesse couplée à l'équilibrage des flux optiques latéraux dans la navigation d'un robot à roue. (A-B) Tests de navigation en environnement simulé et (C-D) réel. Les auteurs soulignent le problème d'utiliser uniquement l'équilibrage des flux optiques latéraux pour la navigation dans certaines configurations de tunnels (voir texte) où le robot peut apparaître perturbé lorsqu'il navigue dans de larges espaces (A-B). D'après [Weber et al., 1997]

De plus, la stratégie d'équilibrage des flux optiques latéraux rend le système qui l'embarque très sensible aux absences de mesures, « ouverture » ou tout simplement aux configurations de tunnel comportant un large passage. En effet, le robot, cherchant à équilibrer un flux optique faible provenant d'une zone dépourvue de texture, d'une ouverture ou de murs situés trop loin tend à déstabiliser le robot et à le précipiter dans l'ouverture [Weber et al., 1997, Humbert and Hyslop, 2010] (figures 1.45E&1.46).

VI.D.2 La régulation unilatérale du flux optique

Un moyen de contourner la sensibilité aux ouvertures a été de définir une stratégie de *suivi de paroi* provenant de la paroi texturée. Cette stratégie, couplée à une vitesse d'avance constante, a émergé afin de gérer la présence d'une ouverture latérale ou tout simplement une absence de texture. Le robot *robee* [Santos-Victor et al., 1995] (figure 1.47A), par exemple, détectait la présence d'une annulation du flux optique latérale et changeait d'une stratégie d'*équilibrage des flux optiques latéraux* vers une

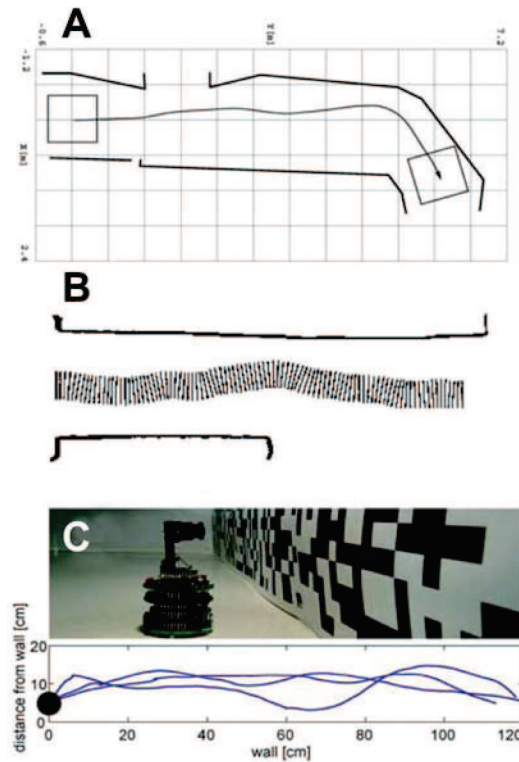


FIGURE 1.47 – Stratégie de suivi de paroi couplée à une vitesse d’avance constante. (A) Réaction du robot *robee* à une ouverture de type « porte » [Santos-Victor et al., 1995]. (B) Réaction d’un robot mobile à roue à une large ouverture [Weber et al., 1997]. (C) Suivi de paroi d’un robot *Khepera* dans une arène [Zufferey and Floreano, 2005]. D’après [Serres, 2008]

stratégie de *suivi de paroi*. Cette stratégie consistait à maintenir constant un flux optique *unilatéral* à vitesse constante. Le robot effectuait alors un suivi de paroi à une distance « pré-définie » par la vitesse maintenue constante. Cette stratégie fut utilisée sur plusieurs robots mobiles [Weber et al., 1997, Dev et al., 1997] et sur un robot *Khepera* [Zufferey and Floreano, 2005]. Ces derniers présentaient néanmoins des trajectoires plus ou moins oscillantes (figure 1.47B&C).

VI.D.3 Contrôle de la vitesse d’avance par une régulation bilatérale du flux optique

En termes d’applications robotiques, le contrôle de la vitesse d’avance, basé sur une régulation *bilatérale* inspiré des observations de Srinivasan et al. [1996] (partie IV.C.2), a été testé sur plusieurs robots [Santos-Victor et al., 1995, Weber et al., 1997, Srinivasan et al., 1999, Baratoff et al., 2000, Argyros et al., 2004] dans des tunnels rectilignes et fuselés. Cependant cette stratégie de contrôle de vitesse a été couplée à l’équili-

brage des flux optiques latéraux qui pose des problèmes de navigation dans certaines configurations de tunnels (figure 1.46). De plus, ces robots ne pouvaient pas naviguer avec une grande vitesse du fait de la lenteur des algorithmes d'extraction du flux optique.

VI.D.4 La stratégie de convergence visuo-motrice ou *Wide Field Integration*

Des recherches plus récentes, dirigées par l'équipe américaine de J.S. Humbert de l'Université du Maryland, proposent une boucle visuo-motrice basée sur la décomposition spatiale en série de Fourier du flux optique issu d'une mesure plan échantillonnant la totalité du champ visuel horizontal (aéroglesseur *sous-actionné* simulé : [Humbert et al., 2005], quadrirotor : [Conroy et al., 2009], robot à roue : [Humbert et al., 2007, Humbert and Hyslop, 2010, Xu et al., 2011]). Ce modèle de linéarisation de la réponse des neurones à large champ de la *lobula plate* (appelé *Wide Field Integration* - WFI - ou « Intégration à large champ »), linéarisé autour d'un pattern de flux optique correspondant à un *équilibre des flux optiques latéraux* et d'une fonction de « proximité » (*nearness function*) caractérisant l'environnement, permet d'estimer certains paramètres d'état, tel que la vitesse du robot, sa position ou encore son orientation (figure 1.48E).

Cette approche permet de construire un observateur d'état du système. En outre, un système visuel comportant beaucoup d'axes visuels s'avère nécessaire afin d'obtenir une estimation d'état exploitable. Ces robots embarquent donc une caméra, la plupart du temps, montée sur un miroir catadioptrique [Conroy et al., 2009] (figure 1.48A) ou parabolique [Humbert and Hyslop, 2010] (figure 1.48B), dotant le robot d'un champ visuel panoramique. Ce procédé reste cependant très coûteux en terme de ressources calculatoires (figure 1.48) et ne s'est limité, dans la littérature, qu'au comportement de centrage. Ce système de navigation reste cependant très sensible à une ouverture ou tout simplement à une absence de texture, ce qui entraîne une déstabilisation du robot qui s'engouffre dans l'ouverture [Humbert and Hyslop, 2010].

Plus récemment encore, Fuller and Murray [2011] ont mis en œuvre ce même système de navigation sur un « aéroglesseur » *sous-actionné* en contact avec le sol au moyen de patins. Il est doté d'un système visuel plan de 64 pixels disposé de manière concentrique (figure 1.49A). La perception du mouvement est basée sur le modèle du corrélateur de Reichardt. Cependant, cette mise en œuvre a soulevé une limitation, il s'est en effet avéré nécessaire d'utiliser la mesure d'un micro-gyromètre afin de lever

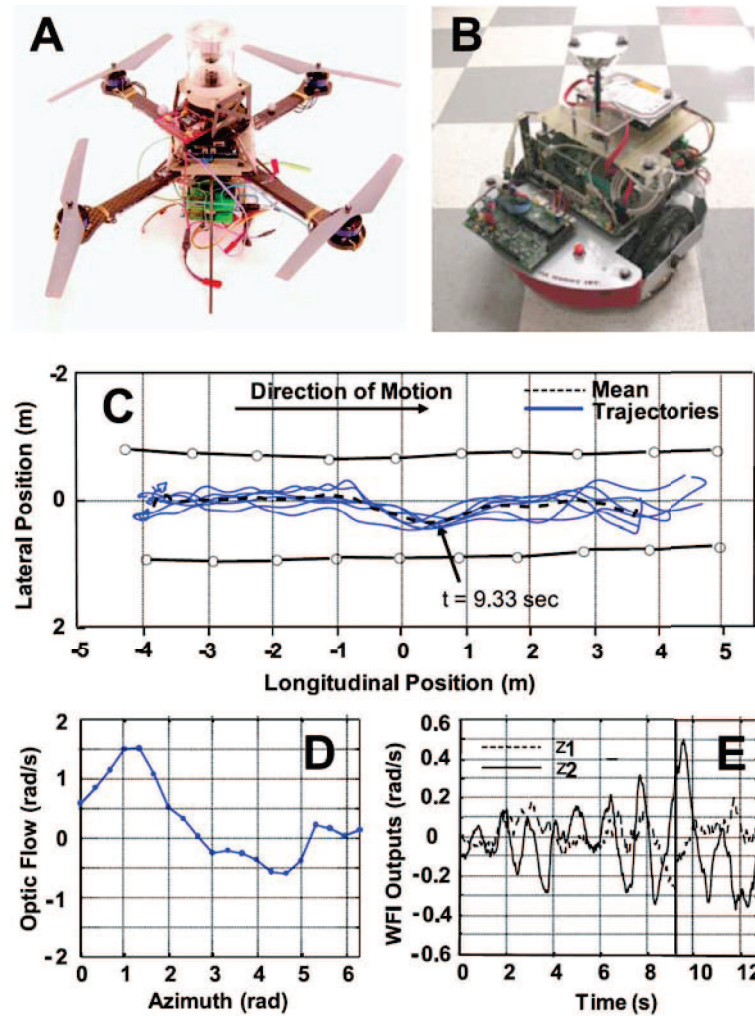


FIGURE 1.48 – Quadrirotor (A) et robot à roue non holonome basé sur un *Dr. Robot X80* (B). Ces robots sont totalement autonomes et embarquent un pilote automatique basé sur l'intégration à large champ du flux optique (*Wide Field Integration* (WFI)) afin de contrôler la position du robot aux obstacles. Une caméra, couplée à un système optique catadioptrique (A) ou parabolique (B), est utilisée dans les deux cas afin de pourvoir le robot avec un champ visuel panoramique. Le traitement visumoteur est embarqué mais nécessite une puissance de calcul élevée : un PC (AMD 1.3GHz) pour le robot à roue et un DSP Blackfin 500Mhz pour le quadrirotor. (C) Comportement de centrage obtenu par le quadrirotor dans un tunnel droit d'une dizaine de mètres de long. La vitesse est maintenue constante en conservant un angle de tangage constant. (D) Motif de flux optique obtenu lors de la traversée du quadrirotor montrant un équilibrage des flux optiques latéraux. (E) États estimés lors de la navigation, ces états dépendent de la position latérale aux murs et de la vitesse d'avance du robot. La connaissance de la vitesse permet au robot d'estimer sa position par rapport aux mur. (D'après [Conroy et al., 2009, Humbert and Hyslop, 2010]).

l'ambiguïté sur l'estimation de certains paramètres d'états nécessaires à la navigation. Mais encore, la navigation s'avérait peu robuste aux aspérités du terrain et le robot

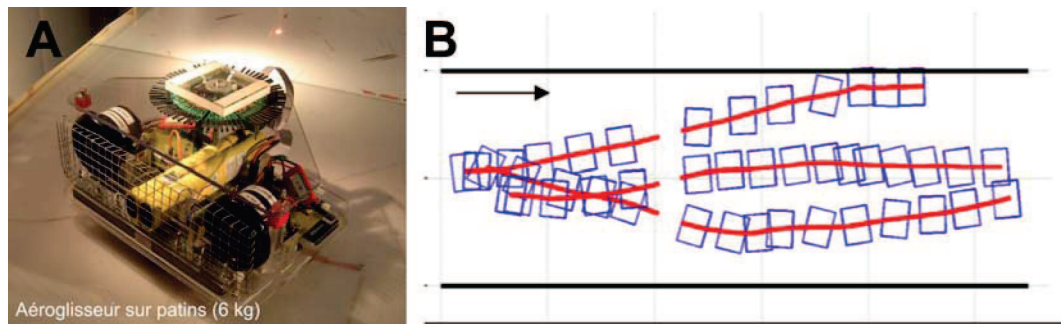


FIGURE 1.49 – Robot de type « aéroglesseur » *sous-actionné* en contact avec le sol au moyen de patins. Le robot embarque un système visuel constitué de 64 pixels et basé sur le corrélateur de Reichardt. La sensibilité angulaire gaussienne de chaque pixel est reconstruite de manière « logicielle » au moyen d'un ordinateur portable embarqué sur le robot. (B) Le robot navigue dans un tunnel droit en essayant d'adopter un comportement de *centrage*. (D'après [Fuller and Murray, 2011]).

présentait des trajectoires assez erratiques et peu répétables face à un comportement de centrage attendu (figure 1.49B).

Enfin toutes ces applications robotiques ne tiennent, pour la plupart, compte que d'un seul type de comportement observée chez l'abeille comme la réaction de centrage (ou tout au plus le contrôle de vitesse) et présentent un aspect bio-mimétique très limité en intégrant des équipements dont on peut douter qu'ils soient présent chez les insectes (e.g., altimètres et télémètres LASER, GPS, capteurs de pression). Les techniques utilisées dans le calcul du flux optique, la fusion multi-sensorielle opérée et la génération des commandes du robot font appel à des ressources calculatoires nécessitant un ou plusieurs ordinateurs embarqués ou déportés. À contrario l'insecte ailé ne possède que de faibles ressources calculatoires pour effectuer tout les « calculs » nécessaire à sa navigation (pour un bilan, voir les tableaux 1.3&1.4).

Les techniques d'approche abordées dans cette thèse vont au contraire laisser beaucoup plus de place au bio-mimétisme en ne se contentant pas que de reproduire « coûte que coûte » tout les comportements observés depuis ces dernières décennies (réaction de centrage, suivi de paroi, contrôle de vitesse) mais en essayant, au contraire, de coller au maximum avec les contraintes de faible ressources calculatoires d'une mouche ou encore d'une abeille. Ainsi, l'approche bio-inspirée qui va tenter d'intégrer un pilote automatique issu des études éthologiques menées chez l'abeille va aussi tenter de se rapprocher au maximum de l'aspect neurophysiologique observé dans le cerveau de la mouche pour le calcul du flux optique en proposant la conception de capteur de flux optique innovant et minimaliste (seulement quelques pixels) et de les intégrer à un robot afin de montrer qu'il est possible de « faire beaucoup avec peu ».

VII Nouveautés du projet de thèse par rapport à l'état de l'art

Ce travail de thèse décrit la mise en œuvre de l'hypothèse de *régulation du flux optique latéral* sur un aéroglisseur réel *totalelement actionné*. Cette plateforme robotique est intéressante de part l'aspect bio-mimétique de l'abeille qui possède elle-aussi une dynamique d'avance [Esch et al., 1975] et latérale [Ellington, 1984] découplée. Ce travail se détache totalement de celui de Julien Serres lors de sa thèse [Serres, 2008] qui n'a pu aborder les réelles contraintes de mise en œuvre d'un pilote automatique tel que LORA sur un robot réel. Son travail s'est arrêté à la simulation et n'a pas permis d'explorer toutes les facettes de l'intégration de LORA sur un aéroglisseur réel, ce que nous faisons ici. Ce travail permet d'étudier de manière plus complète la réelle faisabilité à mettre en œuvre le pilote automatique LORA sur un aéroglisseur. Ce travail a permis aussi d'enrichir l'état de l'art (partie VI) en matière de contrôle d'un aéroglisseur miniature basé sur le flux optique.

L'intégration du pilote automatique LORA sur un aéroglisseur miniature *totalelement actionné* vient parachever notre démarche de travail bio-inspiré en venant tester en conditions réelles notre hypothèse de navigation du contrôle du vol de l'abeille sur le plan horizontal, et permettre si possible un retour sur la biologie afin d'approfondir notre modèle de compréhension du traitement sensorimoteur intervenant chez l'insecte.

Nous nous sommes intéressés aussi à la conception d'un nouveau capteur de flux optique miniature (6 pixels, 5 DEMs), pesant moins d'un gramme (optique comprise) capable de mesurer une composante 1-D du flux optique selon cinq directions différentes dans une grande gamme de vitesse angulaire [$25 \text{ }^\circ \cdot \text{s}^{-1}$; $350 \text{ }^\circ \cdot \text{s}^{-1}$]. Ce capteur, destiné à être mis en œuvre sur des cibles robotiques à très faible charge utile, peut également déterminer la direction du mouvement dans une gamme de vitesse angulaire allant de [$-350 \text{ }^\circ \cdot \text{s}^{-1}$; $-80 \text{ }^\circ \cdot \text{s}^{-1}$] à [$+80 \text{ }^\circ \cdot \text{s}^{-1}$; $+350 \text{ }^\circ \cdot \text{s}^{-1}$]. Nous étudierons alors plus en détails les caractéristiques de réponse de ce capteur ainsi que la technique de fusion utilisée pour combiner les 5 DEMs en une seule sortie afin d'obtenir une mesure de la vitesse angulaire plus précise.

Enfin, nous avons fait un retour vers l'éthologie à travers des expérimentations, menées dans notre laboratoire, où nous avons étudié le contrôle de vitesse chez l'abeille *Apis Mellifera* volant dans un tunnel fuselé horizontalement et verticalement.

Plateforme	Comportements	Système visuel	Traitement à bord	Équipement à bord	Références
Robot à roues	Équ. FO Lat. ²	Caméra (2)	non	×	[Coombs and Roberts, 1992]
Robot à roues	Équ. FO Lat. + OF ³	Caméra	non	×	[Duchon and Warren, 1994]
Robot à roues	Équ. FO Lat. + Reg. U. ⁴	Caméra	non	×	[Santos-Victor et al., 1995]
Robot à roues	Équ. FO Lat. + CV ⁵	Caméra	non	×	[Weber et al., 1997]
Robot à roues	Équ. FO Lat. + OF	Caméra	NC	×	[Baratoff et al., 2000]
Ballon dirigeable	Équ. FO Lat.	Caméra (2)	non	×	[Iida, 2001]
Robot à roues Pioneer 2DX	Équ. FO Lat.	Caméra	non	×	[Carelli et al., 2002]
Robot à roues RWI B21r	Équ. FO Lat.	Caméra	oui	Télémètre LASER + 2 Pentium III 8000Mhz	[Argyros et al., 2004]
Aéroglesseur (Simu.)	Équ. FO Lat. + CV	×	×	×	[Humbert et al., 2005]
Robot à roues Khepera	Reg. U.	Caméra	oui	Gyromètre ADXRS150	[Zufferey and Floreano, 2005]

TABLEAU 1.4 – État de l'art des robots utilisant le flux optique dans la navigation (partie I).

Plateforme	Comportements	Système visuel	Traitement à bord	Équipement à bord	Références
Aile volante	Reg. U.	Capteur de souris optique ADNS2610 (18 × 18 pixels) × 3	oui	Télémètre LASER OptiLogic RS400, Kernel 2.2 ⁶ , GPS, capteurs de pression, Gyromètre 3 axes et Accéléromètre 3 axes	[Griffiths et al., 2006, 2007]
Quadrirotor	Équ. FO Lat.	Caméra	oui	BlackFin 500Mhz, capteur de flux optique VLSI ARZ-Lite Centeye, Sonar, Gyromètre	[Conroy et al., 2009]
Robot à roues RWI B21r	Équ. FO Lat.	Caméra	oui	Deux ordinateurs (QNX PC/140+ et)	[Hrabar and Sukhatme, 2009]
Robot à roues Pioneer 3DX	Équ. FO Lat. + OF	Caméra	oui	Pentium 1.8Ghz	[Guzel and Bicker, 2010]
Robot à roues Dr. X-Robot	Équ. FO Lat. + CV	Caméra	oui	AMD 1.3Ghz	[Humbert and Hyslop, 2010]
Aéroglesseur	Équ. FO Lat. + CV	Système annulaire 64 pixels	oui	Ordinateur portable	[Fuller and Murray, 2011]

TABLEAU 1.5 – État de l'art des robots utilisant le flux optique dans la navigation (partie 2).

Chapitre 2

Article I. A fully-autonomous hovercraft inspired by bees : wall following and speed control in straight and tapered corridors

Article publié en 2012 dans *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)* : pp. 1311–1318, Guangzhou, Chine.

Auteurs : Frédéric L. Roubieu, Julien Serres, Nicolas Franceschini, Franck Ruffier and Stéphane Viollet.

Comme nous l'avons vu précédemment, les recherches éthologiques chez l'abeille montrent que ces dernières sont capables de contrôler leur vitesse et leur position par rapport aux obstacles sur la seule base de la vision du mouvement : le flux optique (chapitre 1). Dans ce chapitre, nous traitons de la mise en œuvre robotique d'un pilote automatique directement inspiré des études comportementales menées chez l'abeille depuis ces dernières décennies. Le pilote automatique LORA (pour « Lateral Optic flow Regulation Autopilot ») constitue une hypothèse du contrôle du vol de l'abeille sur le plan horizontal. Ce principe de guidage basé sur le flux optique repose sur un *régulateur dual du flux optique latéral* permettant à un robot *totalelement actionné*, en l'occurrence un aéroglisseur miniature (figure 2.1), de contrôler sa vitesse et sa position aux obstacles dans un environnement inconnu sur la seule base du flux optique fournie par un système visuel élémentaire de quatre pixels (deux DEMs), inspiré lui aussi des insectes. Nous verrons, dans ce chapitre, les analogies comportementales entre le micro-robot et l'abeille sur le plan horizontal sans que le robot n'ait à aucun moment à *mesurer ou estimer ni sa propre vitesse ni sa distance par rapport aux obstacles*, c'est à dire *sans embarquer ni un tachymètre ni un télémètre laser*. Les résultats présentés dans ce chapitre permettent de franchir une première étape dans la

validité du modèle proposé intervenant dans le contrôle du vol sur le plan horizontal chez l'insecte.

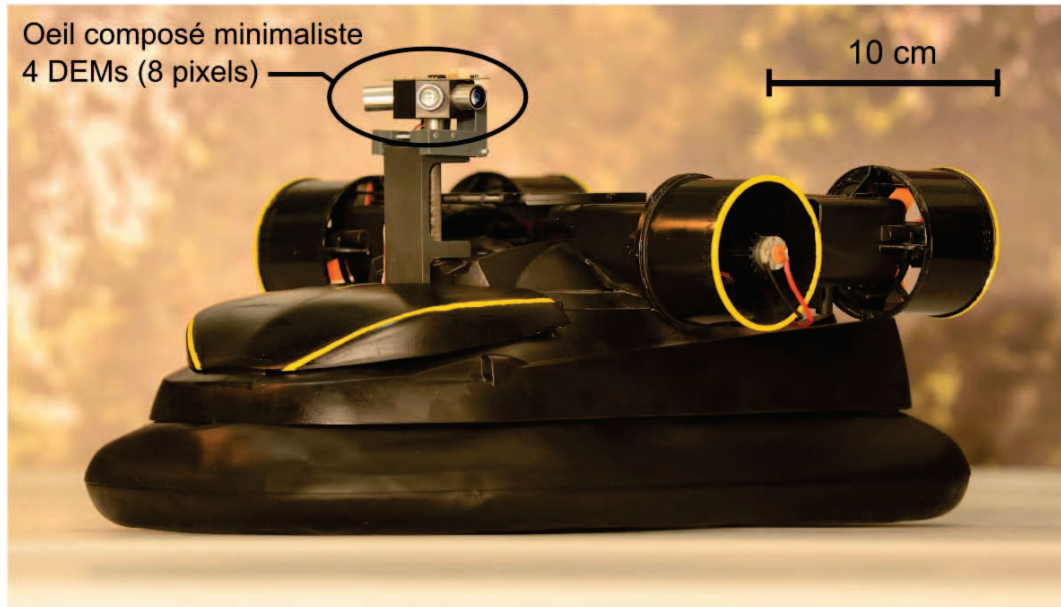


FIGURE 2.1 – Photographie du robot aéroglesseur totalement actionné doté de son œil composé minimaliste de 4 DEMs (directions azimutales : $\varphi_i = \pm 45^\circ$ et $\varphi_i = \pm 90^\circ$) mesurant le flux optique unidimensionnel dans quatre directions différentes.

A fully-autonomous hovercraft inspired by bees: wall following and speed control in straight and tapered corridors

Frédéric L. Roubieu, Julien Serres, Nicolas Franceschini, Franck Ruffier and Stéphane Viollet

Abstract—The small autonomous vehicles of the future will have to navigate close to obstacles in highly unpredictable environments. Risky tasks of this kind may require novel sensors and control methods that differ from conventional approaches. Recent ethological findings have shown that complex navigation tasks such as obstacle avoidance and speed control are performed by flying insects on the basis of optic flow (OF) cues, although insects' compound eyes have a very poor spatial resolution. The present paper deals with the implementation of an optic flow-based autopilot on a fully autonomous hovercraft. Tests were performed on this small (878-gram) innovative robotic platform in straight and tapered corridors lined with natural panoramas. A bilateral OF regulator controls the robot's forward speed (up to $0.8m/s$), while a unilateral OF regulator controls the robot's clearance from the two walls. A micro-gyrometer and a tiny magnetic compass ensure that the hovercraft travels forward in the corridor without yawing. The lateral OFs are measured by two minimalist eyes mounted sideways opposite to each other. For the first time, the hovercraft was found to be capable of adjusting both its forward speed and its clearance from the walls, in both straight and tapered corridors, *without requiring any distance or speed measurements, that is, without any need for on-board rangefinders or tachometers.*

I. INTRODUCTION

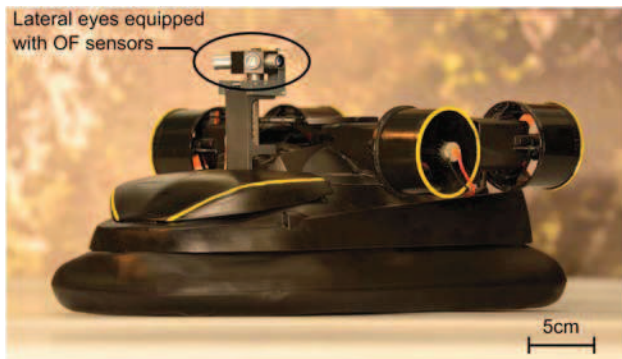


Fig. 1. Fully-autonomous sighted hovercraft equipped with miniature elementary eyes and a bio-inspired *dual lateral optic flow regulator*.

Winged insects, which emerged several hundreds of millions years ago, have developed elegant means of navigating in complex, highly unfamiliar environments. Their visually guided performances seem to depend mainly on Optic Flow (OF) cues, that is, on the angular speed ω (magnitude in

$^{\circ}/s$) at which any contrasting object moves past their eyes [1]–[4]. For example, insects have been found to use OF cues to control their lateral position in a corridor [3], [5] their ground height [6], [7], and their forward speed [8]–[10]. In insects' compound eyes, the OF is processed by neurons called Elementary Motion Detectors (EMDs), each of which is driven by photoreceptors with adjacent visual axes. Since OF sensors are non-contact, non-emissive - and therefore power-lean - visual sensors, they constitute invaluable tools for performing obstacle avoidance and speed control tasks, especially in the case of small autonomous robots, which have to meet particularly drastic energy and payload constraints. Behavioral studies on flying insects have provided researchers with innovative solutions for designing OF-based devices for the visual guidance of both ground vehicles [11]–[21] and aerial vehicles [18], [22]–[26]. Our previous simulation studies on the LORA III autopilot [20] were based on a *dual lateral optic flow regulator* controlling a simulated agent. The term *optic flow regulator* denotes a feedback loop which keeps the perceived OF at a constant value by adjusting one of the robot's thrusts [23]. The feedback sensor on which it is based is a 2-pixel OF sensor (called the Local Motion Sensor, - LMS -) based on a "time-of-travel" scheme [11], [27]–[31] which was originally inspired by the common housefly's EMD neurons [11], [12]. In Serres et al. [20] the simulated autopilot called LORA III, which was composed of a *dual lateral optic flow regulator*, was found to account not only for the typical *centering* behavior and speed control observed in honeybees flying in straight and tapered corridors [8], but also for the *wall-following* behavior that we recently described in honeybees [5]. Other robotic studies have dealt with OF-based guidance systems for underactuated and non-holonomic platforms, using either a *rolling* hovercraft [32]–[34] equipped with low friction rollerballs or a genuinely *contactless* hovercraft [35], [36] operating at a few millimeters above ground. Humbert et al. developed a simulated underactuated hovercraft [37] and an underactuated wheeled robot [21] equipped with a widefield camera, using a visual guidance system based on the spatial harmonic decomposition of the OF to estimate state parameters such as the forward speed and distance from obstacles. Zufferey et al. implemented an OF-based visual guidance system on a wheeled Khepera robot that showed *wall-following* behavior along a wall lined with a randomly generated highly contrasting pattern [38]: this sighted robot was equipped with a camera consisting of a 50-pixel 1-D array.

In the present study and for the first time, we implemented the LORA III *dual lateral optic flow regulator* onboard an original

Authors are with the Aix-Marseille University, CNRS, ISM UMR 7287, 13288, Marseille cedex 09, France {frederic.roubieu, julien.serres, nicolas.franceschini, franck.ruffier, stephane.viollet}@univ-amu.fr

vehicle, that is, a miniature and fully actuated hovercraft (Fig. 1) equipped with two eyes mounted on opposite sides, each of which comprised only 2 pixels driving a single OF sensor, i.e. a single 2-pixel LMS. The hovercraft’s visually-guided behavior was then tested in corridors lined with natural scenes. An additional heading-lock feedback loop was also implemented to prevent any yaw rotations of the robot, and hence cancelling any rotational OF disturbances. This innovative robotic platform is presented in section II. In section III, the original implementation of the *dual lateral optic flow regulator* onboard the hovercraft is described in detail. Section IV deals with the control strategy used in the robotic platform and describes the dynamic identification of the robotic platform used to tune the hovercraft’s controllers. In section V, the experimental set-up used to test the robot’s behavior is presented. Section VI gives the experimental results obtained with the actual physical robot equipped with the LORA III autopilot.

II. THE LORA HOVERCRAFT ROBOT

A. The robotic platform

Our sighted LORA robot is a retro-fitted version of a miniature RC hovercraft (Taiyo Toy LtD, Typhoon T-3) [35]. The miniature LORA robot (mass: 0.878kg, size: 0.36x0.21x0.17m, see Fig. 1) is fully actuated by means of four ducted fans (GWS EDF-50, DC motor CN12-RLC, mass: 30g) driving it on the horizontal plane. The two rear thrusters actuate the robot along the surge axis, the two lateral thrusters actuate the robot along the sway axis, and the robot’s heading is adjusted by controlling the two rear thrusters differentially. An additional lift fan (a brushless motor Micro Rex 220/3-3200 Flyware fan, mass: 11g) inflates the skirt to create an air-cushion preventing the robot from touching the ground. The vehicle is naturally stable in terms of the pitch and roll and the very low friction coefficient and the number of degrees of freedom in the horizontal plane are similar to those of an aerial robot (a helicopter, for instance).

B. The bio-inspired visual system

Here we describe how the LORA robot navigates over a flat surface along a corridor (Fig. 5 and Fig. 4). The robot is equipped with four lateral eyes, i.e. four 2-pixel OF sensors placed at $\pm 45^\circ$ and $\pm 90^\circ$ azimuthal angles, as shown in Fig. 1. Only the two lateral eyes facing at azimuthal angles of $\pm 90^\circ$ are used here. To compensate for any yaw disturbances that would introduce an adverse rotational OF component into the angular speed measurements (ω^m), the robot is equipped with a custom-made heading-lock system composed of a micro-gyrometer (ADIS16100, range speed: $\pm 300^\circ/s$, size 7x7x3mm, mass: 0.5g) and a micro-compass (HMC6052, precision: 0.3° , size: 24x18mm, mass: 2g). The robot’s heading Ψ , defined as the robot’s yaw angle around the vertical axis, is therefore maintained along the X-axis of the corridor ($\Psi = 0^\circ$). Each of the two lateral eyes therefore receives a purely translational OF (Fig. 5) ω_R and ω_L defined as follows:

$$\omega_{R,L} = \frac{V_x}{D_{R,L}} \quad (1)$$

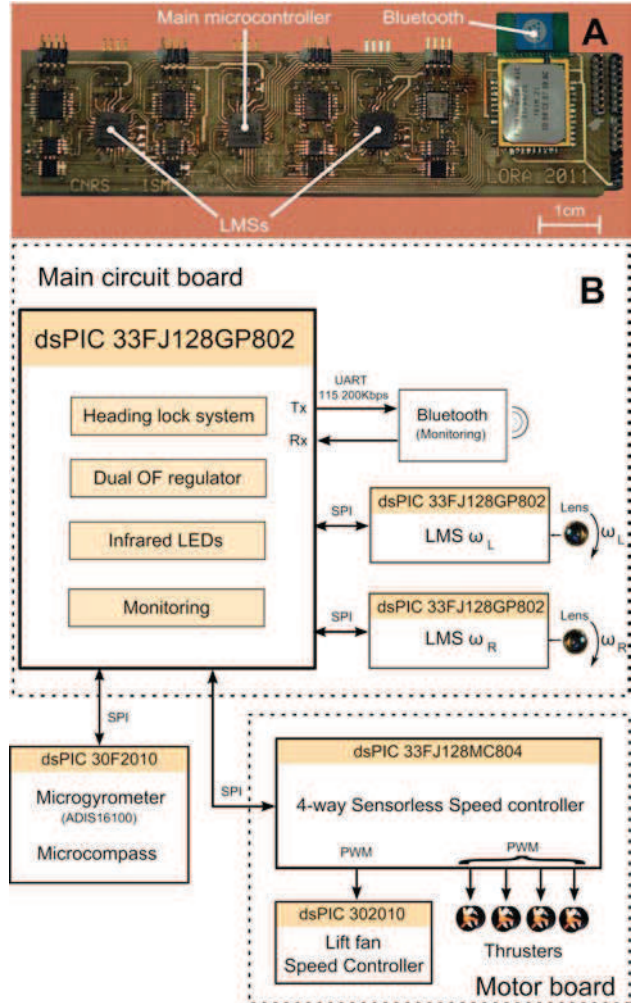


Fig. 2. Custom electronics: (A) Top view of the microcontroller-based (μC) circuit board (size: 109x25mm, mass: 8g) including the embedded optic flow-based autopilot and visual LMSs. (B) Simplified scheme of the embedded electronics, showing the interconnections between the 6 tiny μC s.

where V_x is the robot’s forward speed, D_R and D_L are the distances from the right and the left walls, respectively. Each of the two OF sensors consists of an optical assembly composed of a lens and a pair of photosensors driving a single LMS running the “time of travel” scheme (see [11], [27]–[31] for further details). Each 2-pixel LMS measures the angular speed ω^m , i.e. a 1-D component of the OF, generated by the robot’s forward motion within a range of more than one decade [$25^\circ/s$; $350^\circ/s$]. Whenever an LMS does not detect any new contrasting features, it holds the last measured value for a period of 0.5s.

C. Hardware architecture

A photograph of the main electronic board is shown in Fig. 2A. The digital electronics embedded in this electronic board are the main microcontroller (- μC - dsPIC33FJ128GP802, clock: 40Mhz, working at a sampling frequency of 1kHz) supervising two other dsPIC μC s from

Microchip© (dsPIC33F128GP802, clock: 40Mhz, working at a sampling frequency of 2kHz) (Fig. 2B). The program of the main μC was developed on Matlab/Simulink© and compiled using a specific toolbox (available on <http://www.kerhuel.eu>) dealing with multirate tasks such as: the heading-lock control system, the *dual optic flow regulator*, and the data monitoring during the main tasks (Fig. 2B). On the main electronic board, the two secondary μCs (dsPIC33FJ128GP802) are in charge of the lateral OF processing (one μC per eye). The main dsPIC therefore processes the visual inputs (i.e., the two OF measurements ω_L^m and ω_R^m), the inertial input (i.e., the rate gyro $\dot{\Psi}^m$) and the vehicle's heading (i.e., the custom micro-magnetic compass Ψ^m). The Bluetooth device connected to the UART peripheral of the main μC provides a full-duplex radio link between the robot and the C#-PC (C sharp) ground station. Via this radio link, data from the freely moving robot can be remotely logged and instructions such as the OF set-points, ω_{SetFwd} and $\omega_{SetSide}$, can be sent to the robot's autopilot, for example. Two separate Li-Polymer (LiPo) battery packs: a low-power pack (i.e., 7.2V-360mAh, size: 54x31x7mm, mass: 20g) for the electronics and a high-power pack (i.e., 7.2V-2200mAh, size: 21x33x96mm, mass: 112g) for the actuators give the robot an autonomy of 10 minutes. To prevent the rotor speed of the ducted fan to be affected by variations in the supply voltage, the first μC (dsPIC33FJ128GP802, clock: 40Mhz) of the motor board controls each of the four propeller's rotational speeds (rpm) in a closed-loop mode on the basis of a dedicated "sensorless speed governor" [39]. This sensorless regulator makes each ducted fan rpm robust to large voltage disturbances while preserving the short rise time. The second μC in the motor board controls the lift fan rpm in a closed loop mode via an optical sensor. Making the robot robust to voltage disturbances was a prerequisite for identifying the system before closing the visuo-motor loops. The LORA robot moves freely without any umbilical links. It is fully autonomous as it performs all the processing steps onboard and carries all its sensors and actuators, its own wireless data link and its own power supplies. To summarize, the 6 micro-controllers distributed in the LORA robot handle no less than 8 feedback-loops and make the robot relatively immune to heading disturbances and power supply variations.

III. DUAL LATERAL OPTIC FLOW REGULATION

A slightly upgraded version of the original LORA III autopilot [20] was implemented onboard the current LORA robot. In addition to the *dual lateral OF regulator*, another feedback loop was introduced to make the robot move straight along the corridor axis. The autopilot therefore controls the robot's motion not only forward and sideways but also about the yaw axis, according to the following principles:

- the heading feedback loop, composed of an inner- and an outer-feedback loop, stabilizes the robot's yaw angle at $\Psi = 0^\circ$ to cancel any yaw drift. It therefore keeps the robot aligned with the corridor's main axis thanks to a custom-made magnetic micro-compass enhanced by a tiny micro-rate gyro;

- the first *OF regulator* is a unilateral *OF regulator* that adjusts the vehicle's lateral thrust (which determines the sway speed V_y) so as to keep the higher of the two lateral OFs perceived, that is, $\max(\omega_{R,L}^m)$, equal to the *sideways OF set-point* $\omega_{SetSide}$. The distance from one wall thus becomes proportional to the robot's forward speed V_x (as defined in the section 2B). The faster the robot travels, the further away from that wall it will therefore be. The clearance from the walls depends mainly on the *sideways OF set-point*;
- the second *OF regulator* is a bilateral *OF regulator* that adjusts the robot's forward thrust (which determines the surge speed V_x) so as to maintain the sum of the two (right and left) OFs, that is, $\Sigma\omega_{R,L}^m$, equal to the *forward OF set-point* ω_{SetFwd} . The robot's forward speed therefore automatically adjusts itself proportionally to the local corridor width D , although the latter is not specified explicitly. The forward speed attained by the LORA robot will depend mainly on the *forward OF set-point*.

All three feedback loops are implemented in parallel on the μC of the main circuit board. Once the OF-based autopilot has reached the steady state, the LORA robot will travel at a given forward speed V_x and at a given distance from one wall (D_L or D_R). The steady state operating point of the LORA robot ($V_{x,\infty}$, $D_{R,L,\infty}$) is defined in [20].

IV. DYNAMIC MODEL AND CONTROL OF THE HOVERCRAFT

Each of the four thrusters equipping the LORA robot is composed of a DC motor loaded with a light three-blade propeller producing a thrust of up to 0.72N at 7.2V, in proportion to the voltage applied [36]. Since the propeller's profile is not symmetrical and reversing the thrust would therefore not brake the robot, the lift-fan was used to smoothly deflate the skirt, as suggested in [36], and thus served as a "brake". This active braking is achieved by combining the control signals of the rear thrusters and those of the lift fan $u_{LiftFan}$ in a single controller (the forward controller $C_{Fwd}(s)$). Any decrease in the lift fan control signal $u_{LiftFan}$ will increase the robot's forward and side linear viscous friction coefficients (ζ_{Fwd} and ζ_{Side} respectively with $\zeta_{Fwd,Side} = \frac{m}{\tau_{Fwd,Side}}$), and thus decrease both the forward and side time constants τ_{Fwd} and τ_{Side} . We therefore identified the forward and side dynamics of the hovercraft ($G_{Fwd}(s)$ and $G_{Side}(s)$ respectively) corresponding to several lift fan output signals $u_{LiftFan}$. In the lift fan control signal range of [37%;42%], the forward and side dynamic models of our hovercraft can therefore be described as a first-order low-pass filter with a time constant $\tau_{Fwd,Side}$, but the side dynamic model of the robot also requires an integrator since the output is a position. The yaw dynamic model $G_\Psi(s)$ can be described as a low-pass filter also incorporating an integrator (see Tab. I). Static gain and time constant parameters of the identified forward and side dynamics corresponding to each control signal $u_{LiftFan}$ are given in Tables II and III, respectively. Data of the robot's identification show that the surge and sway time constants (τ_{Fwd} and τ_{Side} respectively) are on the same order of magnitude because the air cushion

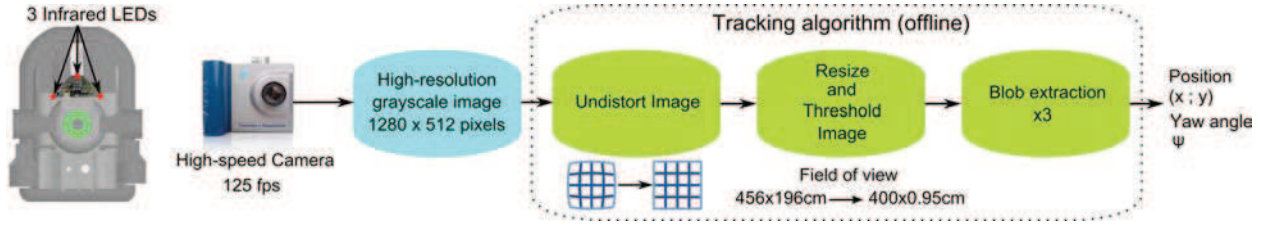


Fig. 3. Block diagram showing the image processing performed on the robot’s trajectories along a corridor. A wide-angle lens (Pentax B618DX, focal length: $6.5mm$, Field of View - FOV - : $97.91 \times 76.28^\circ$) was used to film the 4-meter long corridor. The camera FOV was adjusted to $456cm$ in length and $196cm$ in width, and centered on the corridor, to film the whole scene. Each trajectory recorded was saved on a computer via Midas© 4.0 Express (for Fastec cameras) and processed offline on a computer equipped with Matlab© R2008b for image processing. The robot’s trajectories were recorded by adding an infrared filter (wavelength $\geq 850nm$) to the camera. Three infrared photodiodes (SFH4050, half angle $\pm 80^\circ$) were mounted at triangular points on the robot so that only LED blobs showed up on the image. The robot’s trajectory was reconstructed with a custom-made Matlab© algorithm that analyzed sequential video frames offline. This algorithm first corrected the barrel distortion induced by the wide-angle lens via a camera calibration procedure, using “Camera Calibration Toolbox” (www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib.doc) for Matlab©. The image was then resized and thresholded so that only the blobs corresponding to the infrared LEDs showed up, and each blob position was recorded. The LORA robot’s position was measured from the barycenter of the three blobs, whereas the orientation of the LED triangle gave the robot’s orientation with respect to the X-axis of the corridor.

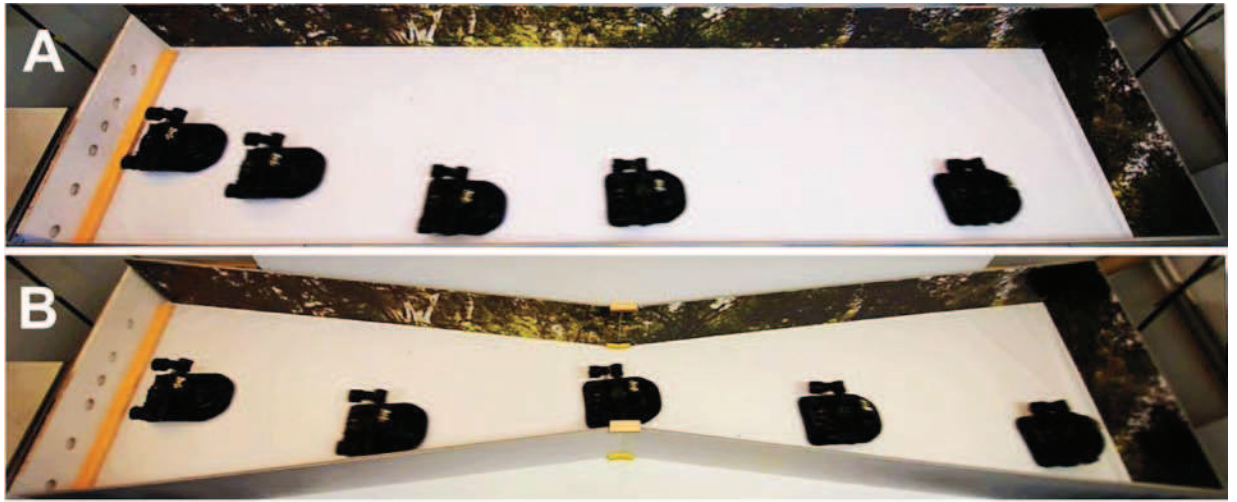


Fig. 4. Chronophotography of the LORA robot equipped with its OF-based autopilot (see Section III) in (A) a straight (1.12-second time interval) and (B) a tapered corridor (1.83-second time interval) lined with natural colored scenes. The autonomous fully actuated LORA robot entered the corridor without being informed about the width or configuration of the corridor and therefore operated in (A) and (B) a *wall-following* behavior.

of the hovercraft is homogeneous at any point under the robot, involving the forward and side linear viscous friction coefficients $\zeta_{Fwd,Side}$ to be therefore on the same order of magnitude at any point under the air cushion.

Dynamic identification of the hovercraft enabled us to tune the appropriate controllers for the heading feedback loop and the OF-based autopilot’s two visuo-motor feedback loops [20]. A proportional-integral (PI) controller $C_{Fwd}(s)$ was introduced into the forward feedback loop to improve the closed-loop dynamics and obtain a zero steady-state error. The error signal ε_{Fwd} feeding the forward controller is calculated as follows:

$$\varepsilon_{Fwd} = \omega_{SetFwd} - \sum \omega_{R,L}^m \quad (2)$$

According to the sign of the output control signal of the forward controller, the robot can therefore:

- accelerate by controlling the rear thrusters in the $]0; 60\%$ range (Pulse Width Modulation control signal) and $u_{LiftFan}$ to its maximum value of 42%;

- “brake” by switching off the rear thruster and by decreasing $u_{LiftFan}$ in the identified range of $[37\%; 42\%]$.

A lead integrator $C_{Side}(s)$ was introduced into the side feedback loop to increase the damping, thus improving the stability and the sway dynamics. The error signal ε_{Side} is calculated as follows¹:

$$\varepsilon_{Side} = \text{sgn}(\omega_L^m - \omega_R^m) \times \omega_{SetSide} - \max(\omega_{R,L}^m) \quad (3)$$

Only one lateral thruster is actuated at a time according to the sign of the output control signal of the side controller:

- the left thruster is actuated and the right one is off;
- the right thruster is actuated and the left one is off.

As regards the heading-lock system, a proportional controller H_c was included in the outer feedback loop (based on the magnetic micro-compass) and a PI controller in the inner feedback loop (based on the micro-gyrometer) to improve the closed-loop dynamics and obtain a zero steady-state error,

¹Mistake, “ $\text{sgn}(\omega_L^m - \omega_R^m)$ ” was forgotten in the published version.

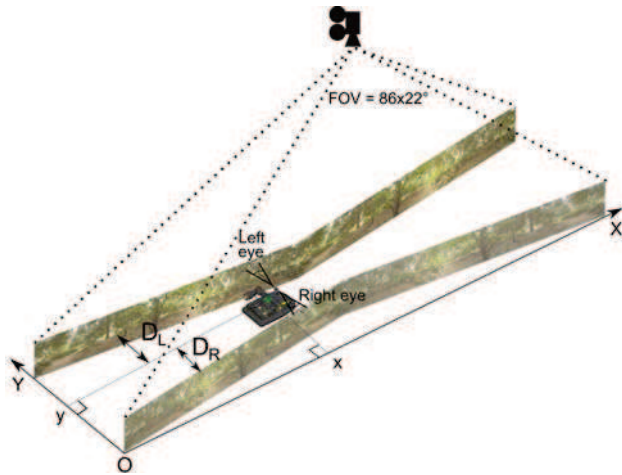


Fig. 5. The tapered corridor consisted of a 400-cm long corridor with a relatively wide entrance (95cm) and with a 46-cm wide constriction located midway, the lateral walls of which were lined with photographs of natural colored scenes (trees and bushes). A high-speed camera equipped with a wide-angle lens (angle of view of the corridor imaged by the camera: $86 \times 22^\circ$) placed 209cm above the corridor filmed the whole scene at a rate of 125 fps. The high-speed camera was carefully calibrated and equipped with an infrared filter to record the trajectory of the robot via 3 infrared LEDs mounted at triangular points at the top of the robot.

thus locking the robot's heading to the X-axis of the corridor (see Fig. 5 and Fig. 4). All the transfer functions presented in this section are summarized in Table I. The vision-based autopilot controls the LORA robot at a sampling frequency of 100Hz.

V. EXPERIMENTAL SET-UP

To assess the performances of the LORA robot, we built two types of environment: a straight, 0.92-meter² wide, 4-meter long corridor (Fig. 4A), and a tapered 4-meter long corridor (tapering angle: 7°) (Fig. 4B) with a 0.92-meter² wide entrance and a 0.46-meter wide constriction located midway. All the corridor walls were lined with natural colored scenes showing trees and bushes, the rich texture of which favored a high refresh rate in the OF sensors' measurements [30]. The experiments were carried out indoors under artificial lighting conditions. A high-speed (125 fps), high-definition (1280 x 512 pixels) digital camera (a Fastec Imaging TroubleShooter camera) and equipped with an infrared filter was placed on a rigid mount 2.09m above the ground (Fig. 5) and was used to record the robot's trajectories (Fig. 3).

VI. EXPERIMENTAL RESULTS

All the results obtained in this study correspond to tests performed on the actual physical robot LORA. It is worth mentioning that the LORA robot is never provided with any explicit information about either its current forward speed V_x , its current distance from the walls D_R or D_L , the local corridor width D or any informations about the corridor configuration. Fig. 6³ shows the trajectory of the LORA robot

²Typography error, initially published as "(...) 0.95-meter (...)"

³Mistake of the width value of the corridor in the published version, the correct width is 0.92-meter.

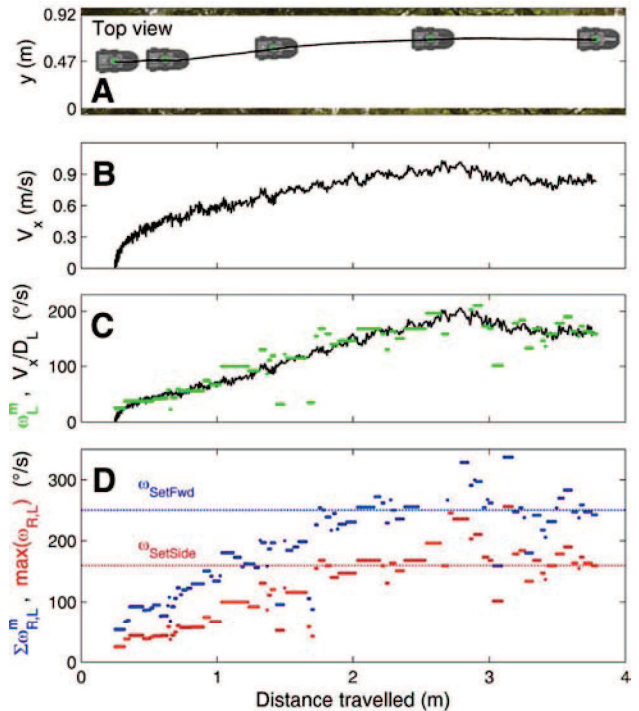


Fig. 6. Detailed example of the automatic wall-following behavior observed with the autopilot based on the dual optic flow regulation. The LORA robot started at the center of a straight corridor with $\omega_{SetFwd} = 250^\circ/s$ and $\omega_{SetSide} = 160^\circ/s$ OF set-points. (A) Recording of the robot's trajectory in the horizontal plane (Marks on the trajectory indicate the robot's position every 1.6 seconds). (B) Forward speed profile V_x corresponding to the trajectory shown in (A). (C) Superimposition of the actual OF generated by the robot's own motion, as computed from equation 1 (black solid line) and the OF measured by the left LMS ω_L^m (green dash-dotted line). The quality of the LMS output signal ω_L^m was virtually the same as the actual OF computed in (C). (D) The bilateral OF regulator strives to maintain the sum of the measured lateral OF $\Sigma\omega_{R,L}^m$ (red dash-dotted line) equal to the forward OF set-point ω_{SetFwd} (red dotted line). Jointly to the bilateral OF regulator, the unilateral OF regulator strives to maintain the higher of the maximum lateral OF measurement $\max(\omega_{R,L}^m)$ (red dash-dotted line) to the sideways OF set-point $\omega_{SetSide}$ (red dotted line). In the steady state, which was reached only in the second half of the corridor, the robot attained a forward speed $V_{x\infty} = 0.9m/s$ while maintaining a constant clearance $D_{L\infty} = 30cm$ from the left wall (wall-following behavior).

gliding safely along a straight corridor, with the following set-points: $\omega_{SetFwd} = 250^\circ/s$ and $\omega_{SetSide} = 160^\circ/s$. Marks on the trajectory (Fig. 6A) show that the robot automatically accelerated and stabilized its forward speed in the steady state, which was reached only in the second half of the corridor as shown in Fig. 6B. The sideways OF regulator strived to maintain the maximum measured lateral OF, that is, $\max(\omega_{R,L}^m)$ (Fig. 6D, red dash-dotted line), at a constant value corresponding to the sideways OF set-point $\omega_{SetSide}$ and jointly the forward OF regulator strived to maintain the sum of the measured lateral OF, that is, $\Sigma\omega_{R,L}^m$ (Fig. 6D, blue dash-dotted line), to the forward set-point ω_{SetFwd} . This made the LORA robot glide safely at a constant clearance D_L from the left wall and at a constant speed V_x in the second half of the corridor. In Fig. 6C, one of the two output signals (ω_L^m , green dotted line) feeding the autopilot was virtually

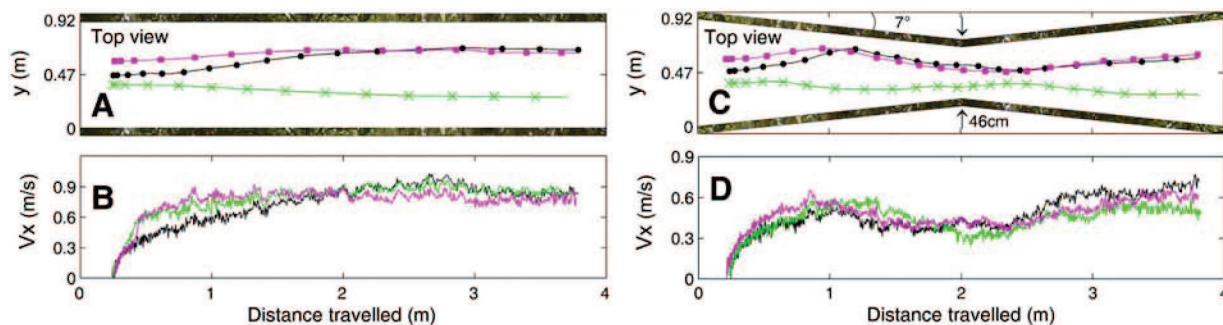


Fig. 7. Automatically safe *wall-following* behavior in both straight and tapered corridors with no informations supplied about the corridor configuration (corridor width D or tapering angle for instance). This behavior occurs whenever $\omega_{SetSide} > \frac{\omega_{SetFwd}}{2}$. The forward OF set-point was $\omega_{SetFwd} = 250^\circ/s$ and the sideways OF set-point was $\omega_{SetSide} = 160^\circ/s$ (Marks on trajectories indicate the robot's position every 0.4 seconds). (A) Actual *wall-following* trajectories of the LORA robot in a straight corridor with three different starting positions. (B) Forward speed profiles corresponding to the trajectories shown in (A). In all three cases, the forward speed reached $0.9m/s$ in the steady state, with a clearance of $0.31m$ from one wall. (C) Actual *wall-following* trajectories of the LORA robot in a tapered corridor (tapering angle: 7°) with three starting positions. (D) Forward speed profiles corresponding to the trajectories shown in (C). Results show the LORA robot automatically adjusts its speed with the corridor width while preserving a safe clearance to one wall.

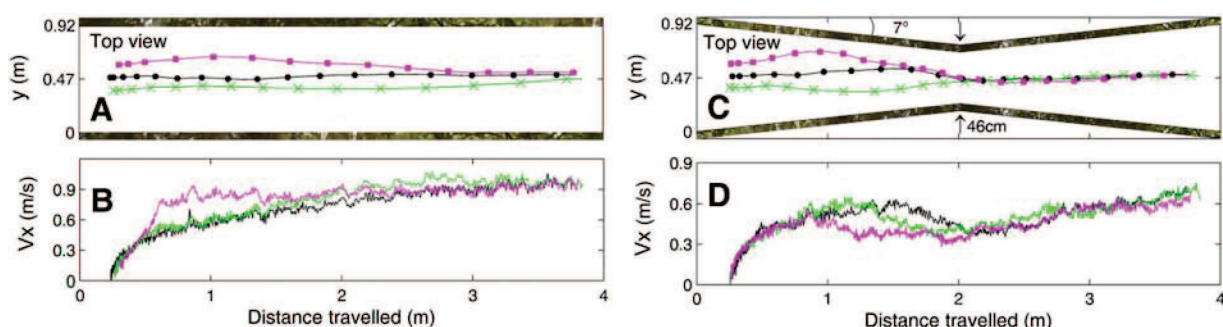


Fig. 8. Automatic *centering* behavior in both straight and tapered corridors with no information about the tapering angle. This is a particular case of the *wall-following* behavior, which occurs whenever $\omega_{SetSide} \leq \omega_{SetFwd}/2$. The forward OF set-point here was $\omega_{SetFwd} = 250^\circ/s$ and the sideways OF set-point was $\omega_{SetSide} = 125^\circ/s$ (Marks on the trajectories indicate the robot's position every 0.4 seconds). (A) Actual *centering* trajectories taken by the LORA robot along a straight corridor with various starting positions. (B) Forward speed profiles corresponding to the trajectories shown in (A). In the steady state, the forward speed reached $0.9m/s$ in all three cases. (C) Actual *centering* trajectories taken by the LORA robot along a tapered corridor (tapering angle: 7°) with various starting positions. (D) Forward speed profiles corresponding to the trajectories shown in (C). The trajectories recorded in both the straight and tapered corridors show that in the steady state, the LORA robot automatically adjusted its forward speed and navigated safely along the centre of the corridor (*centering* behavior).

the same as that of the actual OF value ($\frac{V_x}{D_L}$, black solid line) computed from equation 1, which confirms the accuracy of the OF measurements. Figures 7³ show real trajectories along a straight (Fig. 7A) and a tapered corridor (Fig. 7C) (tapering angle: 7°) with $\omega_{SetFwd} = 250^\circ/s$ and $\omega_{SetSide} = 160^\circ/s$ set-points. The LORA robot navigated safely and followed one of the two walls, regardless of its initial position y_0 at the entrance to the corridor. Whether in a straight (Fig. 7A) or tapered (Fig. 7C) corridor, the robot ended up by following either the right or the left wall in the steady state, depending on its initial ordinate y_0 . These trajectories are typical of the *wall-following* behavior observed. The robot's speed profiles in the straight and tapered corridors (Figs. 7B and 7D) show that the LORA robot consistently adjusted its forward speed V_x to the local corridor width D . The LORA robot typically slowed down when the local corridor width decreased and speeded up when it widened out after the constriction. Fig. 8³ shows real trajectories along a straight corridor (Fig. 8A) and a tapered corridor (Fig. 8C) (tapering angle: 7°) with $\omega_{SetFwd} = 250^\circ/s$ and $\omega_{SetSide} = 125^\circ/s$ set-points. The LORA robot navigated

safely regardless of its initial position y_0 at the entrance to the corridor. In both cases, the robot ended up by following the right and left walls alternately: all these trajectories typical of the *centering* behavior were exactly as expected in [5]. The forward speed V_x (Figs. 8B and 8D) can be seen to have been proportional to the local corridor width D , as occurred with both our simulated LORA robot [20] and honeybees [8].

VII. CONCLUSION AND FUTURE WORKS

Insect-inspired visuo-motor control systems can suggest robotic solutions requiring a much fewer pixels than the present-day mobile robots harnessed to computer-vision systems. Here we describe the physical implementation of an elementary insect-inspired autopilot on a miniature fully actuated hovercraft (mass: 878g, size: $0.36 \times 0.21 \times 0.17m$ - see Fig. 1A). This autopilot was based on the *dual lateral optic flow regulation* principle. The results obtained confirm the validity of our previous computer-simulated experiments [20]. The autopilot causes the robot to automatically adjust its forward speed V_x to the local width D of the corridor, while

ensuring a safe clearance (D_R or D_L) from the walls, in line with honeybees' behavior in similar situations [3], [5], [8]. As long as the surrounding walls are textured, LORA's minimalist visual system, comprising only 4 pixels, enables the robot to navigate safely along an unknown straight or tapered corridor without being informed about its own speed, its distance from the walls, the corridor's width, or the tapering angle in the case of the tapered corridor (see Section VI). This vision-based autopilot therefore needs to measure (or estimate) neither the robot's speed (contrary to [21], [24], [25], [34], [37]) nor its clearance from the walls (contrary to [21], [34], [37]). An autopilot of this kind obviously generates major savings in terms of the onboard avionics and data processing requirements, which may explain why this OF-based guidance system matches insects' limited processing resources. In addition, the OF-based autopilot presented in this study enables the LORA robot to autonomously perform various tasks such as *wall-following* (Fig. 7) and *centering* (Fig. 8) without having to switch abruptly from one strategy to another. Whether the robot follows a wall or centers depends purely on the values of the two OF set-points ω_{SetFwd} and $\omega_{SetSide}$. The results obtained here show that a fully actuated ground vehicle equipped with an autopilot based on the *dual lateral optic flow regulation* principle may explain the result of recent behavioral experiments showing that honeybees do not necessarily center when travelling along a corridor [5]. The honeybee's *wall following* behavior is quite different from that which has inspired many robotic researchers [13]–[18], [21], who focused on the classical honeybee's *centering* behavior observed by Srinivasan and Colleagues [3], [8], which they explained quite differently in terms of an 'optic flow balance' hypothesis. For the first time, the LORA robot controls its forward speed smoothly by jointly controlling the rear thrusters and the lift fan via a single controller (the forward controller). This control strategy enables the robot to speed up or slow down more efficiently. All the processing steps are carried out onboard thanks to the new generation of low-power μC s obtained from Microchip©. The LORA robot also carries its own power supplies (LiPo batteries) and the wireless communication link ("Bluetooth" module) used for data monitoring and higher order commands. The robot is therefore fully autonomous and moves freely without being encumbered by any umbilical link.

In conclusion, the LORA III autopilot is the first step toward a deft, lightweight (mass of the electronics: 8.17g), power-lean (power consumption: 0.75W) visuo-motor control system which could potentially be installed on a 3-D free-flying micro-air vehicle (MAV) by extending the visual field to include the ventral and dorsal parts, as simulated in [10]. This autopilot could also be applied to other types of (holonomic and fully actuated) vehicles such as blimps, autonomous underwater vehicles, and helicopters with counter-rotating rotors (in which pitch and roll are uncoupled). The next step will be to improve the OF-based autopilot by enlarging its FOV, and find an efficient means of controlling the heading (yaw Ψ) on a visual basis to enable the robot to successfully negotiate more challenging corridors comprising L-junctions or T-junctions.

ACKNOWLEDGMENTS

We thank Dr. J. Blanc for correcting the English manuscript, R. Brinkworth and D. O'Carroll (Adelaide University, Australia) for kindly making their High Dynamic Range panoramic images available to us, J. Diperi and Y. Luparini for their involvement in the mechanical design of the LORA robot and the test bench and M. Boyron for his involvement in the overall electronic design of the LORA robot. This research was supported partly by CNRS (Life Science; Information Science; Engineering Science and Technology) Aix-Marseille University and by the French National Research Agency (ANR) (EVA project under ANR-ContInt grant number ANR608-CORD-007-04).

APPENDIX

 TABLE I
TRANSFER FUNCTIONS

$H_c(s) = K_c$	With $K_c = 9.17 \cdot 10^{-3} V/^\circ$
$H_g(s) = K_g$	With $K_g = 5 \cdot 10^{-3} V/(^\circ/s)$
$G_\Psi(s) = \frac{1}{s} \cdot \frac{H_\Psi}{1 + \tau_\Psi \cdot s}$	With $H_\Psi = 4.4 \cdot 10^{-1} V$ and $\tau_\Psi = 3 \cdot 10^{-1} s$
$G_{Fwd}(s) = \frac{K_{Fwd}}{1 + \tau_{Fwd} \cdot s}$	See values in Table II
$G_{Side}(s) = \frac{1}{s} \cdot \frac{K_{Side}}{1 + \tau_{Side} \cdot s}$	See values in Table III
$C_\Psi(s) = K_\Psi$	With $K_\Psi = 3$
$C_\Psi(s) = K_1 \cdot \frac{1 + \tau_1 \cdot s}{s}$	With $K_1 = 5$ and $\tau_1 = 3 \cdot 10^{-1} s$
$C_{Fwd}(s) = K_2 \cdot (1 + \frac{1}{\tau_2 \cdot s}) \cdot \frac{1}{1 + \tau_3 \cdot s}$	With $K_2 = 0.8$, $\tau_2 = 2.7 \cdot 10^{-1} s$ and $\tau_3 = 8 \cdot 10^{-3} s$
$C_{Side}(s) = K_3 \cdot \frac{1 + a \cdot T \cdot s}{1 + T \cdot s} \cdot \frac{1}{1 + \tau_4 \cdot s}$	With $K_3 = 4 \cdot 10^{-1}$, $a = 5.7$, $T = 2.1 \cdot 10^{-1}$ and $\tau_4 = 1.59 \cdot 10^{-2} s$

 TABLE II
FORWARD DYNAMICS PARAMETERS

$u_{LiftFan}$ (%)	$K_{Fwd}(10^{-3} m \cdot s^{-1} \cdot \%^{-1})$	$\tau_{Fwd}(s)$	<i>Fit factor</i> (%)
42	30.11	2.67	99.8
41	28.11	2.64	99.3
40	25.91	2.63	99.7
39	20.88	2.02	99.4
38	18.45	1.54	98.3
37	16.29	1.34	96.1

 TABLE III
SIDE DYNAMICS PARAMETERS

$u_{LiftFan}$ (%)	$K_{Side}(10^{-3} m \cdot s^{-1} \cdot \%^{-1})$	$\tau_{Side}(s)$	<i>Fit factor</i> (%)
42	16.28	2.54	94.32
41	13.92	2.45	92.28
40	11.02	2.2	92.11
39	8.76	1.89	89.12
38	8.32	1.48	88.72
37	7.58	1.2	84.54

REFERENCES

- [1] T. Collett, "Some operating rules for the optomotor system of a hoverfly during voluntary flight," *Journal of Comparative Physiology A*, vol. 138, pp. 271–282, 1980.

- [2] H. Wagner, "Flow-field variables trigger landing in flies," *Nature*, vol. 297, no. 5862, pp. 147–148, May 1982.
- [3] M. Srinivasan, M. Lehrer, W. Kirchner, and S. Zhang, "Range perception through apparent image speed in freely flying honeybees," *Visual neuroscience*, vol. 6(5), pp. 519–535, 1991.
- [4] L. F. Tammero and M. H. Dickinson, "The influence of visual landscape on the free flight behavior of the fruit fly *Drosophila melanogaster*," *Journal of Experimental Biology*, vol. 205(3), pp. 327–343, 2002.
- [5] J. Serres, G. Masson, F. Ruffier, and N. Franceschini, "A bee in the corridor: centering and wall-following," *Naturwissenschaften*, vol. 95, pp. 1181–1187, 2008.
- [6] E. Baird, M. Srinivasan, S. Zhang, R. Lamont, and A. Cowling, "Visual control of flight speed and height in the honeybee," *From Animals to Animats 9*, pp. 40–51, 2006.
- [7] G. Portelli, F. Ruffier, and N. Franceschini, "Honeybees change their height to restore their optic flow," *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, vol. 196(4), pp. 307–313, 2010.
- [8] M. Srinivasan, S. Zhang, M. Lehrer, and T. Collett, "Honeybee navigation en route to the goal: visual flight control and odometry," *Journal of Experimental Biology*, vol. 199(1), pp. 237–44, 1996.
- [9] E. Baird, T. Kornfeldt, and M. Dacke, "Minimum viewing angle for visually guided ground speed control in bumblebees," *Journal of Experimental Biology*, vol. 213(10), pp. 1625–1632, 2010.
- [10] G. Portelli, F. L. Roubieu, F. Ruffier, and N. Franceschini, "Honeybees' speed depends on dorsal as well as lateral, ventral and frontal optic flows," *PLoS ONE*, vol. 6(5), p. e19486, 2011.
- [11] J. M. Pichon, C. Blanes, and N. Franceschini, "Visual guidance of a mobile robot equipped with a network of self-motion sensors," *unbekannt*, vol. 1195, pp. 44–53, 1989.
- [12] N. Franceschini, J. M. Pichon, and C. Blanes, "From insect vision to robot vision," *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 337, pp. 283–294, 1992.
- [13] D. Coombs and K. Roberts, "'Bee-bot': using peripheral optical flow to avoid obstacles," in *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, vol. 1825, Boston, USA, September 1992, pp. 714–721.
- [14] A. Duchon and W. Warren, "Robot navigation from a gibsonian viewpoint," in *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 1994. 'Humans, Information and Technology'*, vol. 3, San Antonio, USA, October 1994, pp. 2272–2277.
- [15] J. Santos-Victor, G. Sandini, F. Curotto, and S. Garibaldi, "Divergent stereo in autonomous navigation: From bees to robots," *International Journal of Computer Vision*, vol. 14(2), pp. 159–177, 1995.
- [16] K. Weber, S. Venkatesh, and M. Srinivasan, "Insect inspired behaviors for the autonomous control of mobile robots," in *Proceedings of the 13th International Conference on Pattern Recognition, 1996.*, M. V. Srinivasan and S. Venkatesh, Eds. Vienna, Austria: U.K.: Oxford Univ. Press, August 1997, pp. 226–248.
- [17] A. Argyros, D. Tsakiris, and C. Groyer, "Biomimetic centering behavior mobile robots with panoramic sensors," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 11(4), pp. 21–30, 2004.
- [18] S. Hrabar, G. Sukhatme, P. Corke, K. Usher, and J. Roberts, "Combined optic-flow and stereo-based navigation of urban canyons for a UAV," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Los Angeles, USA, August 2005, pp. 3309–3316.
- [19] C. McCarthy, N. Barnes, and R. Mahony, "A robust docking strategy for a mobile robot using flow field divergence," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 24(4), pp. 832–842, 2008.
- [20] J. Serres, D. Dray, F. Ruffier, and N. Franceschini, "A vision-based autopilot for a miniature air vehicle: joint speed control and lateral obstacle avoidance," *Autonomous robot*, vol. 25, pp. 103–122, 2008.
- [21] J. Humbert and A. Hyslop, "Bioinspired visuomotor convergence," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 26(1), pp. 121–130, 2010.
- [22] L. Muratet, S. Doncieux, Y. Briere, and J. Meyer, "A contribution to vision-based autonomous helicopter flight in urban environments," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 50(4), pp. 195–209, 2005.
- [23] F. Ruffier and N. Franceschini, "Optic flow regulation: the key to aircraft automatic guidance," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 50(4), pp. 177–194, 2005.
- [24] J. Zufferey, A. Klaptocz, A. Beyeler, J. Nicoud, and D. Floreano, "A 10-gram vision-based flying robot," *Advanced Robotics*, vol. 21(14), pp. 1671–1684, 2007.
- [25] A. Beyeler, J. Zufferey, and D. Floreano, "Vision-based control of near-obstacle flight," *Autonomous Robots*, vol. 27(3), pp. 201–219, 2009.
- [26] F. Expert and F. Ruffier, "Controlling docking, altitude and speed in a circular high-roofed tunnel thanks to the optic flow," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Vilamoura, Portugal, October 2012 (accepted).
- [27] F. Ruffier, S. Viollet, S. Amic, and N. Franceschini, "Bio-inspired optical flow circuits for the visual guidance of micro-air vehicles," in *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, vol. 3, Bangkok, Thailand, May 2003, pp. 846–849.
- [28] M. Pudas, S. Viollet, F. Ruffier, A. Kruusing, S. Amic, S. Leppävuori, and N. Franceschini, "A miniature bio-inspired optic flow sensor based on low temperature co-fired ceramics (LTCC) technology," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 133(1), pp. 88–95, 2007.
- [29] S. Viollet, F. Ruffier, T. Ray, M. Menouni, F. Aubépart, L. Kerhuel, and N. Franceschini, "Characteristics of three miniature bio-inspired optic flow sensors in natural environments," in *Fourth International Conference on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM)*, Venice, Italy, July 2010, pp. 51–55.
- [30] F. Roubieu, F. Expert, M. Boyron, B.-J. Fuschlock, S. Viollet, and F. Ruffier, "A novel 1-gram insect based device measuring visual motion along 5 optical directions," in *IEEE Sensors Conference*, Limerick, Ireland, October 2011, pp. 687–690.
- [31] F. Expert, S. Viollet, and F. Ruffier, "Outdoor field performances of insect-based visual motion sensors," *Journal of Field Robotics*, vol. 28(4), pp. 974–977, October 2011.
- [32] L. Cremean, W. Dunbar, D. van Gogh, J. Hickey, E. Klavins, J. Meltzer, and R. Murray, "The Caltech Multi-Vehicle Wireless Testbed," in *Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control*, vol. 1, Las Vegas, USA, December 2002, pp. 86–88.
- [33] V. P. I. Badia S. B., Bernardet U., "Non-linear neuronal responses as an emergent property of afferent networks: A case study of the locust lobula giant movement detector," *PLoS Computational Biology*, vol. 6(3), p. e1000701, 2010.
- [34] S. Fuller and R. M. Murray, "A hovercraft robot that uses insect-inspired visual autocorrelation for motion control in a corridor," in *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, Karon Beach, Phuket, December 2011, pp. 1474–1481.
- [35] H. Seguchi and T. Ohtsuka, "Nonlinear receding horizon control of an underactuated hovercraft," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 13(3-4), pp. 381–398, 2003.
- [36] Z. Jin, S. Waydo, E. Wildanger, M. Lammers, H. Scholze, P. Foley, D. Held, and R. Murray, "MVWT-II: the second generation Caltech Multi-Vehicle Wireless Testbed," in *Proceedings of the 2004 American Control Conference*, vol. 6, Boston, USA, July 2004, pp. 5321–5326.
- [37] J. Humbert, R. Murray, and M. Dickinson, "A control-oriented analysis of bio-inspired visuomotor convergence," in *44th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC '05)*, Seville, Spain, December 2005, pp. 245–250.
- [38] J. Zufferey and D. Floreano, "Toward 30-gram autonomous indoor aircraft: Vision-based obstacle avoidance and altitude control," in *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Barcelona, Spain, April 2005, pp. 2594–2599.
- [39] S. Viollet, L. Kerhuel, and N. Franceschini, "A 1-gram dual sensorless speed governor for micro-air vehicles," in *16th Mediterranean Conference on Control and Automation*, Ajaccio, France, June 2008, pp. 1270–1275.

Résumé

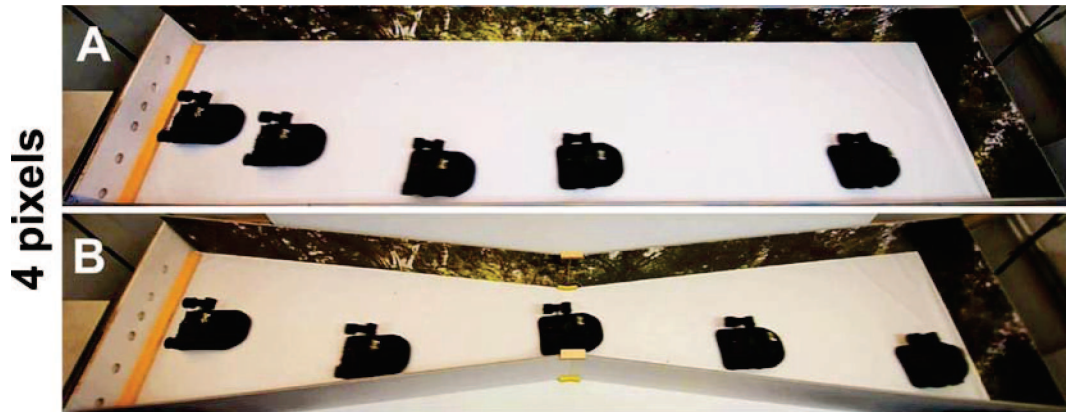


FIGURE 2.2 – Chronophotographies de l’aéroglesseur miniature effectuant un *suivi de paroi* dans un corridor droit (A) et fuselé (B).

Nous avons décrit dans ce chapitre la mise en œuvre sur un aéroglesseur miniature d’un pilote automatique, inspiré directement des études comportementales chez l’abeille. Ce pilote automatique est basé sur le principe de la *régulation duale du flux optique latéral*.

Les résultats, présentés dans ce chapitre, montrent un micro-robot *totalelement actionné* reproduire dans le plan horizontal le comportements de *centrage* observé chez l’abeille dans un tunnel droit [Kirchner and Srinivasan, 1989, Srinivasan et al., 1991] et fuselé Srinivasan et al. [1996]. Ce pilote automatique peut également expliquer le comportement de *suivi de paroi* observé chez l’abeille lors de récentes expérimentations comportementales effectuées dans notre laboratoire montrant qu’elles *ne se centrent pas systématiquement dans un tunnel large* [Serres et al., 2008b]. Le pilote automatique permet ainsi au micro-robot d’adopter soit un comportement de *centrage* soit de *suivi de paroi* (figure 2.2) qui ne dépende que des consignes de flux optique ω_{setFwd} et $\omega_{setSide}$. Le micro-robot adapte également automatiquement sa vitesse d’avance en fonction de la largeur locale du corridor, et ce, en accord avec les observations faites sur les abeilles dans des conditions similaire [Kirchner and Srinivasan, 1989, Srinivasan et al., 1991, 1996, Serres et al., 2008b].

Le système visuel minimaliste du robot, comprenant seulement deux paires de pixels (quatre pixels), lui permet de naviguer *sans avoir à mesurer ou estimer ni sa vitesse d’avance, ni sa position aux obstacles* (contrairement à [Conroy et al., 2009, Humbert and Hyslop, 2010, Fuller and Murray, 2011]). Ces résultats confirment la validité du modèle proposé en simulation par Serres et ses collaborateurs [Serres et al., 2008a] et remettent en cause directement l’hypothèse d’*équilibrage des flux optiques latéraux*

faites par Kirchner et Srinivasan [Kirchner and Srinivasan, 1989, Srinivasan et al., 1991]. Ce travail apporte une « brique » supplémentaire dans la compréhension du modèle de navigation présent chez l'abeille en étudiant, à travers une mise en œuvre robotique, à la fois le comportement de *centrage* et de *suivi de paroi* où beaucoup de roboticiens [Coombs and Roberts, 1992, Duchon and Warren, 1994, Santos-Victor et al., 1995, Weber et al., 1997, Argyros et al., 2004, Hrabar and Sukhatme, 2009, Humbert and Hyslop, 2010] se contentent du modèle de *l'équilibrage des flux optique latéraux*, qui ne peut expliquer toute la diversité comportementale observé chez l'abeille [Srinivasan, 2011b].

Le robot embarque ses capteurs de flux optique, son moyen de communication sans fil (Bluetooth®), son énergie et son pilote automatique. Toutes les étapes de traitement sensorimoteur sont effectués dans le robot, ce qui en fait une solution de navigation en environnement inconnu, bio-inspirée et totalement autonome. Afin de poursuivre l'étude de ce modèle, il reste à étudier le comportement du micro-robot dans des configurations de tunnels plus complexe comportant un virage, une zone non-stationnaire, une absence de texture, un fuselage plus important, ou encore un terrain en pente.

Chapitre 3

Article II. A biomimetic vision-based hovercraft accounts for bee's complex behaviors in various corridors

Article soumis en Mai 2013 dans *Bioinspiration & Biomimetics*.

Auteurs : Frédéric L. Roubieu, Julien R. Serres, Nicolas Franceschini, Stéphane Viollet, et Franck Ruffier.

Dans le chapitre précédent, nous avons reproduit, sur un aéroglisseur miniature équipé du pilote automatique LORA, les comportements de *centrage* et de *suiti de paroi* observés chez l'abeille. Les résultats présents dans ce chapitre étendent ces analogies comportementales entre notre robot et l'insecte vers d'autres configurations de tunnel. Toujours équipé de son système visuel de quatre pixels, le robot navigue dans des tunnels pouvant comporter cette fois, une absence de texture (de quatre mètres de long), une zone non-stationnaire, un fuselage unilatéral plus important (14°), un virage ou encore une pente. Ces configurations de tunnels constituent, pour le pilote automatique LORA, autant de perturbations qui viennent éprouver sa robustesse. Nous proposons également, dans ce chapitre, la mise en œuvre de deux paires de pixels supplémentaires (directions optiques $\pm 45^\circ$). Une étude de répétabilité permet d'évaluer l'apport de ces deux yeux supplémentaires pour la navigation du micro-robot dans certains tunnels et permet, par la même occasion, de jauger la fiabilité et le déterminisme de l'aéroglisseur à naviguer en environnement inconnu sur la seule base de la régulation du flux optique.

A biomimetic vision-based hovercraft accounts for bee's complex behaviors in various corridors

Frédéric L. Roubieu, Julien R. Serres, Nicolas Franceschini, Stéphane Viollet and Franck Ruffier

Abstract—Here we present a vision-based autopilot enabling a fully actuated miniature hovercraft to travel safely along a corridor. The hovercraft's speed and its clearance from the lateral walls are controlled using Optic Flow (OF) cues. The “Lateral Optic flow Regulation Autopilot” (LORA) implemented on the hovercraft was inspired by the results of experiments conducted on honeybees in another laboratory and more recently in our own laboratory. The LORA autopilot is a *dual lateral OF regulators* consisting of two intertwined feedback loops with separate OF set-points. In addition, a heading-lock system comprising a micro-gyro and a micro-compass ensures that the robot will move straight ahead and therefore experience a purely translational OF. The robot is shown to navigate safely along straight, tapered and bending corridor configurations and to react appropriately to visual and physical perturbations such as the lack of texture on one wall, the presence of tapering and non-stationary sections of corridor, and even sloping terrain. The frontend of the robot's visual system is based simply on two pairs of pixels, each pair driving a Local Motion Sensor (LMS). This minimalistic visual system measuring the lateral optic flow suffices to control both the robot's clearance from the walls and its forward speed without measuring any speeds or distances. We also implemented two additional frontal 2-pixel LMSs to improve the robot's performance in highly challenging corridors. This robot's simple visuomotor control system accounts for bees' ability to navigate along stationary walls, moving walls and tapered corridors.

I. INTRODUCTION

Nature provides us with many examples of ingenious sensors and systems subtending animal behaviour, which can suggest how to design innovative automatic guidance systems for aerial, underwater, ground and space vehicles. Winged insects are able, for example, to perform some exquisite tasks when flying through unknown, unpredictable environments without using any emissive sensors to assess their speed or the distance from obstacles, relying mainly on the Optic Flow (OF) cues generated by their own motion [1].

The OF is the angular speed ω (magnitude in $^{\circ}.s^{-1}$) at which any contrasting object moves past the eye of an agent [2], [3]. Flying insects use the OF to control their speed [4]–[9], to control their altitude [7], [10], [11], and to avoid lateral obstacles [12]–[14] as well as insects respond to the expanding OF [15]–[17]. Indeed, as the insects are tiny, OF sensing techniques therefore provide promising tools for obstacle avoidance, altitude control and speed control purposes, especially in the case of small autonomous robots which have to meet demanding power and payload constraints.

Article was submitted on May 2013 in *Bioinspiration & Biomimetics*.

Authors are with the Aix-Marseille University, CNRS, ISM UMR 7287, 13288, Marseille cedex 09, France {frederic.roubieu, julien.serres, nicolas.franceschini, stephane.viollet, franck.ruffier}@univ-amu.fr

Kirchner and Srinivasan [12] observed that honeybees flying through a narrow tunnel tended to maintain equidistance from the stationary lateral walls. These authors therefore suggested that this centring response may be achieved by balancing the apparent motion of the images of the walls perceived by their two compound eyes [12], [13]. Many authors have actually used this ‘optic flow balance’ hypothesis to design visually guided ground-based robots whose task was to keep centered along corridors of various kinds. Some of the authors simulated flying agents [18]–[21]. Others implemented real terrestrial or aerial robots capable of centring behaviour [22]–[36] or even on an underactuated rolling robot [37] equipped with low friction rollerballs mimicking the kinematics of a hovercraft [38]. Recent behavioural experiments have shown that *honeybees do not in fact systematically keep to the midline of corridors* [14] and may instead adopt *wall-following* behaviour by navigating off-center along a corridor. The latter behaviour actually makes sense as insects must be able to cope with a single-sided contrasting environment. In any case, the ‘optic flow balance’ hypothesis does not account for this wall-following behaviour.

Independently, honeybees flying along a narrow tapered corridor have been observed to keep their flight speed proportional to the local corridor width. They suggested that bees may proceed by regulating the total optic flow experienced on either side [5]. This hypothesis was tested successfully on wheeled robots in which the groundspeed was controlled on the basis of the OF generated by the two walls [24], [26], [27], [29], [39].

Inspired by the results of their behavioural studies on honeybees [14], Serres et al. [40] recently developed in simulation the LORA III autopilot which consists of a *dual lateral OF regulators* designed for use on a *fully-actuated* hovercraft. This type of vehicle is attractive because the surge and sway dynamics are uncoupled in the 2-D horizontal plane, just as occurs in bees along the surge axis [41] and the sway axis [42]. Recent observations on sandwasps (*Bembix* sp) confirm insects shifted laterally by doing roll maneuvers [43]. This *dual OF regulators* is based on *OF regulation* principles whereby a feedback loop based on an OF sensor (the Local Motion Sensor - LMS -) strives to maintain a perceived OF at a constant value by adjusting the robot's thrust [44]. Our current LMSs are based on the “time of travel” scheme [45]–[48] that was inspired by findings made on the housefly's visual system [49], [50]. Various versions of this principle have been implemented over the years, using a variety of technologies. They all give a single 1-D angular

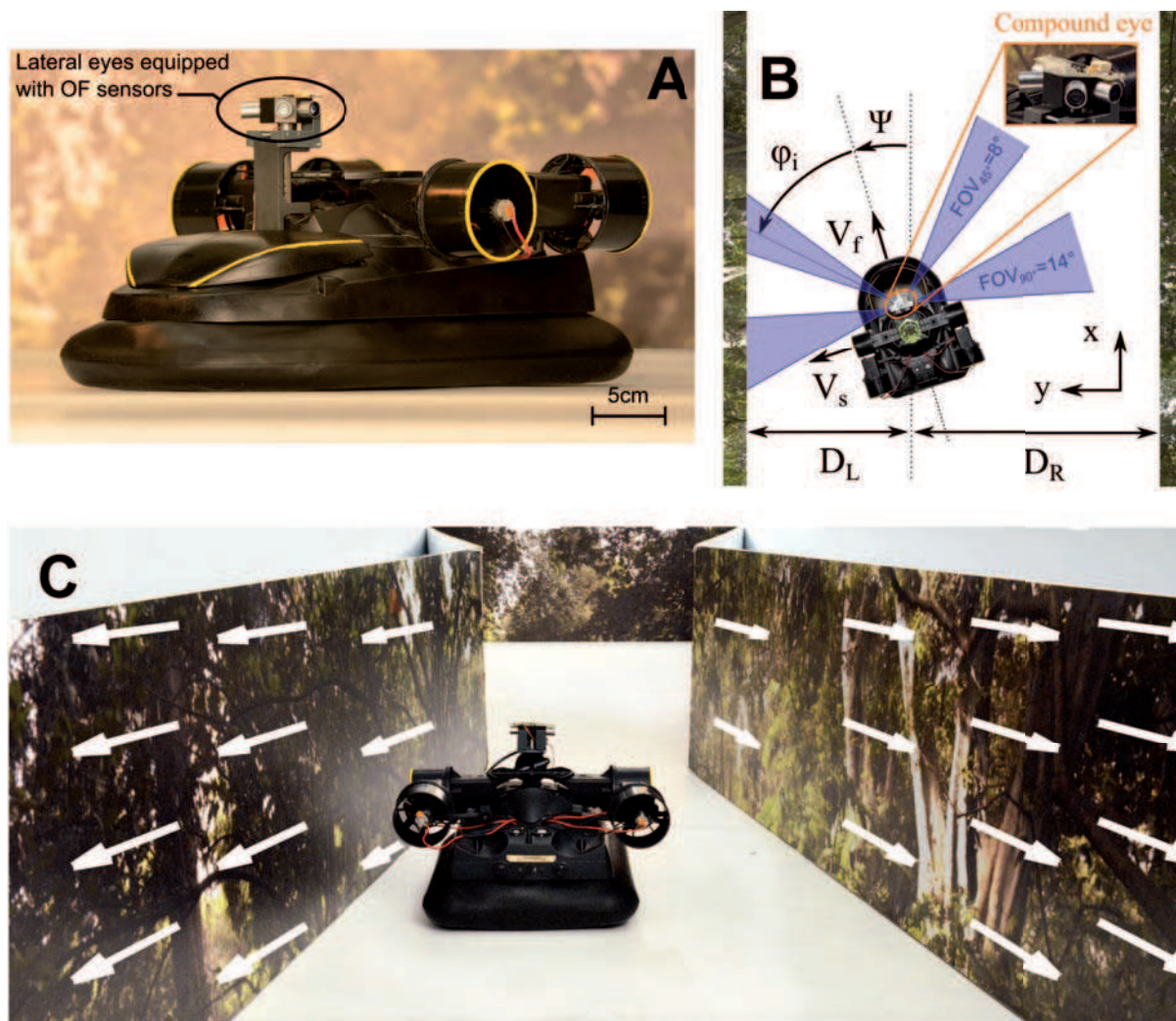


Fig. 1. (A) A fully-autonomous sighted hovercraft equipped with a miniature 8-pixel compound eye. B Tiny hovercraft (size: $0.36 \times 0.21 \times 0.17m$) navigating along an unknown textured corridor. The robot is *fully actuated* by means of four ducted fans controlling its three degrees of freedom (on the surge, sway and yaw axes). A lift fan inflates the skirt and creates an air cushion a few millimeters high ($\sim 2\text{ mm}$) under the robot, preventing it from touching the ground. The LORA robot is endowed with an insect-inspired compound eye composed of four lateral eyes, i.e. four fly-inspired 2-pixel Local Motion Sensors (LMSs), placed at $\varphi_i = \pm 45^\circ$ and $\varphi_i = \pm 90^\circ$ azimuthal angles (as shown in the inset) measuring the visual motion. The right and left walls of the corridor are lined with a natural coloured panorama depicting bushes and trees. C The hovercraft navigates in a tapered corridor under a purely translational optic flow.

speed measurement [46], [51]–[62]. These LMSs have been implemented in various electronic versions and used for the visual guidance of terrestrial or aerial vehicles [10], [44], [51], [63]–[68].

In previous computer simulations, the *dual OF regulators* which automatically controls both the speed and the clearance from the walls [40] - without having to determine either the speed or the clearance from the walls - was found to account remarkably well for the different behaviours observed in bees flying along stationary and non-stationary corridors [5], [12], [14].

The LORA autopilot, based on the *dual OF regulators*, was implemented and tested here onboard a real hovercraft (figure 1A). Some results presented in [67] showed that the

robot performs *centring* (figures 6A, 6B) and *wall-following* tasks (figures 6C, 6D) which depends only on a set of OF set-points (ω_{setFwd} and $\omega_{setSide}$) by controlling both its speed and its clearance from the walls in a straight corridor and a 7° tapered corridor. In the present study, the robot was endowed with sight by means of a minimalistic fly-inspired compound eye comprising 2 or 4 pairs of OF sensors facing in different optical directions (i.e. each pair of pixels drives a single LMS). The hovercraft's visually-guided behaviour was then tested in corridors lined with a natural coloured panorama depicting bushes and trees, the rich texture of which favored a high refresh-rate in the OF sensor's measurements [59], [61]. In the present study, the navigation performances of the LORA robot were tested in

some highly challenging corridor configurations, including corridors with stiffly tapering angles, bending corridors, and straight stationary corridors placed on a flat or sloping terrain as well as a corridor equipped with a moving wall.

Our robotic platform is described in detail in section II. The original LORA autopilot based on a heading-lock system and the *dual OF regulators* embedded onboard the hovercraft to guide it in unknown environments are described in Section III. The experimental results obtained with the actual physical robot equipped with 2 pairs of pixels and the *dual OF regulators* serving to guide the robot along straight, tapered and bending corridors are presented in Section IV. The ongoing implementation of frontal eyes to improve the lateral obstacle avoidance performances obtained in highly challenging corridors is discussed in Section V.

II. THE LORA HOVERCRAFT ROBOT

A. Dynamic model and identification of the hovercraft robot

The LORA robot (figure 1A) is a retro-fitted version of a miniature RC hovercraft [71]. The hovercraft's skirt creating an air-cushion underneath the robot is inflated by means of a lift fan actuated by a brushless motor. The hovercraft is *fully actuated* by means of four ducted fans driving it on the horizontal plane and controlling its three degrees of freedom (on the surge, sway and yaw axes, figure 1B). Each of the four thrusters equipping the LORA robot is composed of a DC motor loaded with a light three-blade propeller producing a thrust of up to 0.72 N at 7.2 V. The propeller's profile of each thruster is not symmetrical, and reversing the thrust would therefore not brake but just decelerate the robot. The lift-fan was therefore used as a "brake", as suggested in [72], by smoothly deflating the skirt. We identified the forward and side dynamics of the hovercraft ($G_{Fwd}(s)$ and $G_{Side}(s)$ respectively) corresponding to several lift fan output signals $u_{LiftFan}$ in the [37%; 42%] range corresponding to the duty cycle of the Pulse-Width Modulation (PWM) signal delivered to the lift-fan Controller.

In this study, since the hovercraft was not subjected to any wind, the ground speed V_f was equal to its airspeed. Moreover, the hovercraft's heading Ψ was stabilized along the X-axis of the corridor (see Section III-A and figure 4A). The robot is able to travel along a corridor on either flat terrain ($\beta = 0^\circ$, e.g. figure 5A) or sloping terrain (sloping angle $\beta = \pm 1^\circ$, figures 9A and 9C). The angle β is constant whatever the configuration of the corridor. In a linear model, when the robot is moving above a sloping terrain, the equations of motion along the X and Y-axis can be written as follows:

$$m \cdot \frac{dV_f}{dt} + \zeta_f \cdot V_f = 2K_T \cdot U_{batt} \cdot u_f + m \cdot g \cdot \sin \beta \quad (1)$$

$$m \cdot \frac{dV_s}{dt} + \zeta_s \cdot V_s = K_T \cdot U_{batt} \cdot u_s \quad (2)$$

where m (0.878g) is the mass, K_T is the identified gain linking the thruster's force to the voltage applied [72], and ζ_f and ζ_s are the forward and lateral linear friction coefficients, respectively. In the rest of this study, $\sin \beta \sim \beta$ was defined

in terms of the small angle approximation ($-1^\circ \leq \beta \leq 1^\circ$). The Laplace transform of the equation of motion along the X-axis (equation 1) gives:

$$V_f(s) = \frac{2K_T \cdot U_{batt}}{\zeta_f} \cdot \left[U_f(s) + \frac{m \cdot g \cdot \beta}{2K_T \cdot U_{batt}} \cdot D(s) \right] \quad (3)$$

In the case of a sloping terrain, we can see that a constant external disturbance d_{Tf} occurred, which affected the beginning of the forward motion (figure 4B), which was written as follows:

$$d_{Tf} = \frac{m \cdot g \cdot \beta}{2K_T \cdot U_{batt}} \quad (4)$$

The control signals u_f , u_s and u_Ψ command the surge dynamics (equation 1, figure 4B), the sway dynamics (equation 2, figure 4C) and the yaw dynamics (figure 4A), respectively. Each of the four thrusters is controlled by mixing the three control signals u_f , u_s and u_Ψ to obtain a PWM signal. Since the dynamics were identified on a flat terrain ($\beta = 0^\circ$), the forward and side dynamics were expected from equations 1 and 2 to be:

$$G_{V_f}(s) = \frac{2K_T \cdot U_{batt}}{1 + \frac{m}{\zeta_f} \cdot s} = \frac{K_{Fwd}}{1 + \tau_{Fwd} \cdot s} \quad (5)$$

$$G_{V_s}(s) = \frac{K_T \cdot U_{batt}}{1 + \frac{m}{\zeta_s} \cdot s} = \frac{K_{Side}}{1 + \tau_{Side} \cdot s} \quad (6)$$

The surge and sway dynamics of the hovercraft ($G_{V_f}(s)$ and $G_{V_s}(s)$ respectively) were therefore identified as a first order low-pass filter (equations 5 and 6), in which both time constants τ_{Fwd} and τ_{Side} are of the same order of magnitude. Parameters $K_{Fwd,Side}$ and $\tau_{Fwd,Side}$ corresponding to each control signal $u_{LiftFan}$ are given in tables II and III.

B. The bio-inspired robot's visual system

Our hovercraft robot is equipped with a minimalistic compound eye consisting of only four Local Motion Sensors (LMSs), based on 2-pixel OF sensors, placed at azimuthal angles of $\pm 45^\circ$ and $\pm 90^\circ$ with a horizontal FOV of 8° and 14° , respectively (figure 1B). Each of the four LMS consists of an optical assembly composed of a lens and a pair of photosensors (based on a iC-LSC photodiode array purchased from the company iC-Haus). An on-chip current amplifier is integrated into each photosensor, but a programmable gain was recently added to the circuit so as to be able to use the maximum range of the Analog-to-Digital Converter of the μC (figure 2) [70]. When the robot moves straight ahead along a corridor, each eye receives, within its small FOV, a purely translational OF (figure 1C), which is defined as follows:

$$\omega_i = \frac{V_f}{D_{\varphi_i}} \cdot \sin \varphi_i \quad (7)$$

where V_f is the robot's forward speed and D_{φ_i} is the distance from an object in the azimuthal direction φ_i . The OF is computed here using the "time of travel" scheme (figure 2), which gives the angular speed ω_i of any dark-to-light (ON) or light-to-dark (OFF) contrast (as occurs in flies [69], [73]),

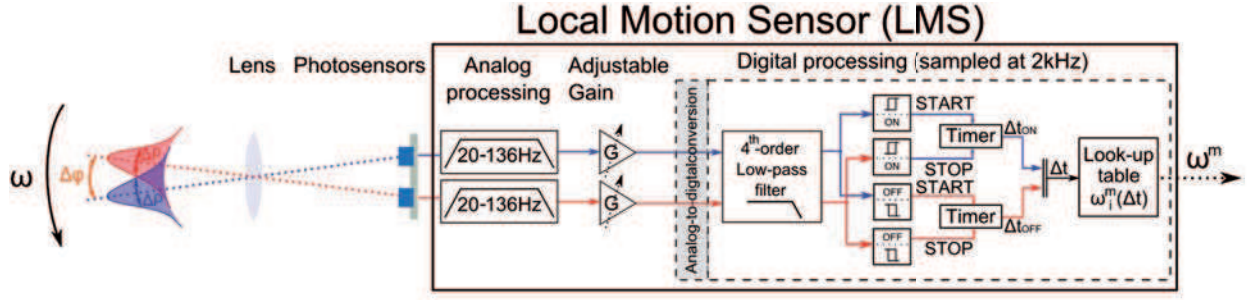


Fig. 2. Processing architecture of one 2-pixel Local Motion Sensor (LMS). The visual signals delivered by neighboring photosensors are filtered both spatially and temporally by an analog bandpass filter with cut-off frequencies of 20 Hz and 136 Hz and a second order fixed-point digital low-pass filter with a cut-off frequency of 30 Hz. The visual signals are then amplified before being digitized using the programmable gain controlled by an SPI bus in order to finely tune the dynamic range of the signals to the ambient illuminance and use the maximum range of the Analog to Digital Converter (Ruffier and Expert 2012). The filtered photosensor signals are then thresholded to determine the angular speed ω^m , using the “time of travel” scheme previously developed at our Laboratory [45]–[48]. The “time of travel” Δt , which is proportional to the inverse of ω , elapsing between two filtered photosensor signals is measured by a timer: Δt_{ON} and Δt_{OFF} are measured by means of ON and OFF contrast distinguishing processes inspired by the fly’s eye [69]. The delay Δt is measured and then used to compute the 1-D angular speed ω^m in the local visual field. The overall processing was carried out on a tiny low-power 16-bit μC (dsPIC33F128GP802 from Microchip©) at a sampling rate of 2 kHz, giving a 0.5 ms precision measurement in the Δt measurement range. Whenever an LMS does not detect any new contrasting features, it holds the last measured value for a period of 0.5 s. Modified from [70].

which is determined by measuring the time lag Δt_i between the output signals of two neighboring photosensors:

$$\Delta t = \frac{\Delta \varphi_i}{\omega_i} \quad (8)$$

where the inter-receptor angle, i.e., the angle between two adjacent photosensors, is denoted by $\Delta \varphi_i$. As occurs in flies too, each photosensor features a Gaussian Angular Sensitivity Function (ASF) [74], which is characterized by the acceptance angle $\Delta \rho_i$ (the angle of the ASF at half-height). The latter is tuned here by slightly defocusing the lens from the sensor so as to equalize the values of $\Delta \varphi_i$ and $\Delta \rho_i$, as follows:

$$\Delta \varphi_{90^\circ} = \Delta \rho_{90^\circ} = 3.5^\circ \quad (9)$$

$$\Delta \varphi_{45^\circ} = \Delta \rho_{45^\circ} = 2.5^\circ \quad (10)$$

Interestingly, the values of the interommatidial angles $\Delta \varphi_{\pm 90^\circ}$ and $\Delta \varphi_{\pm 45^\circ}$ obtained stand comparison with those measured at the same azimuths of the honeybee’s compound eye [75]. The other processing steps involved in the functional “time of travel” scheme are described in detail in some studies [45], [46], [58], [61]. The descending neurons found to exist in honeybees respond monotonically to front-to-back translational movements (Velocity tuned - VT - neurons) [76], thus acting like genuine OF sensors. Each of the visual motion sensors implemented in the hovercraft measures the 1-D angular speed ω_i^m generated by a natural scene within a range of more than one decade [$25^\circ \cdot s^{-1}$; $350^\circ \cdot s^{-1}$], which is similar to the visual motion measurement range of VT neurons [$40^\circ \cdot s^{-1}$; $1000^\circ \cdot s^{-1}$] [76].

C. Hardware architecture

The photograph of the main electronic board presented in figure 3A shows the three microcontrollers (- μC s - dsPic33FJ128GP802 from Microchip©) responsible for the visual signal processing and the OF-based visuomotor feed-

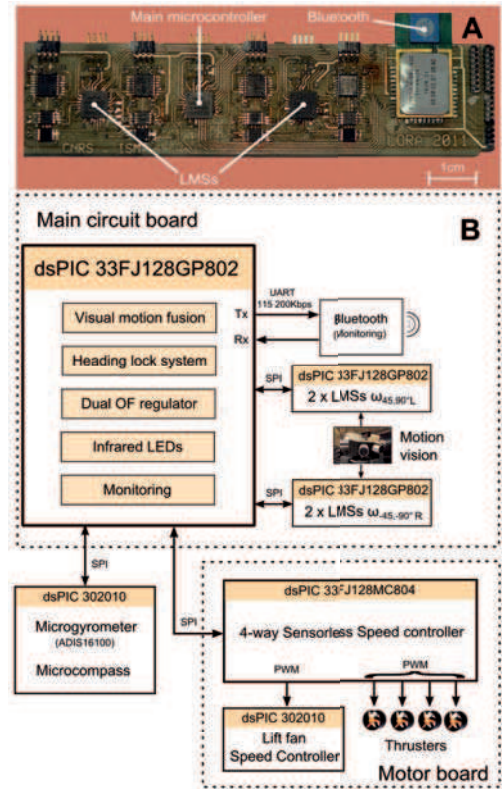


Fig. 3. Custom electronics: A Top view of the microcontroller-based (μC) circuit board (size: 109×25 mm, mass: 8 g) including the embedded OF-based autopilot and visual LMSs. B Simplified scheme of the embedded electronics, showing the interconnections between the 6 tiny μC s and the minimalistic 8-pixel compound eye.

back loops guiding the LORA robot. The block diagram presented in figure 3B shows the architecture of the electronic system embedded in the LORA robot. The main

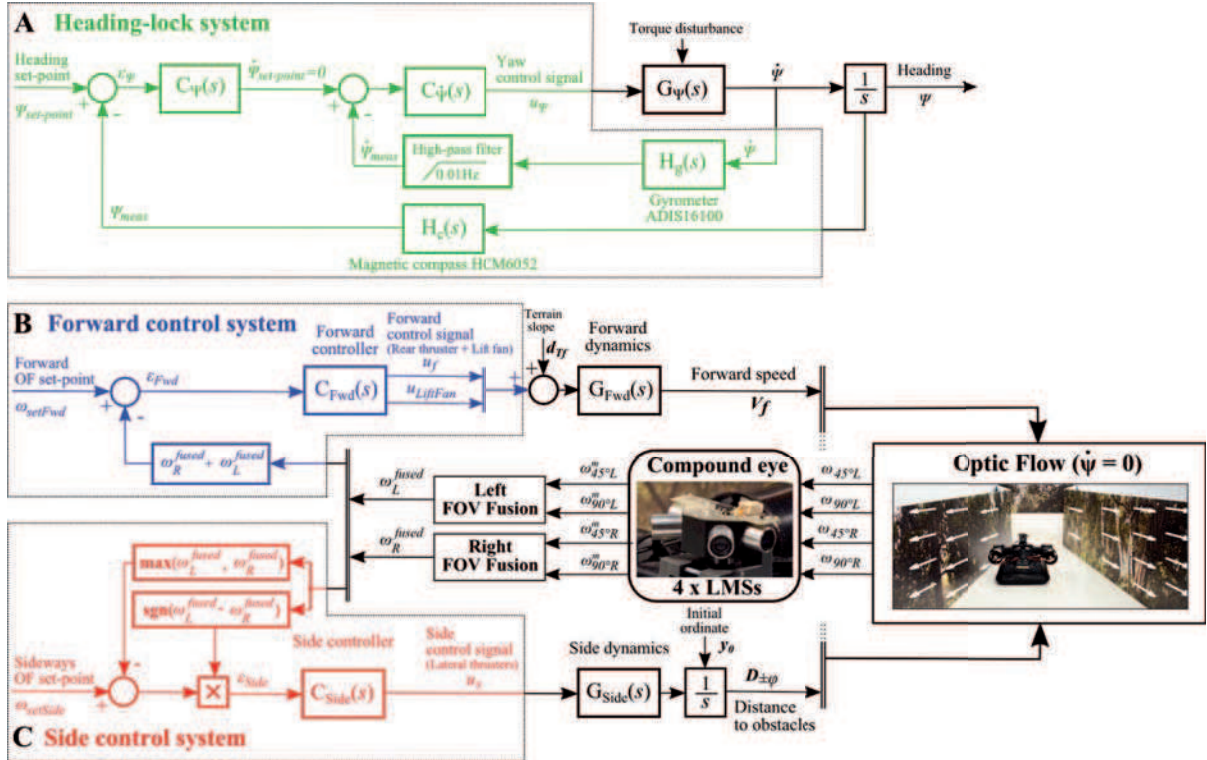


Fig. 4. Feedback loops implemented on the robot. A Custom-made heading-lock system composed of a micro-gyrometer and a micro-compass compensating for any yaw disturbances and keeping the robot's heading on the X-axis of the corridor ($\Psi = 0^\circ$ - figure 1B -). B and C The bio-inspired OF-based autopilot (Serres 2008a) consists of a dual lateral OF regulators based on two interdependent visuo-motor feedback loops: a forward control loop and a side control loop, each of which has its own OF set-point, that is, ω_{setFwd} and $\omega_{setSide}$. The forward control system B is a bilateral OF regulator that adjusts the forward thrust and the lift fan control signal so as to keep the sum of the right and left fused OF $\omega_R^{fused} + \omega_L^{fused}$ constant at ω_{setFwd} . The side control system C adjusts the lateral thrust on the basis of whichever of the two fused lateral OFs measured is the larger: $\max(\omega_R^{fused}, \omega_L^{fused})$. Details of each transfer function and their parameters are given in tables I, II and III.

μC deals with multi-rate tasks such as the heading-lock control system, the visual motion fusion feeding the dual OF regulators, the data monitoring during the main tasks and the supervision of the two secondary μC s responsible for the lateral OF processing. The main dsPIC therefore fuses the visual inputs (i.e., the OF measurements $\omega_{\varphi_i}^m$), the inertial input (i.e., the rate gyro $\dot{\Psi}^m$) and the vehicle's heading (i.e., the custom micro-magnetic compass Ψ^m). A Bluetooth device connected to the UART peripheral of the main μC provides a full-duplex radio link between the freely moving robot and the ground station, thus enabling the hovercraft's data to be remotely monitored and to deliver instructions, such as the values of the OF set-points, for instance. Two separate Li-Polymer battery packs give the robot an autonomy of 10 minutes. The robot was rendered robust to large voltage disturbances thanks to a four-way 'sensorless speed governor' (Viollet 2008) controlling the four propellers' rotational speeds (*rpm*) in a closed loop mode, whereas the lift fan *rpm* was controlled via an optical sensor. The hovercraft is fully autonomous without requiring any umbilical link: it performs all the processing steps onboard and carries all its sensors and actuators, its own wireless data link and its own power supplies. To summarize,

the 6 μC s distributed in the LORA robot (figure 3B) handle no less than 8 feedback-loops (including the four sensorless speed governors) and make the robot relatively immune to heading disturbances and power supply variations.

III. THE BEE-INSPIRED LORA AUTOPILOT

The autopilot embedded onboard the real hovercraft (figure 1) performs multiple data processing stages, as shown in figure 4. In addition to the bio-inspired dual OF regulators, the heading lock system was introduced to make the robot move straight ahead along the corridor axis. The autopilot therefore controls the robot's motion not only forward and sideways, but also about the yaw axis, in line with the principles described in this section.

A. The heading lock system

The hovercraft's heading Ψ is stabilized along the main axis of the corridor (X-axis) thanks to the heading-lock system based on a micro-gyro and a micro-magnetic compass (figure 4A), which compensates for any yaw disturbances by adjusting the rear thrusters differentially. The robot therefore experiences a purely translational OF (figure 1C), as defined in equation 7. Bees are likewise equipped with a heading-lock system based on polarized light cues [77], which makes

the insect take an impressively straight course even in the presence of wind [78].

The heading feedback loop, which is composed of two nested feedback loops, nullifies the robot's yaw speed and angle ($\dot{\Psi} = 0^\circ$ and $\Psi = 0^\circ$) in order to cancel any yaw drift. A proportional controller $C_{\Psi}(s)$ was included in the outer feedback loop (based on the magnetic micro-compass $H_c(s)$) and the Proportional-Integral (PI) controller $C_{\dot{\Psi}}(s)$ integrated into the inner-feedback loop (based on the micro-gyrometer $H_g(s)$) to improve the closed-loop dynamics and obtain a zero steady-state error, thus locking the robot's heading to the X-axis of the corridor (see figures 1B and 4A).

B. The bio-inspired dual lateral Optic Flow regulation

The *dual lateral OF regulators* consists of two intertwined visuomotor feedback loops controlling both the forward and sideways motion of the robot on the basis of the OF (figures 4B, 4C).

The side control system principle presented in [40] was initially inspired by findings obtained on honeybees, which show both centring [12] and wall-following behaviours [14]. An explicit control system called the *side control feedback loop* shown in figure 4C (red loop) was developed. This first lateral OF regulator is a *unilateral* OF regulator that adjusts the vehicle's lateral thrust (which determines the sway speed V_s) so as to keep the higher of the two fused lateral OFs perceived, that is, $\max(\omega_{R,L}^{fused})$, equal to the *sideways OF set-point* $\omega_{setSide}$. The sign function $\text{sgn}(\omega_L^{fused} - \omega_R^{fused})$ selects the direction corresponding to the nearest wall $\min(D_{L,R})$, i.e., the wall that generates the greatest lateral OF. Thanks to this unilateral OF regulator, the distance from that wall becomes automatically proportional to the robot's forward speed V_f , whatever the speed or the distance involved. The faster the robot travels, the further away from that wall it will therefore be. The clearance from the walls ($D_{L,R}$) depends mainly on the *sideways OF set-point*. A lead integrator $C_{Side}(s)$ was introduced into the side feedback loop to increase the damping, thus improving the robot's stability and its sway dynamics. The error signal ϵ_{Side} is calculated as follows:

$$\epsilon_{Side} = \text{sgn}(\omega_L^{fused} - \omega_R^{fused}) \times \left[\omega_{setSide} - \max(\omega_{R,L}^{fused}) \right] \quad (11)$$

Only one lateral thruster is actuated at a time, depending on the sign of the output control signal u_s of the side controller:

- $u_s < 0$: the left thruster is actuated and the right one is off;
- $u_s > 0$: the right thruster is actuated and the left one is off.

The forward control system presented in [40] was based on findings obtained on the flight behaviour of honeybees in a narrow tapered corridor lined with a periodic pattern of black and white vertical stripes [5]. The forward control system is provided here by the second OF regulator (figure 4B, blue loop) whose action is to hold the sum of the two fused lateral OFs measured, that is $\omega_L^{fused} + \omega_R^{fused}$, constant and equal to the forward OF set-point ω_{setFwd} . At

all times it adjusts the forward thrust, which will determine the hovercraft's forward speed V_f . At a given corridor width, any increase in the sum of the two lateral OFs is assumed here to result from the hovercraft's acceleration. This control scheme thus automatically ensures a 'safe forward speed' that is commensurate with the local corridor width in the total absence of knowledge of the corridor width. A PI controller $C_{Fwd}(s)$ was introduced into the forward feedback loop to improve the closed-loop dynamics, obtain a zero steady-state error and therefore reject any disturbances d_{Tf} (equation 4) due to the sloping terrain. The error signal ϵ_{Fwd} feeding the forward controller is calculated as follows:

$$\epsilon_{Fwd} = \omega_{setFwd} - (\omega_L^{fused} + \omega_R^{fused}) \quad (12)$$

Our control method enables the robot to control its forward speed V_f smoothly by combining the rear thrusters' and lift fan control signals (u_f and $u_{LiftFan}$ respectively) in the same forward controller. Depending on the sign of the output control signal produced by the forward controller u_f , the robot can therefore:

- speed up ($u_f > 0$) by controlling the rear thrusters in the $]0; 60\%$ range (Pulse Width Modulation [PWM] control signal) and $u_{LiftFan}$ to the maximum value of 42%;
- slow down ($u_f = 0$) by switching off the rear thrusters and keeping $u_{LiftFan}$ at the maximum value of 42%;
- "brake" ($u_f < 0$) by switching off the rear thruster and deflating the skirt via $u_{LiftFan}$ in the identified $[37\%; 42\%]$ range.

All three feedback loops (the heading-lock system and the *dual OF regulators*) are implemented in parallel on the main μC of the main circuit board (figure 3A) and control the LORA robot at a sampling frequency of 100Hz. All the transfer functions presented in this section are presented in details in table I.

Once the OF-based autopilot has reached the steady state ($V_{f\infty}$, $D_{R,L\infty}$), the LORA robot will travel at a given forward speed $V_{f\infty}$ and at a given distance from one wall ($D_{L\infty}$ or $D_{R\infty}$). The steady state operating point, which was defined in [40], depends on the two OF set-points ω_{setFwd} and $\omega_{setSide}$.

C. Visual motion fusion

We implemented two versions of a minimalistic bee-inspired compound eye on the hovercraft equipped with the *dual OF regulators*. First, we tested the performance of this autopilot with a 4-pixel compound eye consisting simply of two pairs of pixels ($\pm 90^\circ$ azimuthal angles) and then extended the visual field towards the front by adding two pairs of pixels in the $\pm 45^\circ$ optical directions, which resulted in an 8-pixel compound eye. We therefore needed to feed the autopilot with a combination of these four visual motion signals. The visual fusion method defined below describes the contents of the "Left or Right FOV fusion" blocks presented in figure 4.

1) *The case of a compound eye consisting of 2 pairs of pixels:*

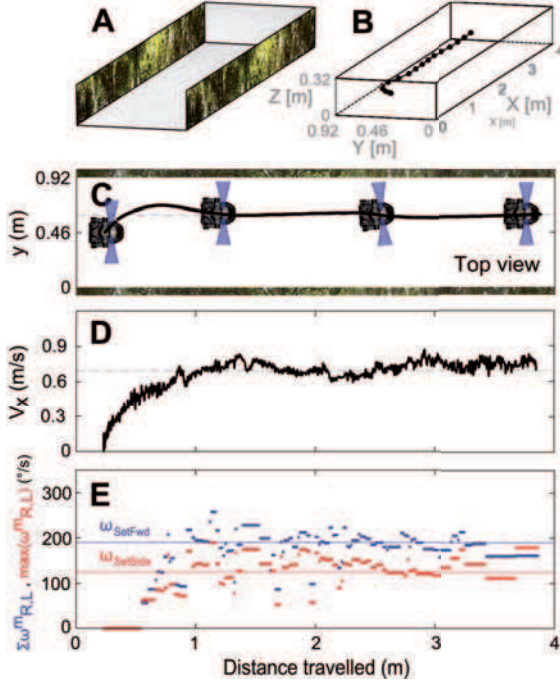


Fig. 5. Automatic wall-following behaviour of the LORA robot in a straight 4-m long corridor. The robot was equipped with a 4-pixel compound eye facing in $\pm 90^\circ$ optical directions (FOVs are presented in the form of blue conical shapes). The LORA robot started on a central course ($x_0 = 0.25$ m and $y_0 = 0.46$ m) with $\omega_{setFwd} = 190^\circ \cdot s^{-1}$ and $\omega_{setSide} = 125^\circ \cdot s^{-1}$ OF set-points. A Perspective view of the straight corridor. B 3-D trajectory of the hovercraft robot navigating along the straight corridor plotted every 400 ms. C Chronophotograph of the hovercraft robot in the horizontal plane. Marks on the trajectory indicate the robot's position and orientation at 1.84-second time intervals. In the steady state, the clearance from the nearest wall reached $D_{L\infty} = 0.31$ m, and the robot therefore performed safe wall-following behaviour. D Forward speed profiles V_f corresponding to the trajectory shown in C. The robot reached a steady-state forward speed ($V_{f\infty} = 0.69$ m.s $^{-1}$ as predicted in (Serres 2008a). E Forward feedback signal $\Sigma(\omega_{R,L}^{fused})$ and positioning feedback signal $\max(\omega_{R,L}^{fused})$ with their respective set-points ω_{setFwd} and $\omega_{setSide}$. The dual OF regulators strived to maintain the maximum $\max(\omega_{R,L}^{fused})$ value and the sum of the two lateral OF $\max(\omega_{R,L}^{fused})$ at their respective set-points $\omega_{setSide}$ and ω_{setFwd} , thus making the robot perform wall-following behaviour.

Using only the $\pm 90^\circ$ lateral eyes, we have:

$$\omega_{L,R}^{fused} = \omega_{\pm 90^\circ}^m \quad (13)$$

2) The case of a compound eye consisting of 4 pairs of pixels:

The four LMSs output signals are combined to generate the ω_L^{fused} and ω_R^{fused} visual signals by taking the maximum value of each weighted OF output signal according to the following equation:

$$\omega_{R,L}^{fused} = \max(K_{-\varphi_i, \varphi_i} \cdot \omega_{-\varphi_i, \varphi_i}) \quad (14)$$

with the gain K_{φ_i} computed as follow:

$$K_{\varphi_i} = \frac{1}{\sin^2 \varphi_i} \quad (15)$$

IV. EXPERIMENTAL RESULTS WITH A 4-PIXEL COMPOUND EYE

In this section, we tested the performance of the tiny hovercraft travelling along challenging unknown corridors thanks to the dual OF regulators and its bee-inspired compound eye consisting of just two pairs of pixels. When entering these corridors, the LORA robot was never provided with any explicit information about either its current forward speed V_f , its current distance from the walls D_R or D_L , or any other details of the corridor's configuration. The experiments were carried out indoors under artificial lighting conditions. The visual motion fusion method presented in equation 13 was used to generate the right and left visual motion measurements $\omega_{R,L}^{fused}$ feeding the autopilot (figure 4). In each experiment presented in this section, the OF set-points of the vision-based autopilot were fixed at $\omega_{setFwd} = 190^\circ \cdot s^{-1}$ and $\omega_{setSide} = 125^\circ \cdot s^{-1}$.

A digital camera (a Fastec Imaging TroubleShooter) was used to record the robot's trajectories. All the details of the offline processing of the LORA robot's trajectory can be consulted in [67].

A. Wall-following and centring behaviours in both straight and tapered corridors

Several 4-m long corridors with various configurations and a 0.92-m wide entrance were constructed. These configurations include a straight corridor placed on a flat terrain ($\beta = 0^\circ$, figure 5A) and two horizontally tapered corridors with a tapering angle of 7° and 14° (figures 7, 8A and 8B, respectively), in which a large constriction reducing the width of passage to 43 cm and 42 cm occurred halfway.

In figure 5, the hovercraft entered in the straight corridor taking a central course (see the 3-D trajectory in figure 5B). Trajectory show the robot glided safely at a constant clearance from the nearest wall ($D_{L,R\infty} = 0.31$ m, grey dash-dotted line), i.e., the one nearest to the starting point. This means that the sign function ($\text{sgn}(\omega_L^{fused} - \omega_R^{fused})$, figure 4C) selected the direction toward the nearest wall and the criterion $\max(\omega_{R,L}^{fused})$ sent the corresponding LMS output to the autopilot (left $+90^\circ$ LMS in figure 5E, red dotted line). The speed profiles show that the hovercraft maintained an accurate "cruise" speed of $V_{f\infty} = 0.69$ m.s $^{-1}$ (figure 5D). Jointly with the sideways OF regulator, the forward OF regulator therefore strived to maintain the sum of the two measured lateral OFs, that is, $\Sigma\omega_{R,L}^{fused}$ (figure 5E, blue dash-dotted line), at a constant value corresponding to the forward OF set-point ω_{setFwd} . The hovercraft therefore adopted a wall-following behaviour and maintained its speed constant in line with the constant local corridor width. Extension of these results for different OF set-points (figure 6) show it is possible for the hovercraft, embedding the dual OF regulators, to perform either a wall-following behaviour ($\omega_{setFwd} = 250^\circ \cdot s^{-1}$ and $\omega_{setSide} = 160^\circ \cdot s^{-1}$;

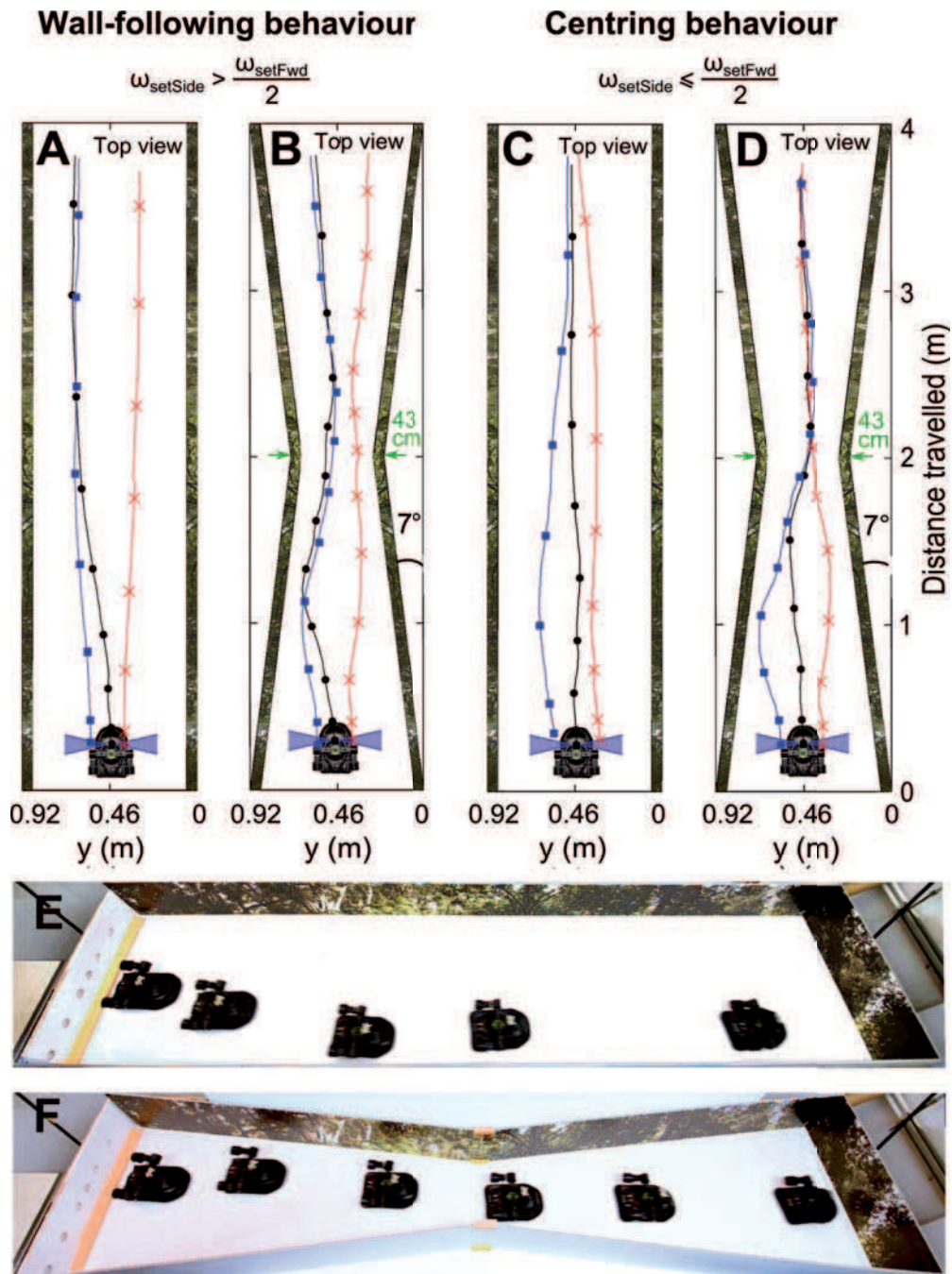


Fig. 6. Automatic speed control and lateral positioning of a miniature *fully-actuated* hovercraft navigating in both a 4-m long straight and 7°-tapered corridor. The hovercraft embeds the bee-inspired LORA autopilot based on the *dual OF regulators* and is endowed with an insect-inspired 4-pixels visual system. The robot performs either a *wall-following* (A and B) or a *centring* behaviour (C and D) which depends only on a set of OF set-points with $\omega_{setFwd} = 250 \text{ }^\circ \cdot \text{s}^{-1}$ and $\omega_{setSide} = 125 \text{ }^\circ \cdot \text{s}^{-1}$ for the *centring* behaviour, i.e. $\omega_{setSide} \leq \frac{\omega_{setFwd}}{2}$, and $\omega_{setSide} = 160 \text{ }^\circ \cdot \text{s}^{-1}$ for the *wall-following* behaviour, i.e. $\omega_{setSide} > \frac{\omega_{setFwd}}{2}$. The autonomous LORA robot entered the corridor without being informed about the configuration of the corridor and therefore operated in E a *wall-following* behaviour (1.12-second time interval chronophotography - Black trajectory in A -) and a *centring* behaviour in F (1.33-second time interval chronophotography - black trajectory in D -). Modified from [67].

figure 6A) or a *centring* behaviour ($\omega_{setFwd} = 250 \text{ }^\circ.s^{-1}$ and $\omega_{setSide} = 125 \text{ }^\circ.s^{-1}$; figure 6C) for several starting ordinates. For each case, marks on trajectories indicate the robot maintained a constant “cruise” speed during its travel in the corridor. These results show the dual OF regulator can account not only for the *wall-following* behaviour [14] but also for the *centring* behaviour [12], [13] observed on honeybees in a straight corridor. As expected from [40], the only condition to obtain either a *wall-following* behaviour is to respect $\omega_{setSide} > \frac{\omega_{setFwd}}{2}$ or a *centring* behaviour is to respect $\omega_{setSide} \leq \frac{\omega_{setFwd}}{2}$.

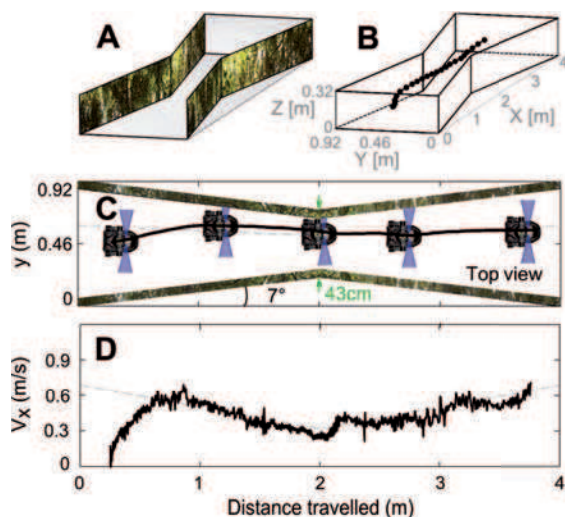


Fig. 7. Automatic speed control of the hovercraft robot in a 4-m long tapered corridor (tapering angle: 7°) with a 0.92-m wide entrance and a 0.43-m wide constriction located halfway. When entering the corridor, the robot had no information about the corridor’s configuration. A Perspective view of the 7° -tapered corridor. B 3-D trajectory of the hovercraft robot navigating along the tapered corridor, plotted every 400 ms. C Chronophotograph of the hovercraft robot in the horizontal plane. Marks on the trajectory indicate the robot’s position and orientation at 1.67-second time intervals. In the steady state, the robot showed *wall-following* behaviour, travelling at a safe clearance from the nearest wall. D Forward speed profiles V_f corresponding to the trajectory shown in C. The forward speed happens to be a linear function of the distance x travelled, and it is therefore proportional to the local corridor width D (grey dash dotted lines). The robot therefore automatically decelerated when the walls narrowed and speeded up when the walls widened. The narrowing walls are treated by the LORA autopilot like an OF disturbance. These results show that the *dual OF regulators* rejected this disturbance efficiently.

The tapered corridors (with a tapering angles of 7° and 14° , see figures 8A and 8B) were built to test the vision-based autopilot’s ability to overcome the *bilateral* OF disturbance introduced by the narrowing walls. Figure 7 shows the trajectory of the LORA robot in a 7° -tapered corridor, after being made to take a central course at the start (see the 3-D trajectory in figure 7B). The narrowing walls of a tapered corridor were treated by the LORA autopilot (figure 4) like a ‘non-constant disturbance’, since they caused linear changes in the left and right wall ordinates y_L and y_R with the distance x travelled [40]. The chronophotograph of the LORA robot (figure 7C) and the robot’s speed profile (figure 7D) show the robot’s response to the ‘non-constant OF

disturbance’: it slowed down *linearly* when approaching the narrowest point and speeded up *linearly* when the corridor widened out beyond that point (figure 7D). As reported in the simulation studies of [40], the dual OF regulators make the forward speed to depend on the local width of the corridor (the predicted speed profile is plotted as a function of D in the form of a grey dash-dotted line in figure 7D). The LORA autopilot therefore easily overcomes the OF disturbance induced by the narrowing walls by maintaining the forward speed at all times in keeping with the local corridor width. It can be seen from the tests on other starting positions y_0 shown in figure 8D that the robot performed these *wall-following* tests successfully and hugged either the right or left wall, depending on the sign of ϵ_{Side} . These trajectories (figure 8D) show that disturbances of this kind are rejected efficiently by the *dual OF regulators*.

We tested further the hovercraft navigation in a 7° -tapered corridor for several pairs of OF set-points with ($\omega_{setFwd} = 250 \text{ }^\circ.s^{-1}$; $\omega_{setSide} = 160 \text{ }^\circ.s^{-1}$) in figure 6B) and ($\omega_{setFwd} = 250 \text{ }^\circ.s^{-1}$; $\omega_{setSide} = 125 \text{ }^\circ.s^{-1}$) in figure 6D. Results show the dual OF regulators make the robot adopt an appropriate behaviour in line with the pair of OF set-points, that is either a *wall-following* behaviour (figure 6B) or a *centring* behaviour (figure 6D). In any case, the LORA robot adapted its speed to the local corridor width, which is analogous with observations made on honeybees in a similar situation [5].

A more ‘challenging’ unilateral tapered corridor (with a tapering angle of 14° , figure 8B), generating a stronger OF disturbance than the 7° -tapered corridor, was also used to test the navigation skills of the LORA robot. The results of the tests conducted in this corridor with several starting positions y_0 (figure 8E) show that the hovercraft followed either the right or left wall safely (figure 8E), depending to its initial ordinate y_0 . One exception was observed in the case of the initial ordinate $y_0 = 0.16 \text{ m}$ (the green trajectory in figure 8E), where the robot crashed into the right wall because it started too close to that wall. This incident shows the main limitation of using only $\pm 90^\circ$ lateral eyes, as they did not enable the robot to avoid this lateral obstacle. However, with all the other starting points, the LORA autopilot made the hovercraft travel safely along the 14° -tapered corridors without being greatly perturbed by the major OF disturbance induced by the narrowing of the walls, regardless of the starting position y_0 (figures 8D and 8E). The robot consistently showed suitable *wall-following* behaviour by following either the left or right wall.

The present findings on navigation in straight and tapered corridors show the dual OF regulator can account not only for the *centring* behaviour and the *wall-following* behaviour but also for the speed control observed on bees in similar situations [5], [9], [12]–[14].

B. Automatic speed control and lateral positioning in corridors with a sloping terrain

We constructed two other straight corridor configurations including either an ascending terrain ($\beta = -1^\circ$, figure 9A)

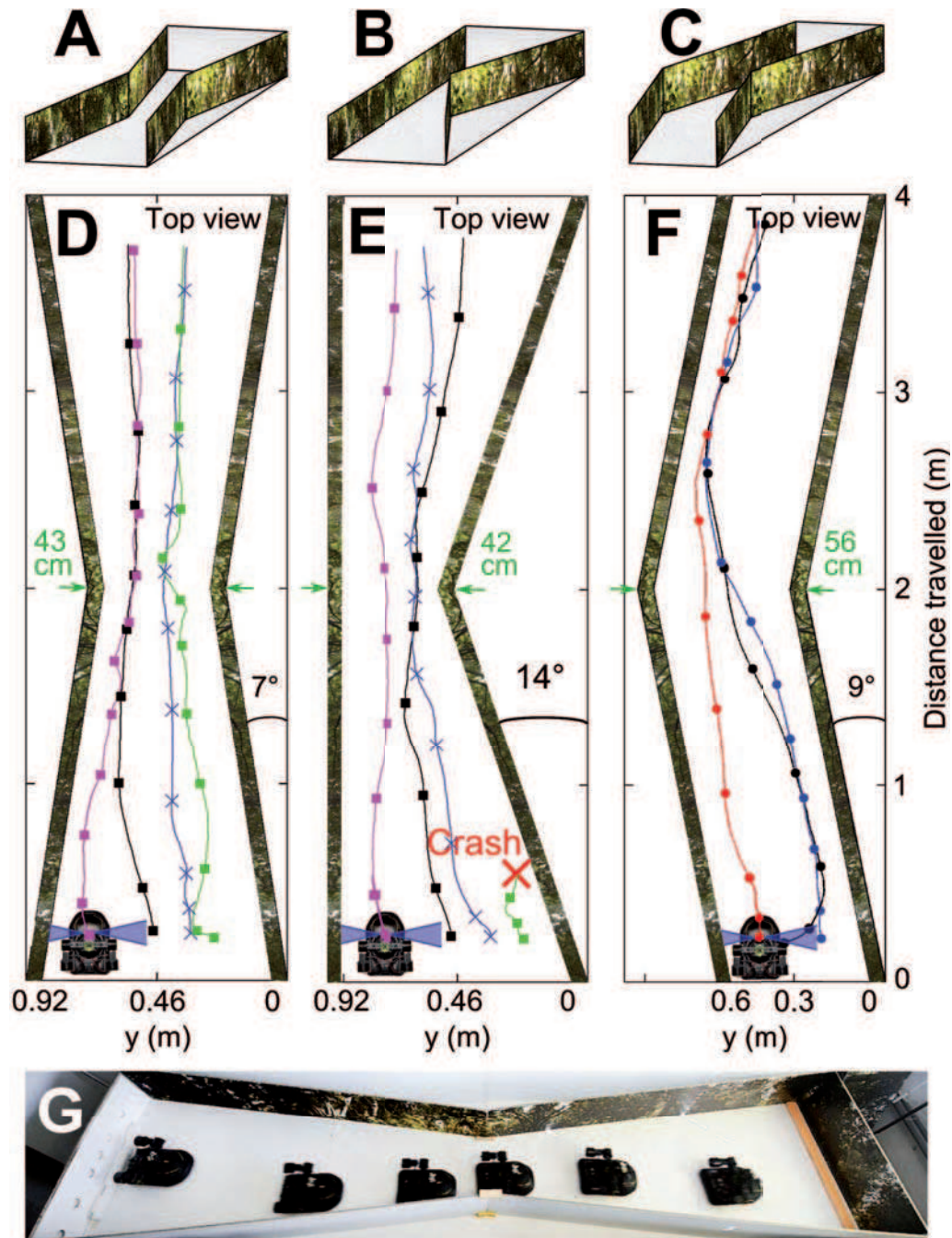


Fig. 8. Automatic wall-following behaviour as a function of the initial ordinate y_0 in both tapered (7° and 14°) and 18° -bend corridors. A and B Perspective views of the 4-m long 7° and 14° -tapered corridors with a 0.92 m wide entrance and a 0.43m and 0.42 m wide constriction located midway, respectively. C Perspective view of the 4-m long 18° -bend corridor with a constant local corridor width of 0.56 m. (D-F) Set of trajectories of the LORA robot navigating along the 7° and 14° -tapered corridors and the 18° -bending corridor in the case of several starting positions y_0 . G Chronophotograph of the robot corresponding to the trajectory shown in D, i.e. the black trajectory, with a 1.67-second time interval. The initial ordinate y_0 was treated by the *dual OF regulators* as a disturbance, and the results of these navigation tests show that the robot performed wall-following behaviour despite the unfavourable initial ordinate. However, after adopting the starting position $y_0 = 0.16$ m in the 14° -tapered corridor E, the robot crashed into the right wall of the corridor. The two pixels detecting the right visual field did not enable the robot to avoid this lateral obstacle.

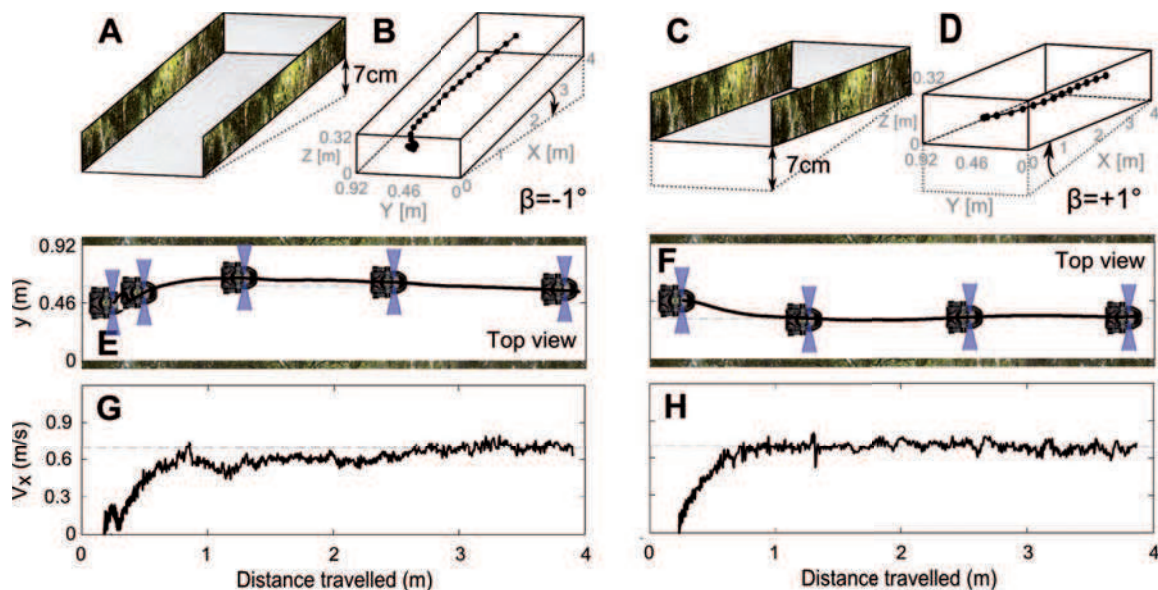


Fig. 9. Compensation for sloping terrain by the robot navigating along a straight 4-m long corridor. A and C Perspective views of the straight 4-m corridors on an ascending terrain ($\beta = -1^\circ$ A) or a descending terrain ($\beta = +1^\circ$ C). B and D 3-D trajectories of the robot plotted every 400 ms. E and F Chronophotograph of the hovercraft robot in the horizontal plane. Marks on the trajectories indicate the robot's position and orientation at 1.84-second time intervals E and 1.66-second time intervals F. G and H Forward speed profiles of the trajectories shown in E and F. In the steady state, the LORA robot followed the nearest wall perfectly at a constant clearance of $D_{R,L\infty} = 0.31$ m and kept its forward speed constant despite the configuration of the terrain, reaching a “cruising” speed of $V_{f\infty} = 0.69$ m.s $^{-1}$. The robot equipped with the *dual OF regulators* therefore compensated efficiently for the *physical disturbance* due to the sloping terrain.

or a descending terrain ($\beta = +1^\circ$, figure 9C).

The straight corridors with a sloping terrain were designed to test the ability of the *dual OF regulators* to cope with a *physical disturbance* d_{Tf} (equation 4) due to a sloping terrain. In figure 9, the hovercraft entered the two straight corridor configurations at $x_0 = 0.2$ 5m and $y_0 = 0.46$ m (see the 3-D trajectories shown in figures 9B and 9D) taking a central course. Results showed the robot making a similar *wall-following* behaviour in a straight corridor presenting a sloping terrain ($\beta = \pm 1^\circ$, figures 9E and 9F) to that one over a flat terrain ($\beta = 0^\circ$, figure 5C). Despite the physical disturbance d_{Tf} , the robot reached a constant clearance to the nearest wall ($D_{L,R\infty} = 0.31$ m; figures 9E and 9F) and a constant “cruise” speed ($V_{f\infty} = 0.69$ m.s $^{-1}$; figures 9G and 9H). This steady-state corresponds to that one expected the pair of OF set-points $\omega_{setFwd} = 190$ °.s $^{-1}$ and $\omega_{setSide} = 125$ °.s $^{-1}$ [40]. The *dual OF regulators* therefore compensate efficiently for the physical disturbance d_{Tf} (equation 4) due to the sloping terrain slope.

C. Automatic reaction to a 4-m “no contrast zone” on one of the corridor walls

Tests were then carried out on a 4-m long straight (figure 10A), tapered corridor (with tapering angles of 7° and 14° , see figures 10B and 10C), in which the left wall was lined with a natural coloured panorama. The right wall was devoid of texture, and therefore mimicked the effect of a 4-m “aperture”. Only the left 2-pixel LMS could provide the autopilot with visual motion measurements. These corridor configurations were used to test the behaviour of the LORA

robot in the presence of a “no contrast” zone on one corridor wall and its ability to cope with strong OF disturbances (in the 7° and 14° -tapered corridors) with a visual system that finally received optical stimuli on a single pair of pixels. The results obtained with several starting points in a 4-m long straight corridor are shown in figure 10A, and those obtained in tapered corridors with tapering angles of 7° and 14° are shown in figures 10B and 10C. In the straight corridor configuration, the LORA robot hugged the left wall, i.e. the textured wall, and showed “wall-following” behaviour even in the 4-m section lacking texture on the right wall (figure 10D) as observed with honeybees in [14]. The robot did not rush into the aperture because the positioning criterion selected the left 2-pixel LMS and the *sign* function ($sgn(\omega_L^{fused} - \omega_R^{fused})$, figure 4C) selected the leftward direction, that of the textured wall to be hugged. Marks on the trajectories show that the robot speeded up during its journey along the corridor. As the environment was less cluttered in the absence of texture on one wall, the *bilateral OF regulator* made the robot speed up (with $u_{fmax} = 60\%$ and $u_{liftfan} = 42\%$) until its speed limit V_{fmax} as it could not nullify ϵ_{Fwd} . From the forward dynamics of the robot on a flat terrain (equations 1 and 3, $\beta = 0^\circ$, see table II), the speed limit V_{fmax} is expected to be:

$$V_{fmax} = \lim_{t \rightarrow +\infty} K_{Fwd} \cdot u_{fmax} \cdot (1 - \exp^{-\frac{t}{\tau_{Fwd}}}) = 1.81 \text{ m.s}^{-1} \quad (16)$$

The *unilateral OF regulation* of the sideways control systems makes the clearance from the followed wall proportional to the sideways OF set-point $\omega_{setSide}$ [14]. We therefore

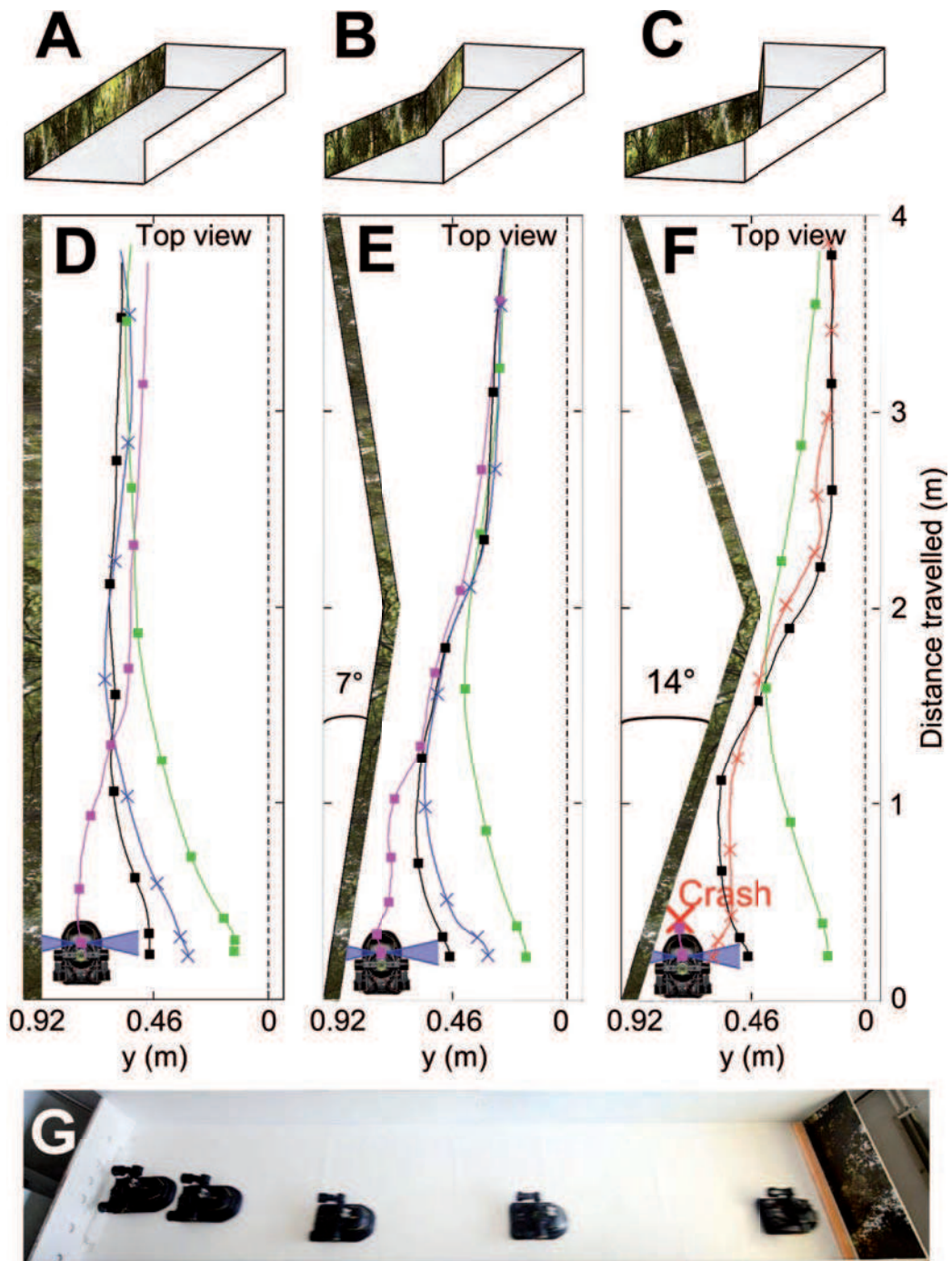


Fig. 10. Automatic reaction to a 4-m “no-contrast” zone in straight and tapered corridors. Since the right wall was devoid of texture (a uniform wall), only the left 2-pixel LMS could feed the autopilot with visual motion measurements/cues. (A-C) Perspective view of the 4-m long straight and tapered corridors B and C, with tapering angles of 7° and 14° , respectively). (D-F) Set of trajectories of the LORA robot navigating along the straight and tapered corridors after adopting several starting positions y_0 . Only the two lateral eyes were used here. G Chronophotograph of the robot’s trajectory shown in D using the black solid line, with a 1.48-second time step. F The robot navigated safely along each corridor configuration, except when it was moving too close to the wall. Despite the absence of texture on the right wall, the robot therefore managed to hug the left wall (*wall-following* behaviour) in the straight corridor D and showed safe lateral obstacle avoidance behaviour in the tapered corridors without rushing into the “no-contrast” zone E and F, using a visual system consisting of just a single pair of pixels.

have:

$$D_{L\infty} = \frac{V_{f\infty}}{\omega_{setSide}} \text{ with } V_{f\infty} \leq V_{fmax} \quad (17)$$

If the corridor was long enough, the robot would therefore be expected to reach a clearance steady state from the left wall of $D_{L\infty} = 0.83 \text{ cm}$ when reaching a speed limit $V_{fmax} = 1.81 \text{ m.s}^{-1}$ (equation 16). This result is therefore consistent with those observed on honeybees [12], [13] when traversing a narrow straight corridor with one wall covered by a structureless grey sheet.

In the tapered corridor configurations (figures 10E and 10F), the LORA robot managed successfully to avoid a lateral obstacle by rejecting the strong OF disturbance in both the 7° and 14° tapered corridors despite the starting position y_0 . The robot roughly stabilized its position steady state $D_{L\infty}$ at the end of the course (equation 17). Marks on the trajectories show that the LORA robot slowed down when approaching the narrowest point and speeded up beyond that point even in the absence of texture on the right wall. The forward controller attempted to compensate for the OF disturbance introduced by the left wall by roughly adapting the robot's course along the corridor. Whatever the corridor configuration (straight or tapered), the robot never rushed into the "no contrast" zone on the right wall and always hugged the textured wall, i.e. the left wall. However, the LORA robot crashed into the left wall after taking the starting position $y_0 = 0.77 \text{ m}$ (figure 10F), since this position was too close to the wall, the 2-pixel 90° optical direction LMS was not sufficient to avoid it but additional frontal $\pm 45^\circ$ LMSs are necessary (see figure 8E and section V-A).

These results show that our vision-based autopilot enabled the hovercraft to safely avoid a lateral obstacle in both straight and tapered corridors based on a single 2-pixel LMS measurement without being greatly disturbed by the presence of a 4-m "no contrast" zone.

D. Automatic reaction to an "optic flow step perturbation" introduced by a moving wall

The corridor built for this experiment was a straight, non-stationary 4-m long, 0.92-m wide corridor (figure 11A). The 4-m left and right walls were lined with a natural panorama depicting trees and bushes. A 1.5 meter long part of the left wall (between abscissa $x = 1.75 \text{ m}$ to $x = 3.25 \text{ m}$) consisted of a rotating band printed with the same panorama, stretched between two vertical drums. A speed regulated motor actuated the printed band forward or backward at a speed $V_p = \pm 0.30 \text{ m.s}^{-1}$ via a V-belt.

Figure 11C shows superimposed trajectories recorded under three initial band speed conditions with $V_p = \{-0.30; 0; +0.30 \text{ m.s}^{-1}\}$. Similar wall-following behaviour was observed here to that occurring in a straight stationary corridor (figure 5C). The red trajectory is the LORA robot's trajectory when the left wall was moving at a constant speed ($V_p = +0.30 \text{ m.s}^{-1}$) in the direction of travel of the robot. When the robot entered this non-stationary section, it can be seen to have moved closer to the moving wall. The green trajectory (figure 11C) was recorded in the opposite situation,

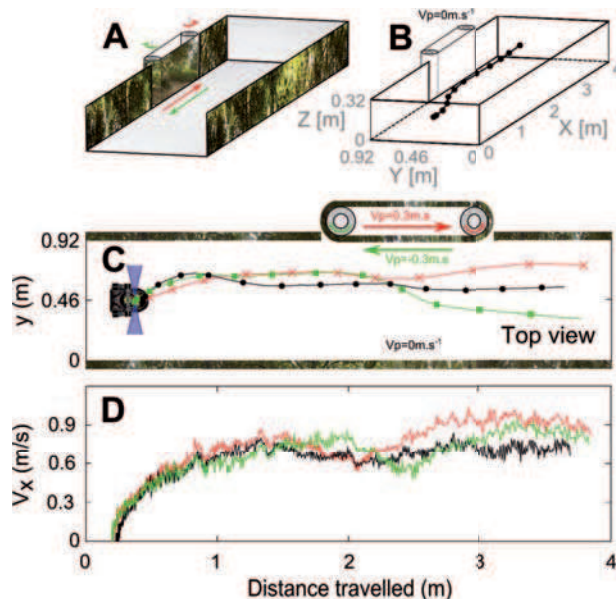


Fig. 11. Automatic reaction to the 'OF step perturbation' resulting from a non-stationary section of the left wall from abscissa $x = 1.75 \text{ m}$ to $x = 3.25 \text{ m}$. The wall was set in motion via a band stretched between two actuated drums. The walls and the strip band were lined with a natural coloured panorama. A set of three experiments was performed, corresponding to three initial band speed conditions $V_p = \{-0.3; 0; 0.3 \text{ m.s}^{-1}\}$. A Perspective view of the non-stationary corridor and the two drums. B 3-D trajectory of the LORA robot plotted every 400 ms . The band was not set in motion here ($V_p = 0 \text{ m.s}^{-1}$). C Trajectories of the LORA robot under the three initial band speed conditions [$V_p = \{-0.3; 0; 0.3 \text{ m.s}^{-1}\}$] (green, black and red trajectories, respectively). The robot started on a central course and then followed the nearest wall, i.e. the left wall, and when entering the non-stationary section of the corridor, it either approached the left wall or moved away from it, depending on the direction in which the belt was moving. In the case of the black trajectory ($V_p = 0 \text{ m.s}^{-1}$), the robot navigated at a constant clearance from the wall ($D_{L\infty} = 0.31 \text{ m}$). This behaviour of the robot in a non-stationary corridor is consistent with findings made by Kirchner and Srinivasan [12] and Portelli and colleagues [11] on honeybees flying along a non-stationary corridor. D Speed profiles of the robot's trajectories. The forward control system responsible for keeping the sum of the two lateral OFs ($\Sigma\omega_{R,L}^{used}$) constant rejected the 'OF step perturbation' due to the moving wall by increasing its forward speed (solid red line) or by decreasing its speed (solid green line).

where the rotating band was moving against the direction of travel ($V_p = -0.30 \text{ m.s}^{-1}$). The robot can be seen here to have shifted away from the moving wall. To understand how these shifts towards or away from the moving wall occurred, it is necessary to realize that the stripe speed V_p on the left wall was treated by the vision-based autopilot like an 'OF step perturbation' of $-\frac{V_p}{y}$ affecting both the forward and sideways control loops (figures 4B and 4C). When the speed of the stripe was negative $V_p = -0.3 \text{ m.s}^{-1}$, a positive perturbation of 55° .s^{-1} was applied to the autopilot, whereas $V_p = +0.3 \text{ m.s}^{-1}$ generated a negative OF step perturbation of $-55^\circ \text{ .s}^{-1}$. A negative OF step perturbation in the wall motion means that the moving wall was farther away, causing the hovercraft to accelerate while coming closer to the wall (figures 11C and 11D, red solid line); and conversely, when a larger OF was measured, the opposite effect occurred (the green solid line in figure 11C and 11D).

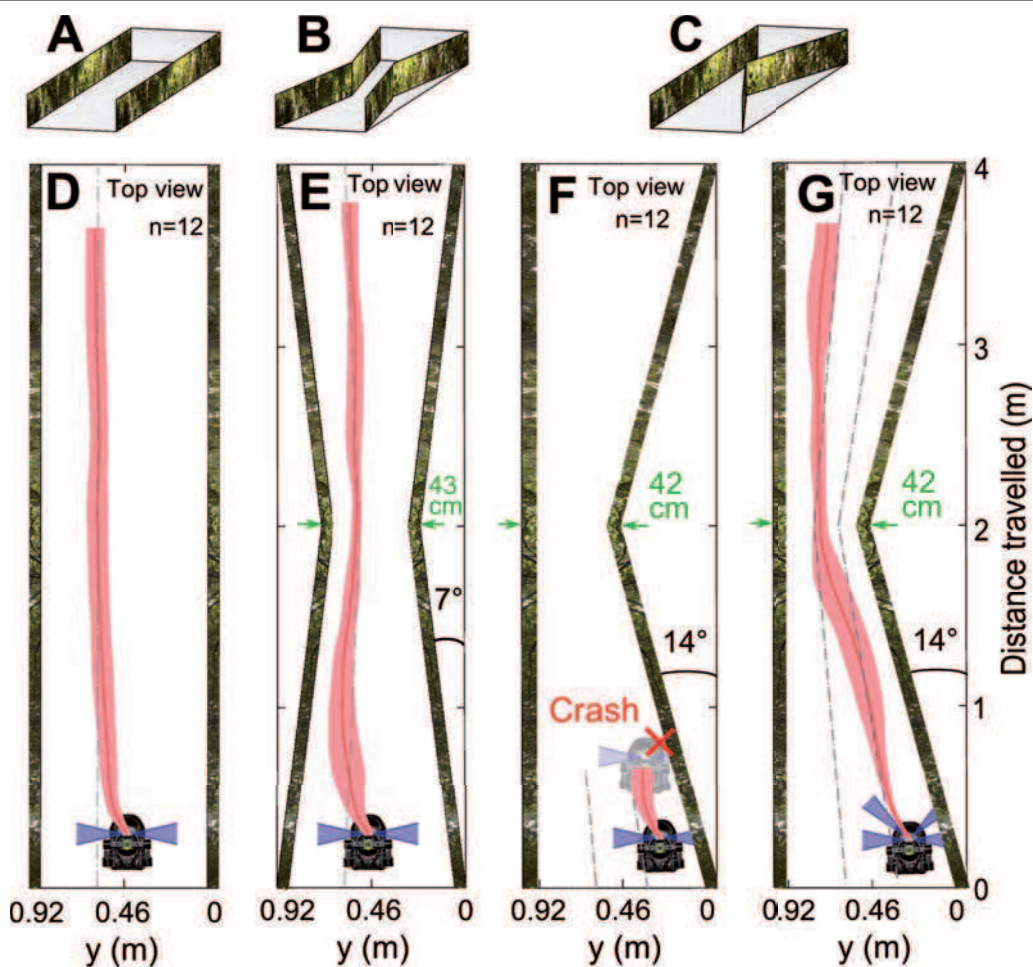


Fig. 12. Study on the repeatability of the performance of the two-eyed LORA robot (D-F) and those of the four-eyed robot G. (A-C) Perspective views of the 4-m long straight and tapered corridors. (D-F) Repeatability of the LORA robot's trajectory equipped with two $\pm 90^\circ$ lateral eyes. The mean trajectory (solid red line) and the standard deviation of the mean (pink shaded area) were computed from a set of 12 trajectories and plotted with the expected/predicted steady-state position (grey dash-dotted line) computed from the theoretical steady state analysis presented in (Serres 2008a). The robot showed efficient *wall-following* behaviour in both straight and 7° -tapered corridors. The mean trajectory (solid red line) matched the expected/predicted steady-state position very closely. As depicted in 13E, the visual system did not prevent the robot from crashing into the wall. G The four-eyed robot showed efficient *wall-following* behaviour and alternately avoided both the right and left walls. All the trajectories shown here resulted from the *dual OF regulators* scheme with $\omega_{setFwd} = 190^\circ \cdot s^{-1}$ and $\omega_{setSide} = 125^\circ \cdot s^{-1}$.

These results obtained with the *dual OF regulators* therefore account for the previous findings made on bees in a non-stationary corridor [11]–[13].

E. Automatic navigation in a 18° -bending corridor

The experiments described in this section were performed with a bending 4-m long, 0.56-m wide corridor with an 18° -bend located halfway. A perspective view of this corridor lined with natural panoramas is shown in figure 8C. This corridor was built to test the navigation performance of the LORA robot when it was no longer aligned with the local longitudinal axis of the corridor.

In this 18° -bending corridor, the robot was made to adopt several initial starting positions with $x_0 = 0.25$ m and $y_0 = \{0.16; 0.2; 0.44$ m} (figure 8F). The heading lock feedback loop was set all the way to align the robot's body with the 0° orientation, which is the mean corridor

orientation. The corridor walls formed an angle of $+9^\circ$ with the longitudinal axis of the corridor in the first half and an angle of -9° in the second half of the corridor. The results presented in figure 8F show that the robot navigated safely along the corridor regardless of its starting position y_0 and showed *wall-following behaviour despite the non-alignment of the robot's body axis with the local longitudinal axis of the corridor*. The robot also switched between following the right and left walls (black and blue trajectories, figure 8F) because the *sign* function (figure 4C) selected the direction corresponding to the nearest wall ($\min(D_{L,R})$). In the second part of the bending corridor, the robot hugged the left wall rather too closely because of the lack of visual motion sensors in its frontal part. As the corridor width was constant ($D = 0.56$ m), the forward speed was kept roughly constant at $V_f = 0.42$ m.s $^{-1}$.

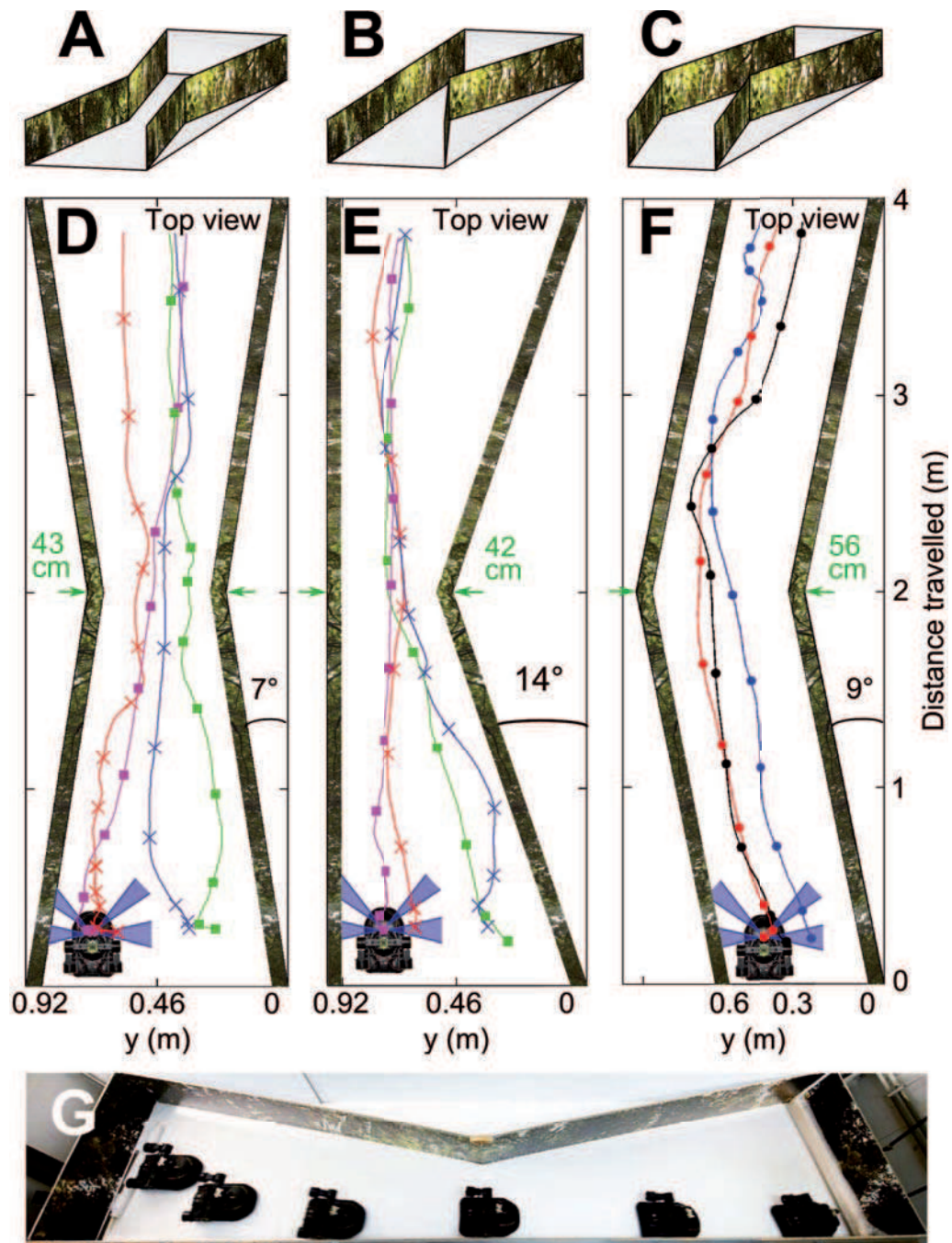


Fig. 13. Robust navigation in highly challenging corridor configurations in both tapered (7° and 14°) and 18° -bend corridors thanks to the two additional frontal eyes. (A-C) Perspective views of the 4-m long tapered corridors (A and B), 7° and 14°) and the 18° -bend corridor. (D-F) Set of trajectories of the LORA robot navigating along the tapered corridors ($y_0 = \{0.16; 0.31; 0.46; 0.61; 0.77\} \text{ m}$) and the 18° -bend corridor $y_0 = \{0.16; 0.28; 0.44\} \text{ m}$. G Chronophotograph of the robot shown in E by a solid red line, with a 1.48-second time step. In comparison with the two-eyed robot (figure 8), the LORA robot gave better navigation performance since it never crashed into the walls E and travelled at a safer clearance from the walls F.

F. Repeatability of the LORA robot's performance with a 4-pixel compound eye

Figure 12 gives the results of a repeatability study on the LORA robot, based on a set of 12 successive trajectories in one straight (figure 12A) and two tapered corridors (figures 12B and 12C) with tapering angles of 7° and 14° . The mean trajectory (red solid line) and the standard deviation of the mean (pink shaped area) were calculated taking a set of 12 trajectories recorded the LORA robot. The robot was equipped with the 4-pixel visual system shown in figures 12D-F) (where the FOVs are given by a blue conical shape). In both the straight and 7° -tapered corridors (figures 12D and 12E), the LORA robot entered the corridor in a central position and achieved safe *wall-following* behaviour by controlling both its speed and its clearance from the walls on the sole basis of OF cues during the 12 successive trajectories. The mean trajectory and the standard deviation of the mean show that the robot achieved excellent performance in terms of the repeatability and reliability of the *dual OF regulators* as means of guiding the robot along unknown corridors, equipped with an eye consisting of only four pixels. However, when the robot started closer the wall ($y_0 = 0.16$ m, figure 12F) in the 14° -tapered corridor it crashed in all 12 successive trials, which shows the limitations of using only a 4-pixel compound eye to navigate in highly challenging corridors.

V. EXPERIMENTAL RESULTS WITH A FRONTAL AND WIDER FIELD-OF-VIEW 8-PIXEL COMPOUND EYE

In this section, our previous compound eye was improved by adding two LMSs, i.e., two pairs of pixels in the frontal part facing at an azimuthal angle of $\pm 45^\circ$ in order to obtain a minimalistic compound eye consisting of 4 pairs of pixels connected to 4 LMSs. The two frontal eyes would help the robot navigate in more demanding to 'extreme' corridor configurations. Visual motion signals were fused according to equations 14 and 15 to generate the left and right visual motion signals (ω_L^{fused} and ω_R^{fused} , respectively). The OF set-points were fixed at $\omega_{setFwd} = 190$ $^\circ.s^{-1}$ and $\omega_{setSide} = 125$ $^\circ.s^{-1}$.

A. Safe navigation in stringent corridor configurations with two additional frontal eyes

The LORA robot was therefore tested in a 7° tapered corridor (figure 13A), a 14° unilateral tapered corridor (figure 13B) and a 18° -bending corridor (figure 13C) to determine the navigation performance of the latest version of the LORA robot equipped with this novel compound eye.

The trajectories of the LORA robot with several starting positions y_0 in the tapered and bend corridors are presented in figures 13D-F. The robot showed perfect *wall-following* behaviour in each of the corridor configurations tested, regardless of its starting position y_0 . Marks on the trajectories show that the robot also controlled its speed depending on the local corridor width. It is worth mentioning that in the case of the initial ordinate $y_0 = 0.16$ m in the 14° -tapered corridor, the robot avoided the right wall and followed it

at a safe clearance, whereas it crashed into the wall when it was equipped only with its original 4-pixel compound eye (figures 8F and 12F). In the 18° -bend corridor, the robot traveled at a wider clearance from the nearest wall (figure 13F) than it did with only a four pixel-based vision system (figure 8F), which confirms that frontal eyes improve the ability of the LORA robot to navigate safely in highly challenging corridor configurations.

B. Repeatability of the LORA robot's performance with a 8-pixel compound eye

In the experiments shown in figure 12G, the robot was centered at the start in 12 successive trials in a 14° -tapered corridor. The grey dash-dotted lines give the steady-state clearance of the LORA robot from the nearest wall with the OF set-points $\omega_{setFwd} = 190$ $^\circ.s^{-1}$ and $\omega_{setSide} = 125$ $^\circ.s^{-1}$. Unlike the robot equipped with a 4-pixel visual system, the mean trajectory (figure 12F, red solid line) shows that the robot navigated successfully along the 14° -tapered corridor without crashing into the wall during 12 successive trials (figure 12G). The robot therefore showed more reliable *wall-following* behaviour thanks to the addition of the $\pm 45^\circ$ optical directional eyes.

VI. DISCUSSION

Here we present a complete benchmark for a miniature *fully actuated* hovercraft (figure 1A) equipped with a bee-inspired autopilot named LORA. The performance of the robot endowed with a minimalistic visual system (consisting of only four or eight pixels forming up to four LMSs) show that the hovercraft can navigate safely under purely visual control along highly challenging unknown corridors such as a straight corridor over a flat or sloping terrain (figures 6A, 6C, 5 and 9), even when one wall is devoid of texture (figure 10), or when one wall is moving (figure 11) and even when the corridor narrows or bends on the horizontal plane (figures 6B, 6D, 7,8 and 13). The 8-pixel compound eye was implemented on the LORA robot to improve its lateral obstacle avoidance performance in demanding corridor configurations (figure 13) by increasing the optical directions to $\pm 45^\circ$. The LORA's robustness to physical and strong OF disturbances was also tested. The lack of contrast on one side (figure 10), tapered corridors (figures 7, 8 and 13) and a moving wall (figure 11) were treated by the LORA autopilot like strong OF perturbations, and a sloping terrain was approached in the same way as an external physical disturbance.

Fully actuated robots can be endowed with these navigation skills by equipping them with a very minimalistic visual system consisting of only four or eight pixels, i.e. two or four 2-pixel LMSs, forming an insect-inspired but primitive vision system, which requires little computational resource. The LORA autopilot guides the hovercraft in the 2-D horizontal plane, avoiding all the obstacles encountered by performing maneuvers involving only translational degrees of freedom along the X- and Y-axis. The keystone of the LORA autopilot is the *heading-lock* system, which enables the robot to experience a purely translational OF, and the pair of intertwined

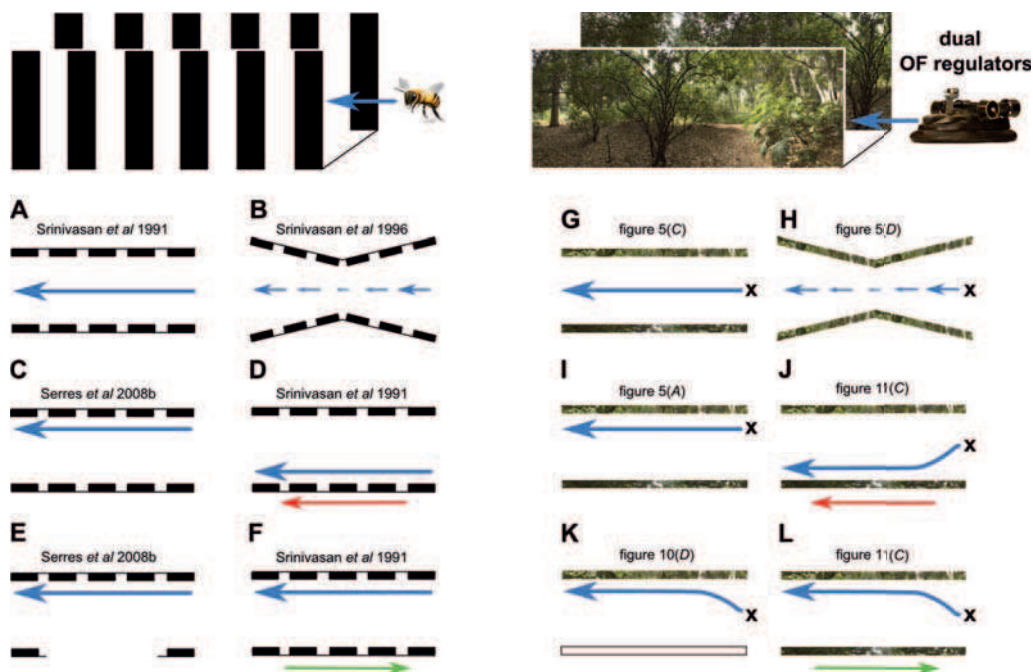


Fig. 14. Summarize of the similarities of the bee behaviours observed in the last two decades ethological studies (A-F) and the *fully actuated* robot behaviours equipped with the bee-inspired LORA autopilot tested in similar situations (G-L). These results show the *dual OF regulators* can be viewed as a working hypothesis to explain how the honeybee *Apis Mellifera* controls both its speed and position on the horizontal plane of a constraint corridor. Blue arrows represent the mainly direction of the agent moving in a corridor where the entrance is represented by a cross. Red and green arrows represents the direction of motion of the moving wall in case of a non-stationary corridor.

OF regulators forming the *dual OF regulators*, which was designed to hold the perceived OF constant by adjusting the forward and side thrusts.

The main advantage of this visuomotor control system is that it operates efficiently *without any need for explicit speed or distance measurements or estimations, hence without any need for speed or range sensors*. The hovercraft robot behaves appropriately as observed with honeybees (figure 14) although it is completely “unaware” of its ground speed and its clearance from the two walls and the width of the corridor: it behaves appropriately by automatically adjusting its speed to the environment and automatically maintaining a safe clearance from the walls. In a corridor with a given width, the vehicle’s behaviour depends entirely on the two set-points (ω_{setFwd} and $\omega_{setSide}$) of the *dual OF regulators* which determine either a *wall-following* behaviour (figure 6A and 6B) or a *centring* behaviour (figure 6C and 6D for instance). The figure 14 exhibits the similarities between the bee behaviours observed in the last two decades ethological studies and our robot behaviours, equipped with the *dual OF regulators*, tested in similar situations. As summarized in this latter figure, the explicit LORA control system (figure 4) can be regarded as a possible explanation for the behaviour of free-flying bees along a stationary [6], [12]–[14] or non-stationary corridor [11]–[13] or a tapered corridor [5], [9] or even a corridor with a lacking of texture on one wall [12], [13] mimicking the effect of an “aperture” [14]. This autopilot is in line with a Gibsonian viewpoint [79] in which

an animal’s visual system drive the locomotor system without any representation of the environment [23], [46], [51].

The *direction control system* based on the *sign* function (figure 4C) can limit the robot maneuvers, as it only acts as a “reflex” mechanism by making the robot always take the direction of the nearest wall ($\min(D_{L,R})$, and hence $\max(\omega_{L,R})$ on figure 4C).

The sideways control system with which the LORA autopilot is equipped makes the robot’s trajectory highly dependent on the corridor’s configuration (as can be seen in figure 8E and 8F). The robot is therefore always bound to aimlessly follow the nearest wall. For instance, an artificial bee equipped with the LORA autopilot (with OF set-points typical of *wall-following* behaviour) entering the left entrance of a straight corridor would never reach a reward placed near the right wall at the end of the corridor, because the robot would always follow the left wall as long as another set of OF set-points is not available to make it switch from one wall to the other.

VII. CONCLUSION

In conclusion, this hovercraft was able to travel along challenging unfamiliar corridors such as non-stationary corridors and those comprising “no contrast” zones, tapered and bending corridors, and even a sloping terrain, using very few pixels (four or eight pixels) without any need for *metric sensors such as rangefinders or velocimeters*. We also reported how we have improved the navigation performance of the robot in exacting corridor configurations by adding

two frontal eyes. The LORA autopilot based on the *dual OF regulators* and presented here is a first step toward a deft, lightweight (mass of the autopilot electronics: 8.17 g) power-lean (power consumption: 0.75 W) low-cost visuomotor control system which could be potentially installed on a 3-D free-flying Micro-Air Vehicle (MAV) by adding a ventral and a dorsal *OF regulator* capable of performing ground following, ceiling following or even docking tasks as tested in [68]. This autopilot also opens the way to finding solutions to the automatic guidance of other types of holonomic and fully actuated vehicles such as blimps, underwater vehicles, quadrotors, and even helicopters with counter-rotating rotors (in which the pitch and roll axes are uncoupled).

The next step will consist in exploring other visual fusion strategies, especially an anticipatory feedforward action involving the $\pm 45^\circ$ lateral eyes, as tested in [66] to help the robot anticipate and achieve lateral obstacle avoidance. We also intend to enlarge the field of view in the central part of the visual field to improve the OF measurements and enable the robot to successfully negotiate more challenging corridors comprising L-junctions or T-junctions.

ACKNOWLEDGMENTS

We thank R. Brinkworth and D. O'Carroll (Adelaide University, Australia) for kindly making their High Dynamic Range panoramic images available to us, J. Diperi and Y. Luparini for their involvement in the mechanical design of the LORA robot and the test bench, M. Boyron for his involvement in the overall electronic design of the LORA robot, A. Manecy and T. Raharijaona for their fruitful comments and J. Blanc for correcting the English manuscript. This research was supported partly by CNRS (Life Science; Information Science; Engineering Science and Technology), Aix-Marseille University and the French National Research Agency (ANR) (EVA project and IRIS project under ANR grants' number ANR608-CORD-007-04 and ANR-12-INSE-0009 respectively).

APPENDIX

TABLE I
TRANSFER FUNCTIONS ON FIGURE 4

$H_c(s) = K_c$	With $K_c = 9.17 \cdot 10^{-3} V/^\circ$
$H_g(s) = K_g$	With $K_g = 5 \cdot 10^{-3} V/(^\circ/s)$
$G_\Psi(s) = \frac{1}{s} \cdot \frac{H_\Psi}{1 + \tau_\Psi \cdot s}$	With $H_\Psi = 4.4 \cdot 10^{-1} V$ and $\tau_\Psi = 3 \cdot 10^{-1} s$
$G_{Fwd}(s) = \frac{K_{Fwd}}{1 + \tau_{Fwd} \cdot s}$	See values in Table II
$G_{Side}(s) = \frac{1}{s} \cdot \frac{K_{Side}}{1 + \tau_{Side} \cdot s}$	See values in Table III
$C_\Psi(s) = K_\Psi$	With $K_\Psi = 3$
$C_{\dot{\Psi}}(s) = K_1 \cdot \frac{1 + \tau_1 \cdot s}{s}$	With $K_1 = 5$ and $\tau_1 = 3 \cdot 10^{-1} s$
$C_{Fwd}(s) = K_2 \cdot (1 + \frac{1}{\tau_2 \cdot s}) \cdot \frac{1}{1 + \tau_3 \cdot s}$	With $K_2 = 0.8$, $\tau_2 = 2.7 \cdot 10^{-1} s$ and $\tau_3 = 8 \cdot 10^{-3} s$
$C_{Side}(s) = K_3 \cdot \frac{1 + a \cdot T \cdot s}{1 + T \cdot s} \cdot \frac{1}{1 + \tau_4 \cdot s}$	With $K_3 = 4 \cdot 10^{-1}$, $a = 5.7$, $T = 2.1 \cdot 10^{-1}$ and $\tau_4 = 1.59 \cdot 10^{-2} s$

TABLE II
IDENTIFIED FORWARD DYNAMICS IN FUNCTION OF THE
LIFT FAN CONTROL SIGNAL

$u_{LiftFan} (\%)$	$K_{Fwd}(10^{-3} m \cdot s^{-1} \cdot \%^{-1})$	$\tau_{Fwd}(s)$	$Fit\ factor(\%)$
42	30.11	2.67	99.8
41	28.11	2.64	99.3
40	25.91	2.63	99.7
39	20.88	2.02	99.4
38	18.45	1.54	98.3
37	16.29	1.34	96.1

TABLE III
IDENTIFIED SIDE DYNAMICS IN FUNCTION OF THE LIFT FAN
CONTROL SIGNAL

$u_{LiftFan} (\%)$	$K_{Side}(10^{-3} m \cdot s^{-1} \cdot \%^{-1})$	$\tau_{Side}(s)$	$Fit\ factor(\%)$
42	16.28	2.54	94.32
41	13.92	2.45	92.28
40	11.02	2.2	92.11
39	8.76	1.89	89.12
38	8.32	1.48	88.72
37	7.58	1.2	84.54

REFERENCES

- [1] G. Horridge, "The evolution of visual processing and the construction of seeing systems," *Proceedings of the Royal society of London. Series B. Biological sciences*, vol. 230(1260), pp. 279–292, 1987.
- [2] T. Whiteside and G. Samuel, "Blur zone," *Nature*, vol. 225, pp. 94–95, 1970.
- [3] J. Koenderink and A. van Doorn, "Facts on optic flow," *Biological Cybernetics*, vol. 56, pp. 247–254, 1987.
- [4] C. David, "Compensation for height in the control of groundspeed by *Drosophila* in a new "barber's pole" wind tunnel," *J Comp Physiol A*, vol. 147, no. 4, pp. 485–493, 1982.
- [5] M. Srinivasan, S. Zhang, M. Lehrer, and T. Collett, "Honeybee navigation en route to the goal: visual flight control and odometry," *Journal of Experimental Biology*, vol. 199(1), pp. 237–244, 1996.
- [6] E. Baird, M. V. Srinivasan, S. Zhang, and A. Cowling, "Visual control of flight speed in honeybees," *Journal of Experimental Biology*, vol. 208(20), pp. 3895–3905, 2005.
- [7] E. Baird, M. Srinivasan, S. Zhang, R. Lamont, and A. Cowling, "Visual control of flight speed and height in the honeybee," in *From Animals to Animals 9*, S. Nolfi, G. Baldassarre, R. Calabretta, J. Hallam, D. Marocco, J.-A. Meyer, O. Miglino, and D. Parisi, Eds. Springer Berlin / Heidelberg, 2006, vol. 4095, pp. 40–51.
- [8] E. Baird, T. Kornfeldt, and M. Dacke, "Minimum viewing angle for visually guided ground speed control in bumblebees," *The Journal of Experimental Biology*, vol. 213, pp. 1625–1632, 2010.
- [9] G. Portelli, F. L. Roubieu, F. Ruffier, and N. Franceschini, "Honeybees' speed depends on dorsal as well as lateral, ventral and frontal optic flows," *PLoS ONE*, vol. 6(5), p. e19486, 2011.
- [10] N. Franceschini, F. Ruffier, and J. Serres, "A bio-inspired flying robot sheds light on insect piloting abilities," *Current Biology*, vol. 17, pp. 329–335, 2007.
- [11] G. Portelli, F. Ruffier, and N. Franceschini, "Honeybees change their height to restore their optic flow," *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, vol. 196(4), pp. 307–313, 2010.
- [12] W. Kirchner and M. Srinivasan, "Freely flying honeybees use image motion to estimate object distance," *Naturwissenschaften*, vol. 76(6), pp. 281–282, 1989.
- [13] M. Srinivasan, M. Lehrer, W. Kirchner, and S. Zhang, "Range perception through apparent image speed in freely flying honeybees," *Visual neuroscience*, vol. 6(5), pp. 519–535, 1991.
- [14] J. Serres, G. Masson, F. Ruffier, and N. Franceschini, "A bee in the corridor: centering and wall-following," *Naturwissenschaften*, vol. 95(12), pp. 1181–1187, 2008.
- [15] H. Wagner, "Flow-field variables trigger landing in flies," *Nature*, vol. 297(5862), pp. 147–148, 1982.

- [16] L. F. Tammero and M. H. Dickinson, "The influence of visual landscape on the free flight behavior of the fruit fly *Drosophila melanogaster*," *Journal of Experimental Biology*, vol. 205(3), pp. 327–343, 2002.
- [17] A. Straw, S. Lee, and M. Dickinson, "Visual control of altitude in flying *Drosophila*," *Current Biology*, vol. 20(17), pp. 1550–1556, 2010.
- [18] T. Neumann and H. Bülthoff, "Behavior-oriented vision for biomimetic flight control," in *Proceedings of the EPSRC/BBSRC international workshop on biologically inspired robotics*, 2002, pp. 196–203.
- [19] J. Humbert, R. Murray, and M. Dickinson, "A control-oriented analysis of bio-inspired visuomotor convergence," in *44th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC)*, Seville, Spain, December 2005, pp. 245–250.
- [20] L. Muratet, S. Doncieux, Y. Briere, and J. Meyer, "A contribution to vision-based autonomous helicopter flight in urban environments," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 50(4), pp. 195–209, 2005.
- [21] A. Beyeler, J. C. Zufferey, and D. Floreano, "Vision-based control of near-obstacle flight," *Autonomous Robots*, vol. 27(3), pp. 201–219, 2009.
- [22] D. Coombs and K. Roberts, "'Bee-bot': using peripheral optical flow to avoid obstacles," in *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, vol. 1825, Boston, USA, September 1992, pp. 714–721.
- [23] A. Duchon and W. Warren, "Robot navigation from a gibsonian viewpoint," in *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 1994. 'Humans, Information and Technology'*, vol. 3, San Antonio, USA, October 1994, pp. 2272–2277.
- [24] J. Santos-Victor, G. Sandini, F. Curotto, and S. Garibaldi, "Divergent stereo in autonomous navigation: From bees to robots," *International Journal of Computer Vision*, vol. 14(2), pp. 159–177, 1995.
- [25] K. B. Dev, A. and F. Groen, "Navigation of a mobile robot on a temporal development of the optic flow," in *In proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Grenoble, France, September 1997, pp. 558–563.
- [26] K. Weber, S. Venkatesh, and M. Srinivasan, "Insect inspired behaviors for the autonomous control of mobile robots," in *Proceedings of the 13th International Conference on Pattern Recognition, 1996.*, M. V. Srinivasan and S. Venkatesh, Eds. Vienna, Austria: U.K.: Oxford Univ. Press, August 1997, pp. 226–248.
- [27] T. C. Barattoff, G. and H. Neumann, "Combined space-variant maps for optical flow navigation," *Biological Cybernetics*, vol. 83(3), pp. 199–209, 2000.
- [28] C. N. O. Carelli, R. Soria and E. Freire, "Stable agv corridor navigation with fused vision-based controls signals," in *In proceedings the 28th IEEE Conference of Industrial Electronics Society (IECON)*, vol. 3, Sevilla, Spain, November 2002, pp. 2433–2438.
- [29] A. Argyros, D. Tsakiris, and C. Groyer, "Biomimetic centering behavior mobile robots with panoramic sensors," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 11(4), pp. 21–30, 2004.
- [30] S. Hrabar, G. Sukhatme, P. Corke, K. Usher, and J. Roberts, "Combined optic-flow and stereo-based navigation of urban canyons for a UAV," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Los Angeles, USA, August 2005, pp. 3309–3316.
- [31] S. Griffiths, J. Saunders, A. Curtis, B. Barber, T. McLain, and R. Beard, "Maximizing miniature aerial vehicles," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 13, pp. 34–43, 2006.
- [32] C. McCarthy, N. Barnes, and R. Mahony, "A robust docking strategy for a mobile robot using flow field divergence," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 24(4), pp. 832–842, 2008.
- [33] J. Conroy, G. Gremillion, B. Ranganathan, and J. S. Humbert, "Implementation of wide-field integration of optic flow for autonomous quadrotor navigation," *Autonomous robots*, vol. 27(3), pp. 189–198, 2009.
- [34] S. Hrabar and G. Sukhatme, "Vision-based navigation through urban canyons," *Journal of Field Robotics*, vol. 26(5), pp. 431–452, 2009.
- [35] M. Guzel and R. Bicker, "Optical flow based system design for mobile robots," in *IEEE Conference on Robotics Automation and Mechatronics (RAM)*, 2010, Singapore, June 2010, pp. 545–550.
- [36] J. Humbert and A. Hyslop, "Bioinspired visuomotor convergence," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 26(1), pp. 121–130, 2010.
- [37] L. Cremean, W. Dunbar, D. van Gogh, J. Hickey, E. Klavins, J. Meltzer, and R. Murray, "The Caltech Multi-Vehicle Wireless Testbed," in *Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control*, vol. 1, Las Vegas, USA, December 2002, pp. 86–88.
- [38] S. Fuller and R. M. Murray, "A hovercraft robot that uses insect-inspired visual autocorrelation for motion control in a corridor," in *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, Karon Beach, Phuket, December 2011, pp. 1474–1481.
- [39] M. Srinivasan, J. Chahl, K. Weber, S. Venkatesh, M. Nagle, and S. Zhang, "Robot navigation inspired by principles of insect vision," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 26(2), pp. 203–216, 1999.
- [40] J. Serres, D. Dray, F. Ruffier, and N. Franceschini, "A vision-based autopilot for a miniature air vehicle: joint speed control and lateral obstacle avoidance," *Autonomous Robot*, vol. 25(1), pp. 103–122, 2008.
- [41] H. Esch, W. Nachtigall, and S. N. Kogge, "Correlations between aerodynamic output, electrical activity in the indirect flight muscles and wing positions of bees flying in a servomechanically controlled wind tunnel," *Journal of comparative physiology*, vol. 100, no. 2, pp. 147–159, 1975.
- [42] C. Ellington and C. Ellington, "The aerodynamics of hovering insect flight. i. the quasi-steady analysis," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, vol. 305(1122), pp. 1–15, 1984.
- [43] J. Zeil, N. Boeddeker, and J. M. Hemmi, "Vision and the organization of behaviour," *Current Biology*, vol. 18(1), no. 8, pp. 320–323, 2008.
- [44] F. Ruffier and N. Franceschini, "Optic flow regulation: the key to aircraft automatic guidance," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 50(4), pp. 177–194, 2005.
- [45] C. Blanes, "Appareil visuel élémentaire pour la navigation à vue d'un robot mobile autonome (Adviser: N. Franceschini)," Master's thesis, 1986.
- [46] J. Pichon, C. Blanes, and N. Franceschini, "Visual guidance of a mobile robot equipped with a network of self-motion sensors," in *Proceedings of SPIE: Mobile Robots IVPichon1989*, vol. 1195, Bellingham, USA: Society of Photo-optical Instrumentation Engineers, 1989, pp. 44–53.
- [47] C. Blanes, "Guidage visuel d'un robot mobile autonome d'inspiration bionique (Adviser: N. Franceschini)," Ph.D. dissertation, INP Grenoble, 1991.
- [48] N. Franceschini, F. Ruffier, J. Serres, and S. Viollet, "Optic flow based visual guidance: from flying insects to miniature aerial vehicles," in *Aerial vehicles*, T. M. Lam, Ed. Vienna: In-Tech, 2009, pp. 747–770.
- [49] N. Franceschini, "Early processing of colour and motion in a mosaic visual system," *Neuroscience Research (Suppl. 2)*, pp. 17–49, 1985.
- [50] N. Franceschini, A. Riehle, and A. Le Nestour, *Facets of vision*. Springer-Verlag, Berlin, 1989, ch. Directionally Selective Motion Detection by Insect Neurons, pp. 360–390.
- [51] N. Franceschini, J. M. Pichon, and C. Blanes, "From insect vision to robot vision," *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 337, pp. 283–294, 1992.
- [52] J. Krammer and C. Koch, "Pulse-based analog VLSI velocity sensors," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing*, vol. 44(2), pp. 86–101, 1997.
- [53] F. Ruffier, S. Viollet, S. Amic, and N. Franceschini, "Bio-inspired optical flow circuits for the visual guidance of micro-air vehicles," in *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, vol. 3, Bangkok, Thailand, May 2003, pp. 846–849.
- [54] F. Aubépart and N. Franceschini, "Bio-inspired optic flow sensors based on FPGA: Application to Micro-Air Vehicles," *Microprocessors and Microsystems*, vol. 31, pp. 408–419, 2007.
- [55] M. Pudas, S. Viollet, F. Ruffier, A. Kruusing, S. Amic, S. Leppävuori, and N. Franceschini, "A miniature bio-inspired optic flow sensor based on low temperature co-fired ceramics (ltcc) technology," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 133(1), pp. 88–95, 2007.
- [56] R. Moeckel and S.-C. Liu, "Motion detection chips for robotic platforms," in *Flying Insects and Robots*. Springer, 2010, pp. 101–114.
- [57] S. Viollet, F. Ruffier, T. Ray, M. Menouni, F. Aubépart, L. Kerhuel, and N. Franceschini, "Characteristics of three miniature bio-inspired optic flow sensors in natural environments," in *Fourth International Conference on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM)*, Venice, Italy, July 2010, pp. 51–55.
- [58] F. Expert, S. Viollet, and F. Ruffier, "Outdoor field performances of insect-based visual motion sensors," *Journal of Field Robotics*, vol. 28(4), pp. 974–977, October 2011.
- [59] F. L. Roubieu, F. Expert, M. Boyron, B.-J. Fuschlock, S. Viollet, and F. Ruffier, "A novel 1-gram insect based device measuring visual

- motion along 5 optical directions,” in *IEEE Sensors Conference*, Limerick, Ireland, October 2011, pp. 687–690.
- [60] F. Expert, F. Roubieu, and F. Ruffier, “Interpolation based “time of travel” scheme in a visual motion sensor using a small 2d retina,” in *IEEE Sensors Conference*, Taipei, Taiwan, October 2012, pp. 2231–2234.
- [61] F. Roubieu, F. Expert, G. Sabiron, and F. Ruffier, “Two-directional 1-g visual motion sensor inspired by the fly’s eye,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 13(3), pp. 1025–1035, March 2013.
- [62] G. Sabiron, P. Chavent, T. Raharijaona, P. Fabiani, and F. Ruffier, “Low-speed optic-flow sensor onboard an unmanned helicopter flying outside over fields,” in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2013 (in press).
- [63] F. Mura and N. Franceschini, “Obstacle avoidance in a terrestrial mobile robot provided with a scanning retina,” in *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Tokyo, Japan, September 1996, pp. 47–52.
- [64] T. Netter and N. Franceschini, “A robotic aircraft that follows terrain using a neuromorphic eye,” in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Lausanne, Switzerland, September 2002, pp. 129–134.
- [65] F. Ruffier and N. Franceschini, “Octave, a bioinspired visuo-motor control system for the guidance of micro-air vehicles,” in *SPIE Conference on Bioengineered and Bioinspired Systems*, A. D. Rodriguez-Vazquez, A. and R. Carmona, Eds., vol. 5119, Maspalomas, Spain, May 2003, pp. 1–12.
- [66] —, “Aerial robot piloted in steep relief by optic flow sensors,” in *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Nice, France, September 2008, pp. 1266–1273.
- [67] F. L. Roubieu, J. Serres, N. Franceschini, F. Ruffier, and S. Viollet, “A fully-autonomous hovercraft inspired by bees; wall-following and speed control in straight and tapered corridors,” in *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, Guangzhou, China, December 2012 (in press).
- [68] F. Expert and F. Ruffier, “Controlling docking, altitude and speed in a circular high-roofed tunnel thanks to the optic flow,” in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Vilamoura, Portugal, October 2012 (in press), pp. 1125–1132.
- [69] N. Franceschini, A. Riehle, and A. Le Nestour, “Directionally selective motion detection by insect neurons,” in *Facets of vision*, D. Stavanga and R. Hardie, Eds. Berlin: Springer-Verlag, 1989, pp. 360–390.
- [70] F. Ruffier and F. Expert, “Visual motion sensing onboard a 50-g helicopter flying freely under complex vicon-lighting conditions,” in *IEEE International Conference on Complex Medical Engineering (CME)*, Kobe, Japan, July 2012, pp. 634–639.
- [71] H. Seguchi and T. Ohtsuka, “Nonlinear receding horizon control of an underactuated hovercraft,” *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 13(3-4), no. 3-4, pp. 381–398, 2003.
- [72] Z. Jin, S. Waydo, E. Wildanger, M. Lammers, H. Scholze, P. Foley, D. Held, and R. Murray, “MVWT-II: the second generation Caltech Multi-Vehicle Wireless Testbed,” in *Proceedings of the 2004 American Control Conference*, vol. 6, Boston, USA, July 2004, pp. 5321–5326.
- [73] H. Eichner, M. Joesch, B. Schnell, D. F. Reiff, and A. Borst, “Internal structure of the fly elementary motion detector,” *Neuron*, vol. 70, no. 6, pp. 1155–1164, 2011.
- [74] K. Götz, “Optomotorische untersuchung des visuellen systems einiger augenmutanten der fruchtfliege drosophila,” *Biological Cybernetics*, vol. 2(2), pp. 77–92, 1964.
- [75] R. A. Seidl, “Die sehfelder und ommatidien divergenzwinkel von arbeiterin, königin und drohn der honigbiene (apis mellifica),” Ph.D. dissertation, 1982.
- [76] M. Ibbotson, “Evidence for velocity-tuned motion-sensitive descending neurons in the honeybee,” *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, vol. 268(1482), pp. 2195–2201, 2001.
- [77] K. v. Frisch, “Gelöste und ungelöste rätsel der bienensprache,” *Naturwissenschaften*, vol. 35, no. 1, pp. 12–23, 1948.
- [78] J. Riley, J. Osborne, I. Woiwood, D. Reynolds, C. Thomas et al., “Flight trajectories of foraging insects: observations using harmonic radar,” in *Insect movement: mechanisms and consequences. Proceedings of the Royal Entomological Society’s 20th Symposium, London, UK, September 1999*. CABI, 2001, pp. 129–157.
- [79] J. Gibson, *The perception of the visual world*. New York: Houghton Mifflin, 1950.

Résumé

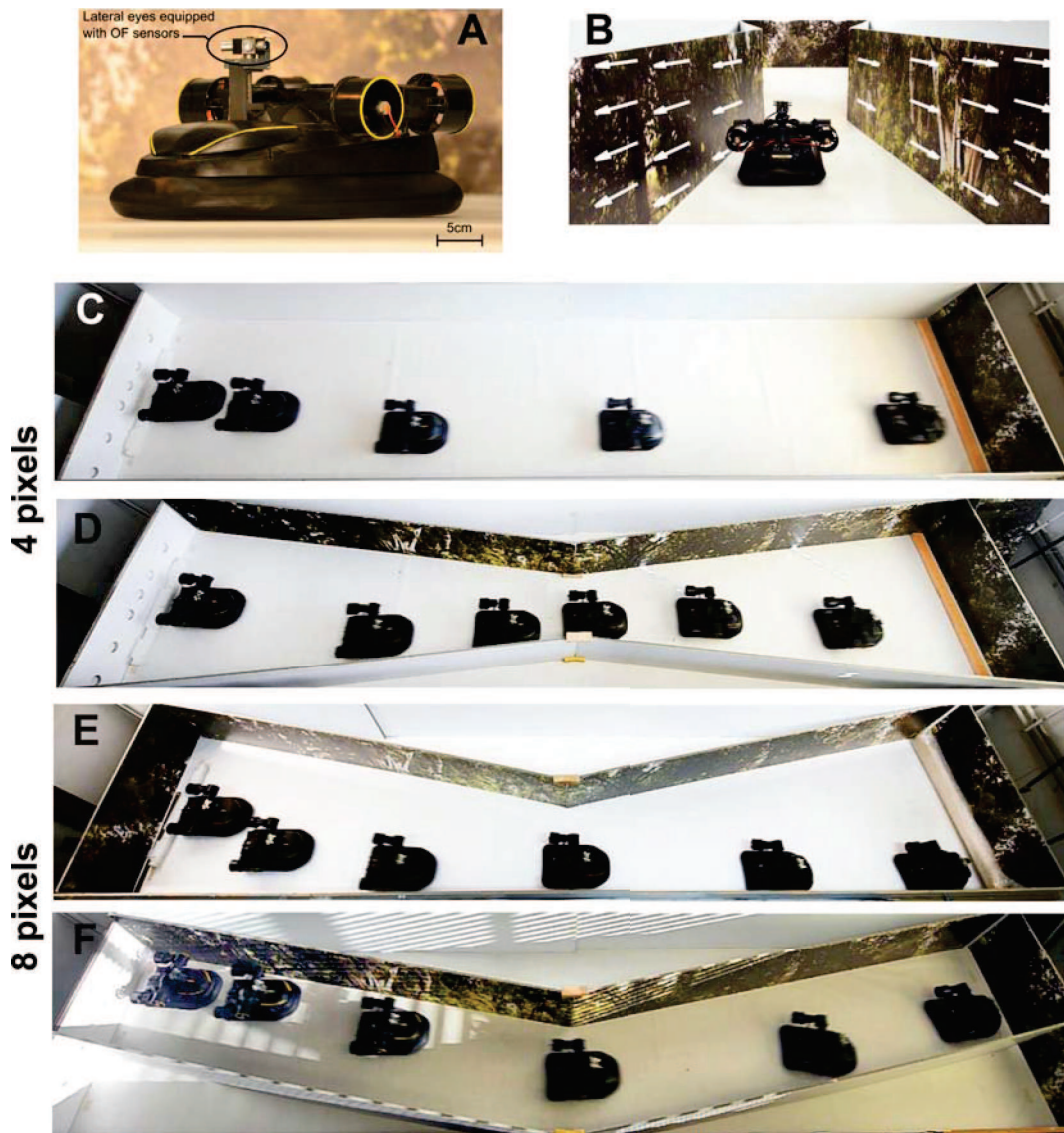


FIGURE 3.1 – Chronophotographies de l’aéroglesseur miniature (A) équipé de son œil composé minimaliste (de 4 à 8 pixels) effectuant, sur la base de la double régulation du flux optique, un suivi de paroi (B) dans un tunnel droit comportant une absence de texture sur l’un des murs latéraux (C), dans un tunnel double fuselé (angle de fuselage : 7° , (D)), un tunnel fuselé unilatéralement (angle de fuselage : 7° , (E)) et un tunnel présentant un virage (F).

Dans ce chapitre, nous avons présenté un test complet du schéma de contrôle LORA, mis en œuvre sur un aéroglesseur miniature totalement actionné (figure 3.1A). Les performances de navigation du micro-robot obtenues, montrent qu’un véhicule totalement actionné peut naviguer, sur le principe de la régulation du flux optique (figure 3.1B), dans diverses configurations de tunnels tel qu’un tunnel droit compor-

tant un terrain plat, ascendant ou descendant, une absence de texture sur un mur (figure 3.1C), une zone non-stationnaire et même un tunnel fuselé (figure 3.1D&E) ou présentant un virage. Un système visuel minimaliste, inspiré de celui des insectes, constitué de deux à quatre DEMs, permet au robot de percevoir la vision du mouvement (flux optique) dans les régions latérales ($\varphi = \pm 90^\circ$) et frontales ($\varphi = \pm 45^\circ$) de son champ visuel. Les configurations de tunnel, dans lequel le robot navigue, mettent à l'épreuve la robustesse du pilote automatique. En effet, l'absence de texture sur un mur, une zone non-stationnaire ou un tunnel fuselé sont considérés par le pilote automatique LORA comme des perturbations de flux optique, tout comme un terrain en pente représente une perturbation physique sur le robot. Les résultats montrent que le pilote automatique rejette ces perturbations et permet au robot d'assurer un comportement de centrage ou de suivi de paroi dans ces tunnels qui ne dépendent que des valeurs du couple de consigne de flux optique ω_{setFwd} et $\omega_{setSide}$, tout en assurant une vitesse sécuritaire, proportionnelle à la section locale du tunnel. Une étude de répétabilité montre que l'ajout de deux paires de pixels dans la région frontale du champ visuel du robot (directions visuelles à $\pm 45^\circ$) améliore nettement ses performances de navigation, en terme d'évitement d'obstacles latéraux, dans un tunnel présentant un fuselage unilatéral important. De précédentes études menées par Hrabar and Sukhatme [2006] ont montré théoriquement et en simulation au contrôle du vol d'un hélicoptère, que des capteurs visuels (caméra ou autre) dirigées à 45° constituent une direction optimale dans la mesure du flux optique pour la navigation dans un tunnel. Observation qui a pu être retrouvé, un peu plus tard, dans l'application d'évitement d'obstacles d'une aile volante dans un environnement naturel [Beyeler et al., 2009]. Cependant, les directions à $\pm 90^\circ$ restent les positions azimutales maximisant le flux optique latéral pour la détection (meilleur rapport signal-sur-bruit) et la régulation du flux optique latéral pour les tâches d'évitement d'obstacles et de contrôle automatique de vitesse.

Le point-clé du pilote automatique réside dans une boucle à verrouillage de cap qui permet au robot de maintenir son cap et de ne générer sur son œil composé que du flux optique de translation, seul dépendant de sa vitesse d'avance et de sa position par rapport aux obstacles. Une paire de régulateurs de flux optique maintient le flux optique bilatéral et unilatéral perçu à une valeur préférée (consigne de flux optique) en intervenant conjointement sur les pousseurs arrières et latéraux du micro-robot qui interviennent sur la vitesse du robot et sa position aux obstacles.

Dès lors, le schéma de contrôle *explicite* LORA peut être considéré comme une hypothèse plausible permettant d'expliquer comment une abeille navigue dans le plan horizontal d'un tunnel droit stationnaire [Kirchner and Srinivasan, 1989, Srinivasan

et al., 1991, Baird et al., 2005, Serres et al., 2008b], fuselé [Srinivasan et al., 1996], non-stationnaire [Kirchner and Srinivasan, 1989, Srinivasan et al., 1991], présentant une ouverture latérale [Serres et al., 2008b] ou une texture uniforme [Kirchner and Srinivasan, 1989, Srinivasan et al., 1991]. En résumé, équipé du pilote automatique bio-mimétique LORA et de deux paires de capteurs de flux optique bio-mimétique, le robot a pu reproduire dans des conditions similaires, les comportements de l'abeille observés *sans avoir à mesurer ni estimer sa propre vitesse ou sa distance par rapport aux obstacles*. La mise en œuvre robotique de ce pilote automatique constitue une première étape vers la modélisation du contrôle du vol de l'abeille dans les trois dimensions de l'espace, comme illustré par le pilote automatique *ALIS* [Portelli et al., 2008, 2010a] (voir chapitre 5).

Chapitre 4

Article III. A two-directional 1-gram visual motion sensor inspired by the fly's eye

Article publié en 2013 dans *IEEE Sensors Journal* : pp. 1025–1035.

Auteurs : Frédéric L. Roubieu, Fabien Expert, Guillaume Sabiron, et Franck Ruffier.

Nous abordons dans ce chapitre la conception électronique d'un capteur de flux optique, élément essentiel dans le guidage automatique des micro-robots inspirés du comportement des insectes. Ce capteur de flux optique répond à toutes les contraintes de mise en œuvre à bord des futurs drones avec notamment une masse inférieure au gramme (optique incluse), une petite taille ($23.3 \times 12.3 \text{ mm}$) et une faible consommation ($< 0.23 \text{ W}$). Il exploite pleinement sa rétine de 6 pixels (champ visuel horizontal : 28.8°) constituant 5 paires de pixels (i.e., 5 DEMs), qui sur la base du « temps de passage » peuvent chacune fournir une estimation de la vitesse angulaire de défilement d'une scène naturelle dans son champ visuel, et ce, dans une plage de mesure de $[25^\circ.s^{-1}; 350^\circ.s^{-1}]$. Ce micro-capteur de flux optique embarque un seul micro-contrôleur 16bits (dsPIC33FJ128GP802 Microchip©) et peut être doté de fonctionnalités évolutives. Nous étudions dans ce chapitre deux méthodes de fusion multi-sensorielles de ces 5 mesures de flux optique. La première méthode repose sur une combinaison basée sur l'opérateur *médian*, assurant la fusion de ces 5 dernières mesures en une seule dont nous verrons, dans ce chapitre, qu'elle améliore grandement les performances d'estimation du flux optique en terme de rafraîchissement (*refresh-rate*, $f_{refresh}$) et de précision de mesure (Std_{error}) en comparaison d'un simple capteur « élémentaire » constitué d'une seule paire de pixels. Nous étudierons également, à partir du même capteur, comment nous avons augmenté l'intégration de nos « Détecteurs Élémentaires de Mouvement » afin de fournir une estimation du sens de

défilement d'une scène ainsi que son flux optique associé. Ces dernières fonctions ont exigé une mise en œuvre optimale du principe du « temps de passage » dans notre micro-contrôleur.

A two-directional 1-gram visual motion sensor inspired by the fly's eye

Frédéric L. Roubieu, *Student Member, IEEE*, Fabien Expert, *Student Member, IEEE*, Guillaume Sabiron, *Student Member, IEEE*, and Franck Ruffier, *Member, IEEE*

Abstract—Optic flow based autopilots for Micro-Aerial Vehicles (MAVs) need lightweight, low-power sensors to be able to fly safely through unknown environments. The new tiny 6-pixel visual motion sensor presented here meets these demanding requirements in term of its mass, size and power consumption. This 1-gram, low-power, fly-inspired sensor accurately gauges the visual motion using only this 6-pixel array with two different panoramas and illuminance conditions. The new visual motion sensor's output results from a smart combination of the information collected by several 2-pixel Local Motion Sensors (LMSs), based on the "time of travel" scheme originally inspired by the common housefly's Elementary Motion Detector (EMD) neurons. The proposed sensory fusion method enables the new visual sensor to measure the visual angular speed and determine the main direction of the visual motion without any prior knowledge. By computing the median value of the output from several LMSs, we also ended up with a more robust, more accurate and more frequently refreshed measurement of the 1-D angular speed.

Index Terms—Optic flow, Vision, Fly, Bio-inspiration, Neuro-morphic, Motion sensor.

I. INTRODUCTION

MICRO AERIAL VEHICLES (MAVs) constitute a class of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) which can be used for the remote observation of hazardous environments without any risk to human life. MAVs need to be equipped with onboard sensors and flight control devices in order to perform tasks such as those performed by optic flow (OF) based aerial robots: obstacle avoidance [1]–[7], terrain following and automatic landing [2], [8]–[12], tracking a moving target [13], [14] and controlling their forward speed [15]. MAVs endowed with these abilities would acquire greater autonomy, and at the same time, the ground operators' arduous task of piloting an almost constantly invisible aircraft would be greatly simplified. Nature has taught us that flying insects, which came into

Copyright© 2012 IEEE. Personal use of this material is permitted. However, permission to use this material for any other purposes must be obtained from the IEEE by sending a request to pubs-permissions@ieee.org.

An earlier version of this paper was presented at the 2011 IEEE SENSORS Conference and was published in its proceedings.

This research was supported partly by CNRS Institutes (Life Science; Information Science; Engineering Science and Technology), Aix-Marseille University, the French National Research Agency (ANR) (EVA project under ANR-ContInt grant number ANR608-CORD-007-04), and by European Commission via the CURVACE project. The CURVACE project acknowledges the financial support of the European Commission's Future and Emerging Programme for Research, under FET-Open grant number: 237940.

The authors are with Aix-Marseille University, CNRS, Institute of Movement Science, Biorobotics Dept. UMR7287, 13288, Marseille, France e-mail: {frederic.roubieu, fabien.expert, guillaume.sabiron, franck.ruffier}@univ-amu.fr.

G. Sabiron is also with the French Aerospace Lab (ONERA, Systems Control and Flight Dynamics -DCSD-), 31055 Toulouse, France.

existence several hundred million years ago, have developed particularly elegant solutions to the problem of navigating swiftly in unfamiliar and complex environments. Winged insects are able to enter and explore unknown environments without any sonar or laser range-finder: their visually guided performances depend mainly on OF sensing processes [10], [16]–[25]. The OF perceived by a moving agent (an animal, human or robot) is a vector field that gives the angular speed ω (magnitude in $^\circ/s$) at which any contrasting object in the environment is moving past the eyes [26]. The fly's eye has been shown to be sensitive to two-directional motion [27] and also to be driven by a minimum of two photoreceptors inside the same ommatidium [28], [29]. The fly's eye is therefore one of the most suitable animal model available for studies on motion detecting neurons. Based on studies on the fly's visual system previously conducted at our Laboratory, in which electrophysiological recordings were performed on single neurons while microstimuli were being applied to single photoreceptor cells in a single ommatidium of the compound eye [28], a 2-pixel Local Motion Sensor (LMS) was developed [30], based on the principle known today as the "time of travel" scheme [31].

Using such bioinspired sensors, various simulated vision-based autopilots [31]–[34] based on OF sensing techniques were subsequently developed at our Laboratory, and a series of terrestrial [31], [35] and aerial robots [9], [14], [36], [37] were constructed. The "robotfly" ("Robot Mouche" in French) built by Franceschini's team in 1991 was a completely autonomous wheeled robot equipped with a compound eye consisting of 114 electronic LMSs implemented in analog technology using Surface Mounted Devices (SMDs) [35]. The "robotfly" was able to steer its way through an unknown field full of obstacles at a relatively high speed (up to 50 *cm/s*) [35]. The "robotfly" also implemented two-directional analog LMSs using a maximum operator to determine the direction of motion [35], [38]. However, the size and mass of these analog sensors were not compatible with the drastic constraints imposed on free flying MAVs in terms of their mass (they have to weigh less than 100 *g*), size (they must measure less than 15 *cm*) and power consumption.

Several teams therefore started to design new visual motion sensors by mixing analog and digital processing, which are lighter and easier to implement onboard MAVs than a camera-based system [39] or fully analog sensors. One possible approach consisted in developing visual motion sensors using analog and digital Very-Large-Scale Integration (VLSI) technologies, such as those based on the Reichardt correlator [40]–

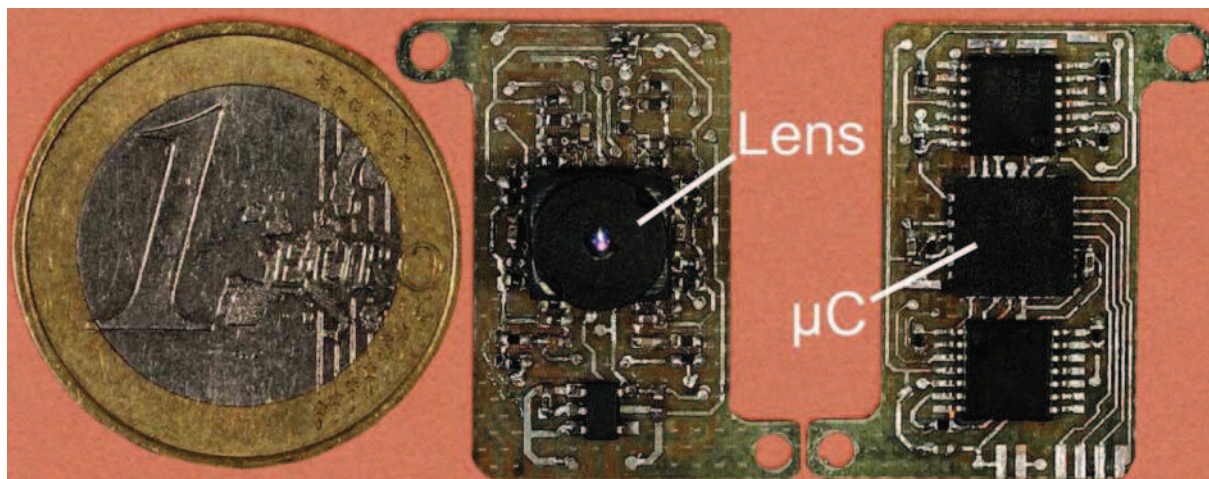


Fig. 1. Top view of the 1-gram microcontroller-based visual motion sensor (size: $23.3 \times 12.3 \text{ mm}$) with its lens (focal length: 2 mm) mounted on the one-dimensional 6-photosensor array, and bottom view of the PCB (thickness: 0.4 mm) with its tiny low-power 16-bit μC (dsPIC from Microchip© Company).

[43], the Pulse-based velocity sensor [44] or Barrows' design [45]. Only a few VLSI-based sensors have been implemented onboard MAVs so far (flight with limited degrees of freedom: [46], free-flight: [2], [45]).

Off-the-shelf mouse sensors were also recently characterized [47] and mounted onboard terrestrial [48], [49] and aerial robotic platforms [5], [50]. The performances of these systems have not been properly assessed so far in terms of their resolution, accuracy, invariance to illuminance and contrast, apart from two studies [51], [52].

At our Laboratory, several versions of 2-pixel motion sensors based on the "time of travel" scheme originally based on the fly's eye [29] were developed using either a Field Programmable Gate Array (FPGA) [53] or a microcontroller (μC) [54]–[60].

In the current study, we present a new tiny μC -based visual motion sensor weighing only 1 gram (Fig. 1), which receives visual inputs from a 6-pixel array integrated circuit. By combining several 2-pixel motion sensors, the performances of the visual motion sensor were highly improved. The first sensory fusion method of this sensor produces a combined output based on the median value of 5 LMS measurements in a single pre-determined direction of motion which drastically improved the accuracy and the refresh rate ($f_{refresh}$) of the angular speed measurements [58]. An improved sensory fusion method determines an accurate estimation of the direction and the magnitude of the angular speed in the detected direction of motion. This whole processing was embedded into a μC which has sufficient computational resources for carrying out the requisite signal processing tasks efficiently, while its mass is compatible with the very low avionic payload allowed on MAVs.

The first sensory fusion method implemented in our tiny μC -based visual motion sensor is presented in the section II that gives a short description of the bio-inspired visual system and the principles underlying the 2-pixel "time of travel" scheme. Experiments performed on the visual motion sensor, which was tested indoors, are described in Section III. The results

of these experiments are presented in Section IV. Section V describes the results obtained thanks to an improved sensory fusion method able to perfectly determine the direction of motion without any prior knowledge and to give an accurate and robust assessment of the magnitude of the motion in term of angular speed.

II. DESCRIPTION OF THE DEVICE

1) *Photoreceptor configuration*: The front end of the visual motion sensor designed and developed in this study was based on an off-the-shelf photosensor array (iC-LSC from iCHaus Company, <http://www.ichaus.de>) consisting of 2 rows of 6 photodiodes. A fixed-gain current amplifier is integrated into each photodiode. In order to detect a large number of contrasting objects at low illuminance levels, the photosensors in each column were paired to increase the signal to noise ratio by increasing the sensitive surface two-fold from $300 \mu\text{m} \times 800 \mu\text{m}$ to $300 \mu\text{m} \times 1600 \mu\text{m}$. This one-dimensional 6-pixel array was then mounted on a cheap, lightweight lens (Sparkfun SEN-00637) borrowed from a mobile telephone camera (Fig. 1). As in flies, each photosensor features a Gaussian Angular Sensitivity Function (ASF), [61] [Fig. 2(b)], which results in insects from the spatial convolution of the photoreceptor's diameter with the point spread function of the facet lenslet [62], [63] and in our sensor, from the defocusing of the lenslet. The ASF of the "lens-photoreceptor" system was assessed by slowly rotating the visual motion sensor placed 50 cm in front of a point light source [Fig. 2(a)]. By defocusing the lens (i.e., by reducing the distance between the lens and the retina), we obtained a similar Gaussian sensitivity profile to that of the housefly. The full width at half height of the Gaussian curve (the acceptance angle) $\Delta\rho$ determines the cutoff frequency of the low-pass spatial filtering process (Fig. 3), whereas the inter-receptor angle $\Delta\varphi$ (i.e., the angle between two adjacent optical axes) determines the angular speed (ω_i^m) measurement range.

The defocusing process was adjusted to obtain an appropriate

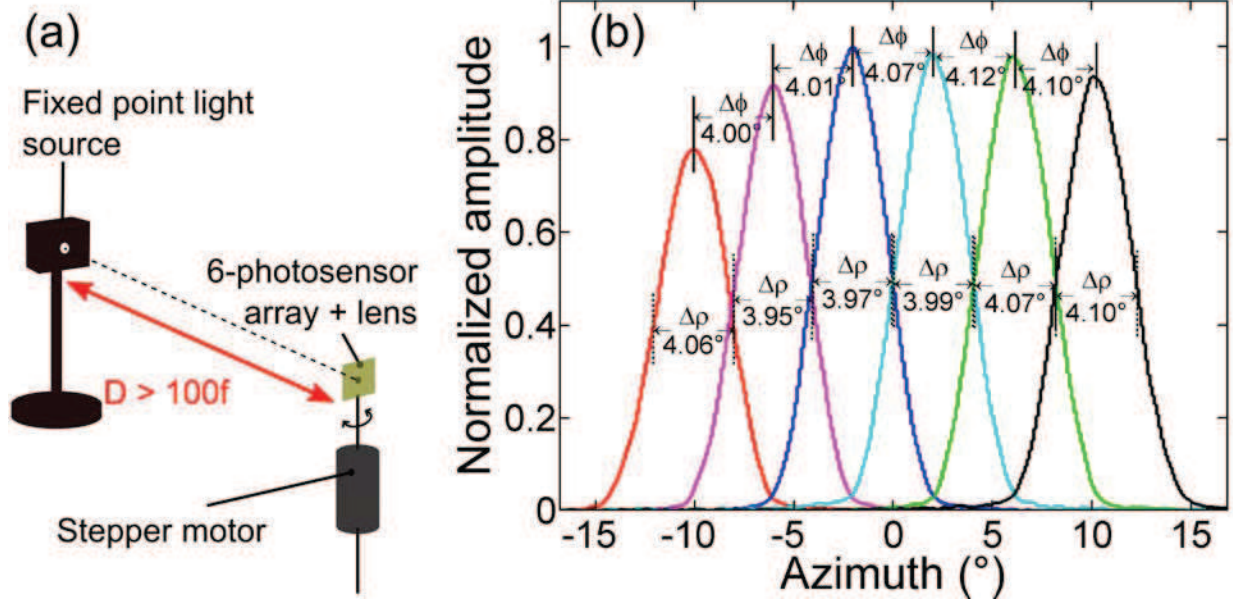


Fig. 2. (a) Scheme of the test bench used to determine the Gaussian ASFs of the 6-photosensor array obtained by slowly rotating the visual motion sensor mounted on the motor shaft of a stepper motor and placed at a distance $D = 50 \text{ cm}$ in front of a fixed point light source. (b) Raw Gaussian ASFs of the photosensor array.

bell-shaped ASF projected onto the photosensor array, as occurs in some diurnal insects [66], where:

$$\Delta\varphi = \Delta\rho \quad (1)$$

The visual photoreceptor axes are separated by an inter-receptor angle $\Delta\varphi = 4^{\circ}$ and each pixel features an acceptance angle $\Delta\rho = 4^{\circ}$ [Fig. 2(b)]. The horizontal Field Of View (FOV) of the visual motion sensor is 28.8° .

2) *Local Motion Sensor (LMS)*: Each LMS assesses the angular speed ω_i [i.e., a 1-D component of the OF, Fig. 3(a)] of any dark-to-light (ON) or light-to-dark (OFF) contrast in the same way as the fly's motion-detecting neurons. This "perceived" angular speed ω_i is transformed by the optical system into a delay Δt_i between 2 neighboring photosensor signals defined as follows:

$$\Delta t_i = \frac{\Delta\varphi}{\omega_i} \quad (2)$$

The functional "time of travel" scheme used here consists of 6 processing steps [30], [54], [65] measuring the delay Δt_i , thus giving the angular speed ω_i^m (Fig. 3):

- Step 1: Low-pass spatial filtering is achieved by defocusing the lens, thus giving each pixel a Gaussian ASF.
- Step 2: Analog bandpass filtering: high-pass filtering ($f_c = 20 \text{ Hz}$) enhances the contrast information and eliminates the DC component of the photoreceptor signals. This step is followed by a first-order low-pass filtering step, where $f_c = 136 \text{ Hz}$.
- Step 3: Digitizing and filtering: second-order fixed-point digital low-pass filtering ($f_c = 30 \text{ Hz}$) reduces any high frequency noise introduced by the artificial indoor lighting (100 Hz).
- Step 4: Hysteresis thresholding is performed to distin-

guish between 'ON' and 'OFF' contrast transitions (i.e. dark-to-light and light-to-dark transitions, respectively) in each channel.

- Step 5: A time delay circuit is triggered by one channel and stopped by the neighboring channel. This circuit measures the time Δt_i elapsing between similar ('ON' or 'OFF') transitions occurring in two adjacent photoreceptors.
- Step 6: Computing the 1-D angular speed of a contrast in the visual field of the LMS, using a look-up table which converts the delay Δt_i into the measured angular speed ω_i^m .

3) *Implementation and optimization*: Our visual motion sensor generates 5 simultaneous local measurements ω_i^m of the 1-D angular speed of a moving natural panorama in a measurement range of more than one decade, ranging from $25^{\circ}/s$ to $350^{\circ}/s$. The sensor output is the median value ω_{median}^m of the 5 LMSs. The whole processing of the 5 LMSs and the computation of the median value were carried out on a dsPIC33FJ128GP802 μC working at a sampling frequency of 2 kHz and running at 40 MIPS. This low-power 16-bit μC was a very good candidate in term of size footprint (28 pins QFN-S package, see Table I for dimension), power consumption and performances allowing it to carry out the whole processing using a 16-bit MAC unit ("Multiplier + ACcumulation"), 1 SPI and $6 \times 12\text{-bit}$ ADCs (Analog to Digital Converters) while meeting with the constraints of MAVs [see Fig. 3(a)].

The μC embedded onboard the visual motion sensor (Fig. 1) is connected to an external Bluetooth module via a test-board. This radio link allows the operator to record all the data synchronously and to convey it to a computer for analysis. The program of the 16-bit μC was developed on

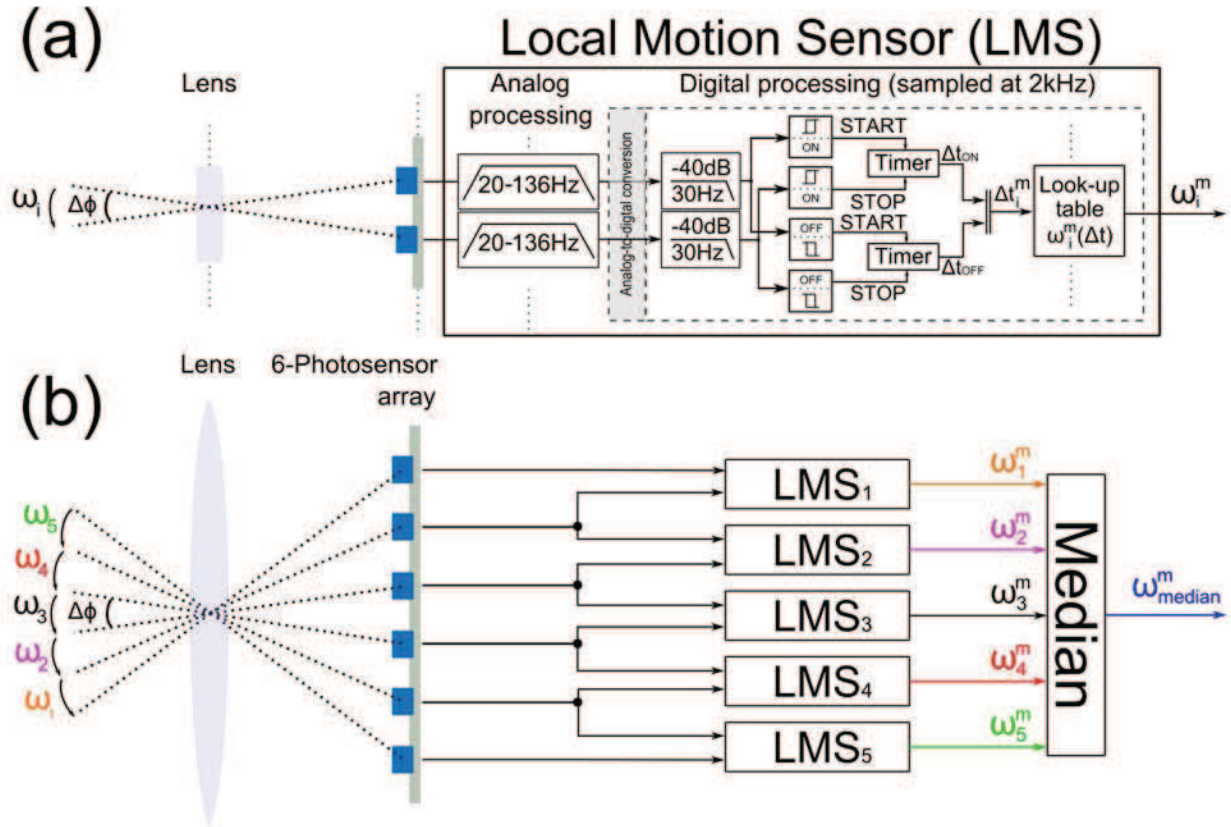


Fig. 3. General processing architecture of the visual motion sensor, including its 5 LMSs. (a) Processing architecture of one LMS. The visual signals delivered by neighboring photoreceptors are filtered both spatially and temporally by an analog bandpass filter with cutoff frequencies [20 Hz, 136 Hz] and a second order fixed-point digital low-pass filter with a cutoff frequency of 30 Hz. The filtered photoreceptor signals are then thresholded to determine the angular speed ω_i^m , using the “time of travel” scheme previously developed at our Laboratory [30], [31], [64], [65]. The “time of travel” Δt_i , which is proportional to the inverse of ω_i^m , elapsing between two filtered photoreceptor signals is measured by a timer: Δt_{ON} and Δt_{OFF} are measured by means of ON and OFF contrast distinguishing processes [29]. These delays Δt_i are used to generate the 1-D angular speed ω_i^m in the visual field of the 1-D LMS. (b) The 5 LMS output signals are combined to generate a more robust and frequently refreshed 1-D median measured angular speed ω_{median}^m . The overall processing was carried out on a tiny low-power 16-bit μC at a sampling rate of 2 kHz.

Matlab/Simulink© environment and compiled using a specific toolbox (available on <http://www.kerhuel.eu>) developed for dsPIC μC s.

In order to be able to perform all the processing with the limited computational power of a tiny μC , several optimizations in the sensory fusion method were required to reduce the computational load. The order of the digital low-pass filter embedded in the μC was reduced two-fold from the 4th [54] to 2nd order. This reduction was possible thanks to the on-chip pre-amplification unit of the LSC retina, which reduces the noise. One simple 16-bit free counter was used to measure the 10 delays Δt (Δt_{ON} and Δt_{OFF} of the 5 LMSs) required to estimate visual motion in the FOV of the 5 LMSs.

4) *Characteristics of the visual motion sensor:* The mass balance of our tiny device, including all the electronics, does not exceed 1 gram, which amounts to only 0.2 g per LMS (Table I). It is also a low-power visual motion sensor with a consumption of only 74 mA. The specifications of the visual motion sensor are summarized in Table II.

We recently showed that by using the same fusion algorithm, the measurement range of a similar sensor can be tuned to lower angular speeds by adjusting the optical parameters as

TABLE I
MASS BALANCE OF THE VISUAL MOTION SENSOR

Parts	Mass (g)
PCB thickness 0.4 mm, 3 cm ²	0.402
Lenslet Sparkfun SEN-00637	0.17
Lenslet-mount	0.11
LSC iC-Haus retina	0.13
μC dsPIC 6 × 6	0.1
Electronic components	0.162
Estimated total mass =	1.074
Real mass =	0.98 g
Mass per 1-D LMS <	0.2 g

shown in [67].

III. EXPERIMENT

The visual motion sensor was tested indoors in natural light at a constant illuminance of approximately 1500 lux, corresponding to the sunny daylight coming from a window. The visual motion sensor was placed at an orthogonal distance

TABLE II
SPECIFICATIONS OF THE VISUAL MOTION SENSOR

Retina	LSC iC-Haus
Inter-receptor angle $\Delta\varphi$ ($^\circ$)	4
Acceptance angle $\Delta\rho$ ($^\circ$)	4
Photodiode size (μm)	300×1600
Pixel pitch (μm)	420
Focal length of the lens (mm)	2
F_{number} of the lens	2.8
Angular velocity range ($^\circ/\text{s}$)	[25; 350]
Resolution ($^\circ/\text{s}$) [Min; Max]	$[7 \times 10^{-2}; 14.5]$
Sensitivity ($^\circ/\text{s}/\text{LSB}$)	7.63×10^{-4}
Measured mass with optics (g)	0.98 g

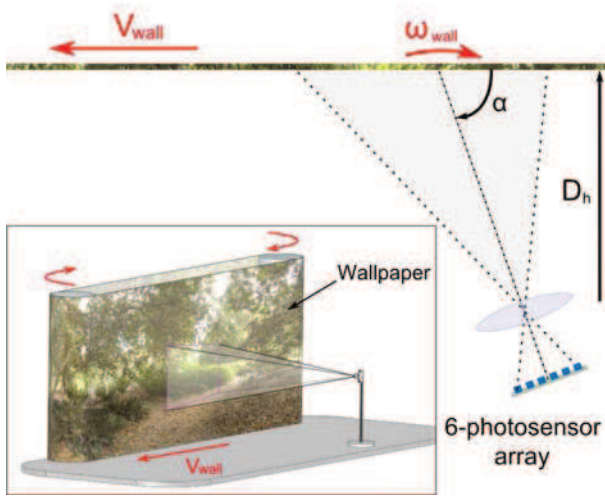


Fig. 4. Test bed used to assess the performances of the first sensory fusion method of the visual motion device based on a 6-pixel 1-D array. The visual motion sensor was placed at an orthogonal distance D_h from a piece of wallpaper (forming a printed belt), at an arbitrary angle α between the direction of the wall motion (\vec{V}_{wall}) and the main sensor axis. The printed belt depicting a natural colored panorama (inset) was stretched between two drums actuated thanks to a motor and a V-belt. The printed belt was made to move horizontally in a pre-determined preferred direction in front of the visual motion sensor at an angular speed ω_{wall} .

D_h from a printed belt of wallpaper showing a natural colored panorama. The printed band was stretched between 2 drums actuated thanks to a motor and a V-belt (see enclosed frame Fig. 4). The visual motion sensor was oriented at an arbitrary angle α between the direction of the wall motion (\vec{V}_{wall}) and the main sensor axis (Fig. 4). The panorama was therefore made to move horizontally perpendicularly to the visual motion sensor which generated a ground truth optic flow seen by the sensor ω_{wall} and defined by (3):

$$\omega_{\text{wall}} = \frac{V_{\text{wall}}}{D_h} \times \sin^2 \alpha \quad (3)$$

By imposing an arbitrary orientation angle α to the visual motion sensor, we wanted to check if the measurements

obtained with each i^{th} LMS were in line with (4):

$$\omega_i^m = \frac{V_{\text{wall}}}{D_h} \times \sin^2(\alpha + (i - 3) \times \Delta\varphi) \quad (4)$$

The dynamic indoor responses were assessed by the visual motion sensor at $\alpha = 60^\circ$ and $\alpha = 80^\circ$ with 2 different printed belts:

- The first belt was decorated with a natural colored panorama [Fig. 5(m)],
- The second one was lined with a colored indoor panorama featuring a laboratory [Fig. 5(n)].

The wallpaper was moved using a triangular speed law involving a series of velocity ramps with various slopes ranging from $27^\circ/\text{s}$ to $230^\circ/\text{s}$ with $\alpha = 60^\circ$ and from $28^\circ/\text{s}$ to $312^\circ/\text{s}$ with $\alpha = 80^\circ$.

IV. RESULTS

The dynamic indoor responses of the visual motion sensor and the median output of the 5 LMSs were studied in terms of the refresh rate (f_{refresh}) and the standard deviation error ($\text{Std}_{\text{error}}$) computed as follows:

$$\text{Std}_{\text{error}} = \text{std}(\omega_i^m - \omega_{\text{wall}}) \quad (5)$$

The $\text{Std}_{\text{error}}$ therefore corresponds to the dispersion of the data between the measured angular speed ω_i^m and the ground-truth value ω_{wall} . The main contributor is that of the 5 angular speed measurements ω_i^m which is most frequently used to calculate the median angular speed ω_{median}^m . The refresh rate (f_{refresh}) was defined as the number of new motion measurements per second. A new motion measurement occurs when a contrast transition is detected by one pixel and then by the second pixel with any delay Δt in the angular speed measurement range [i.e. in the $25^\circ/\text{s}$ to $350^\circ/\text{s}$ range, see (2)].

As was to be expected in view of (4), the 5 LMS output measurements are different [Fig. 5(a), (d), (g) and (j)] because of the different orientations of the visual axes of the LMSs in the sensor's FOV. Figs. 5(c), (f), (i) and (l) show that the main contributors to the median value at the orientation angles $\alpha = 60^\circ$ and $\alpha = 80^\circ$ were the 3rd LMS and the 5th LMS, respectively. For both panoramas, the median value accurately followed the angular speed of the wall ω_{wall} , giving a $\text{Std}_{\text{error}}$ smaller than $12^\circ/\text{s}$ in comparison with the value obtained with the main contributor, which was between $19^\circ/\text{s}$ and $24^\circ/\text{s}$. In addition, the refresh rate of the median value was found to increase more than 4-fold (67 Hz) in comparison with that observed in the case of the LMS main contributor (15.7 Hz) [Figs. 5(b), (e), (h) and (k)].

V. ESTIMATION OF THE DIRECTION AND THE MAGNITUDE OF THE VISUAL MOTION

A. Device description

The improved sensory fusion method of the new visual motion sensor presented in this section is based on the front end described in section II-1, having the optical characteristics described in Table II in terms of the inter-receptor angle $\Delta\varphi$ and the acceptance angle $\Delta\rho$. This visual motion sensor

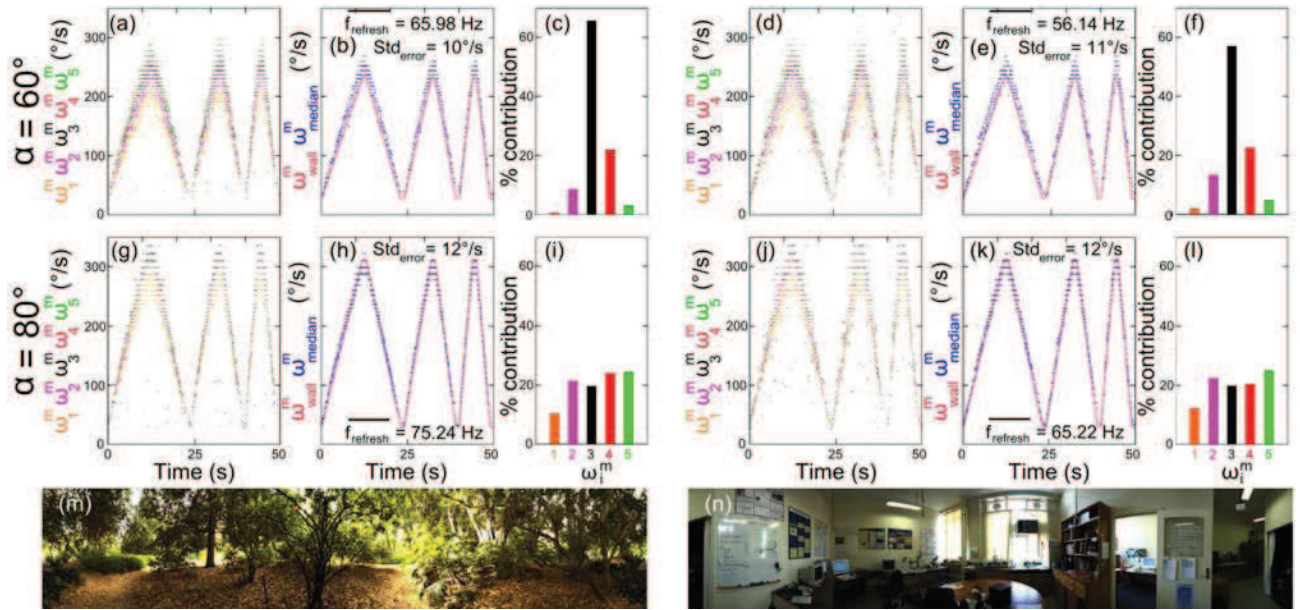


Fig. 5. Dynamic indoor responses of the visual motion sensor. The visual motion sensor was placed at an orthogonal distance $D_h = 24$ cm from a moving printed belt lined with a colored natural panorama depicting either bushes and trees or a laboratory. The visual motion sensor was placed at 2 different orientation angles $\alpha = 60^\circ$ and $\alpha = 80^\circ$ between the direction of the wall motion (\vec{V}_{wall}) and the main sensor axis to check that each LMS measures visual motion in its own visual field [see (4)]. The printed belt was moved using a triangular law giving a triangular pattern of angular speed variations involving a series of velocity ramps with different slopes ranging from $27^\circ/s$ to $230^\circ/s$ ($\alpha = 60^\circ$) and from $28^\circ/s$ to $312^\circ/s$ ($\alpha = 80^\circ$) [see (3)]. (a), (d), (g) and (j) Dynamic indoor responses of each LMS in the visual motion sensor placed at an orientation angle $\alpha = 60^\circ$ [(a) and (d)] and $\alpha = 80^\circ$ [(g) and (j)]. Note that each LMS output differed from the others because of the different orientations of the LMS visual axes in the sensor's FOV as expected according to (4). (b), (e), (h), and (k) Dynamic indoor responses in terms of median values in comparison with those predicted by the main contributor, along with the standard deviation error (Std_{error}) and refresh rate ($f_{refresh}$) characteristics. (c), (f), (i), and (l) Vertical bar graph showing which LMS in the visual motion sensor was the main contributor to the median value computed. (m) and (n) The natural colored panorama depicted on the printed belt (Fig. 4) used to assess the visual motion sensor's performances.

is able to estimate the direction and the magnitude of the visual motion ω_{median}^{max} on the basis of 10 angular speed measurements: 5 LMSs are used to compute the median angular speed $\omega_{median+/-}^m$ in each direction of motion (“+” or “-”) (Fig. 6). In order to determine the direction of the visual motion without any prior knowledge, empirical findings [38] have shown that, within a given angular speed range, the angular speed of the contrasts detected in the correct motion direction is usually greater than that measured in the opposite direction. Based on this finding, by simply choosing the maximum value of the median angular speeds in the two directions $\omega_{median+}^m$ and $\omega_{median-}^m$, it is possible to determine the direction of the visual motion accurately in the $[-350^\circ/s; -80^\circ/s] \cup [80^\circ/s; 350^\circ/s]$ range. The $]-80^\circ/s; 80^\circ/s[$ range corresponds to an uncertainty range, where the direction and the magnitude of the angular speed cannot be assessed accurately. As soon as the sensor detects visual motion in the $]-80^\circ/s; 80^\circ/s[$ range, the output signal ω_{median}^{max} magnitude and direction are voluntarily set to “no value” without any error.

B. Optimization of the motion direction estimates

To optimize the motion direction estimation, we decided to filter each median angular speed measurement ($\omega_{median+}^m$ and $\omega_{median-}^m$) using a rate-limiter that removes any value that is too different from the previous angular speed measurement knowing the OF rate is bounded. A sliding window filters

out any motion direction error by selecting the direction occurring more than 8 times among the last 16 detected motion directions. Thanks to this filtering process, the motion direction was perfectly determined (Fig. 6).

The improved sensory fusion method was optimized in order to increase the number of LMSs embedded into the same μC two-fold. The same filtered visual signals were recombined in order to compute an accurate visual angular speed and the direction of the visual motion while keeping the digital processing frequency at 2 kHz. The median computation step was optimized by computing the median value only whenever a new visual motion measurement occurred, i.e., whenever a new i^{th} LMS angular speed $\omega_{i+/-}^m$ was measured: this algorithm optimization prevents the μC from being overloaded by computing the median value at all the time steps at which none of the LMS outputs are refreshed.

All these improvements have made the tiny μC capable of carrying out all the processing operations required to determine the median 1-D angular speed of a natural panorama ω_{median}^{max} and to estimate the direction of motion with a mean computational load of only 53% (minimum: 43%; maximum: 82% -very short peaks-) at a sample frequency of 2 kHz.

C. Experiment

The static and dynamic responses of the improved sensory fusion method of the visual motion sensor presented here were obtained under 2 lighting conditions. The background

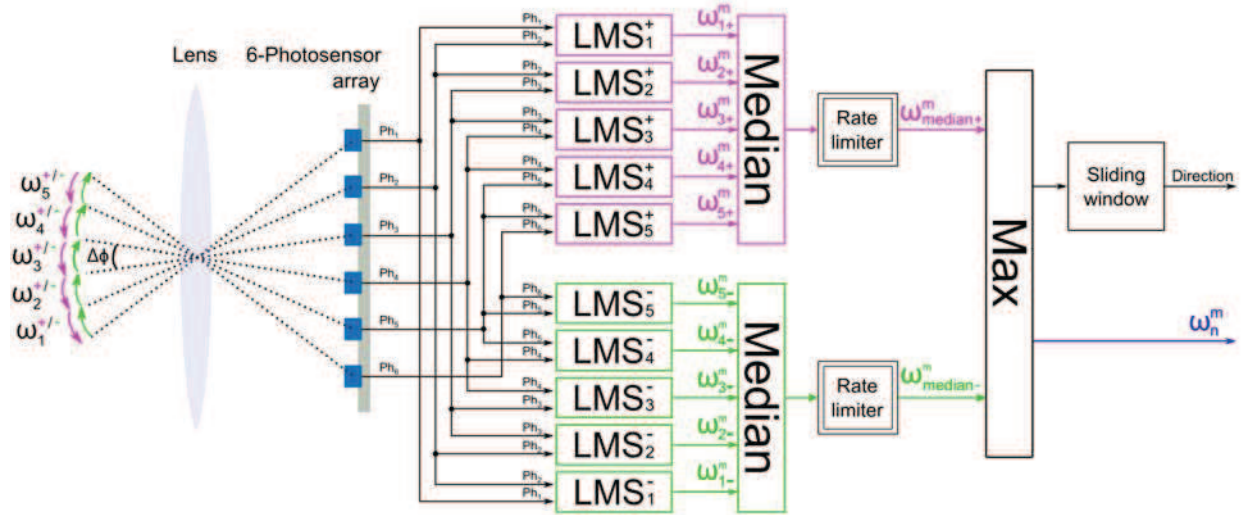


Fig. 6. General processing architecture of the improved sensory fusion method based on 10 LMSs. The visual signals delivered by the photoreceptors are filtered and thresholded by the LMSs to determine the angular speeds $\omega_{i+/-}^m$ using the “time of travel” scheme in the two directions of motion [30], [31], [38], [65]. The visual motion is measured in the opposite direction by reversing the inputs to each LMS. A rate limiter function filters out any median angular speed measurement that changes too fast. The motion direction and magnitude ω_{median}^{max} are estimated based on a simple algorithm, using the maximum median value of the angular speed $\omega_{median+}^m$ and $\omega_{median-}^m$ computed from the 5 LMSs in the 2 directions of motion. A sliding window removes any motion direction error by selecting the direction occurring more than 8 times among the last 16 detected motion directions. This improved sensory fusion method allows to measure the motion magnitude efficiently in the $[-350^\circ/s; -80^\circ/s] \cup [80^\circ/s; 350^\circ/s]$ range and to determine the direction of motion without any prior knowledge.

irradiance values were measured in $W.cm^{-2}$ using a digital radiometer (ILT1700) which gives the irradiance in the direction of the radiometer’s sensor. The visual motion sensor was placed at an orthogonal distance $D_h = 24\text{ cm}$ from a printed belt, oriented at an angle $\alpha = 90^\circ$. The printed belt was stretched between 2 drums actuated by a motor and a V-belt which could be made to rotate either clockwise or anticlockwise (see inset in Fig. 7). The panorama was therefore made to move horizontally in two directions with respect to the visual motion sensor at an angular speed ω_{wall} according to (3). The static responses of the visual motion sensor were assessed by applying a series of $30^\circ/s$ fifteen-second steps to the moving wall at a rotational speed ω_{wall} in the $[-315^\circ/s; -105^\circ/s] \cup [105^\circ/s; 315^\circ/s]$ range in the two opposite directions. These experiments were conducted with an irradiance of $5 \times 10^{-3} W.cm^{-2}$.

The dynamic characteristics of the visual motion sensor were assessed at two different illuminance values: at $2.5 \times 10^{-2} W.cm^{-2}$, which corresponds to strong sunlight coming from a windows and $5 \times 10^{-3} W.cm^{-2}$, which corresponds to strong indoor lighting. We applied a 60-second stimulus to the moving wall, involving a series of velocity ramps with different slopes in the $[-300^\circ/s; 300^\circ/s]$ range. The belt was covered with a natural colored panorama showing bushes and trees [Fig. 8(g)] or with a colored indoor panorama featuring a laboratory [Fig. 8(h)].

D. Results

To assess the static characteristics of the visual motion sensor, we studied the mean standard deviation of the data,

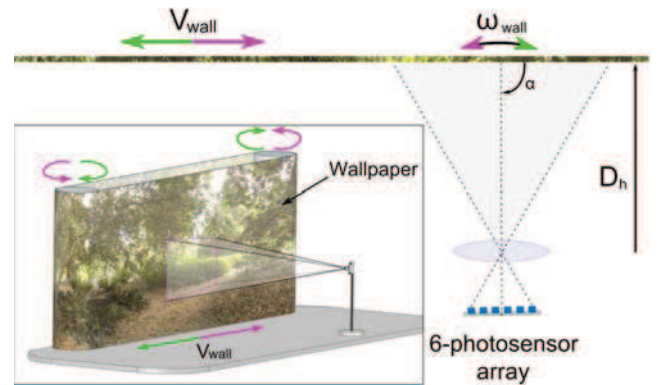


Fig. 7. Test bed used to assess the performances of the visual motion device including the 10 LMSs and the motion direction detection unit. The visual motion sensor was placed at an orthogonal distance $D_h = 24\text{ cm}$ from a printed belt. In this case, the angle α between the direction of the wall motion (\vec{V}_{wall}) and the main sensor axis was $\alpha = 90^\circ$. The belt printed with a natural colored panorama depicting either bushes and trees or a laboratory, was stretched between two drums actuated by a motor and a V-belt: the belt could be made in this case to rotate either clockwise or anticlockwise. The panorama was therefore made to move horizontally in either direction.

which was computed as follows:

$$\overline{Std} = \overline{std(\omega_{median}^{max})} \quad (6)$$

The best linear approximation was computed to determine the accuracy of our visual motion sensor. This criterion was calculated on the basis of (7):

$$\omega_{median}^{max} = a \times \omega_{wall} \quad (7)$$

where ω_{median}^{max} is the output signal of the visual motion sensor and ω_{wall} is the angular speed of the moving wall as seen by the visual motion sensor. The regression coefficient a of (7) was used to compute the linearity error given by (8):

$$\text{Linearity Error(\%)} = |(a - 1)| \times 100 \quad (8)$$

The dynamic responses of the median output ω_{median}^{max} of the tiny visual motion sensor were assessed in comparison with the perceived angular speed ω_{wall} in terms of the refresh rate and the Std_{error} defined in (5).

1) *Static characteristics*: Figs. 8(a) and (b) show the static characteristics of the visual motion sensor tested indoors in front of a moving wall at an irradiance value of $5 \times 10^{-3} W.cm^{-2}$. As shown in Figs. 8(a) and (b), the visual motion sensor responded accurately with a really low *LinearityError* rate [see (8)] of less than 1% and an excellent dispersion of less than $7^\circ/s$. In the measurement range of $[-350^\circ/s; -80^\circ/s] \cup [80^\circ/s; 350^\circ/s]$, the visual motion sensor estimated the direction of motion perfectly without making a single direction error.

2) *Dynamic characteristics*: Figs. 8(c) and (d) show the dynamic responses of the visual motion sensor at an irradiance of $2.5 \times 10^{-2} W.cm^{-2}$. The median value closely obeyed the triangular law imposed on the angular speed of the wall ω_{wall} , giving a low Std_{error} of only $7.4^\circ/s$ and $6.23^\circ/s$ with the outdoor and indoor panoramas, respectively. At a lower irradiance of $5 \times 10^{-3} W.cm^{-2}$, the median value ω_{median}^{max} again closely obeyed the triangular law imposed on the angular speed of the moving wall ω_{wall} , with a Std_{error} of $9.2^\circ/s$ in the case of the bushes and trees panorama and $5.44^\circ/s$ in that of the laboratory panorama. Despite the difference in the irradiance, the Std_{error} was always of a similar order of magnitude. In any case, the visual motion sensor gave a highly refreshed output. As was to be expected from [57], the $f_{refresh}$ increased with the irradiance, amounting to $50.6 Hz$ at an irradiance of $5 \times 10^{-3} W.cm^{-2}$ and $74.5 Hz$ at a higher value of $2.5 \times 10^{-2} W.cm^{-2}$ when the outdoor panorama was displayed on the printed belt [Fig. 8(c) and (e)]. Similar results were obtained with the indoor panorama: $f_{refresh}$ of $39.7 Hz$ at $5 \times 10^{-3} W.cm^{-2}$ and $62.1 Hz$ at $2.5 \times 10^{-2} W.cm^{-2}$ [Fig. 8(d) and (f)]. The motion direction was estimated perfectly by the sensor without making a single error.

In view of these performances, this novel tiny visual motion sensor can be said to provide a remarkably promising tool for performing robotic tasks such as obstacle avoidance and terrain following in forward flight, while meeting the requirements in very low avionic payload, since the total mass balance of the two-directional visual motion sensor does not exceed $1 g$.

VI. CONCLUSION

In this study, two different sensory fusion methods of a 1-gram insect-inspired visual motion sensor were evaluated indoors under two different lighting conditions. The dynamic and static responses of this novel fly-inspired visual motion sensor were used to assess the performances of these very lightweight, low-power sensors, which can be mounted on-board tomorrow's MAVs for obstacle avoidance and speed

control purposes.

The first sensory fusion method of our 1-gram μC -based visual motion sensor, consisting of a 5-LMS array, gave 5 simultaneous angular speed measurements and a single combined output in the $[25^\circ/s; 350^\circ/s]$ range, in a single preferred direction of visual motion. The results obtained in the study (Fig. 5) show how the accuracy and the robustness of the angular speed measurement have been improved thanks to our simple method of data combination based on the median operator. This method improves the Std_{error} more than 1.7-fold from $19^\circ/s$ in the case of the main contributor to the median value to $11^\circ/s$ in the case of the median angular speed ω_{median}^m . The refresh rate of the visual motion sensor was found to have increased at least 4-fold ($67 Hz$) in comparison with that of the main contributor ($15.7 Hz$).

The excellent performances obtained with the first sensory fusion method of this 1-gram fly-inspired visual motion sensor led us to design an improved sensory fusion method incorporated into our visual sensor based on the same electronics. These improvements allowed to determine the direction and magnitude ω_{median}^{max} of visual motion without any prior knowledge by recombining the filtered visual signals and processing the "time of travel" in the two opposite directions. This improved sensory fusion method of the 1-gram μC -based visual motion sensor designed and built at our Laboratory is based on a 10 LMS-array which can measure the direction and the magnitude of motion in the $[-350^\circ/s; -80^\circ/s] \cup [80^\circ/s; 350^\circ/s]$ range, thanks to the maximum operator value computed between the median angular speed in the two directions of motion ($\omega_{median+}^m$ and $\omega_{median-}^m$). The dynamic and static characteristics of this novel sensor (Fig. 8) were used to assess its performances. It consistently measured the 1-D angular speed accurately with an excellent $LinearityError < 1\%$. The impressive results obtained indoors were robust since the Std_{error} was of the same order of magnitude (less than $10^\circ/s$) under two different irradiance conditions, whether the printed belt simulating an unknown environment depicted a natural landscape or a laboratory. Due to the size of the setup we used, the performances have been assessed only indoors. Nevertheless, we have shown recently in [57] that a very similar visual motion sensor based on the same retina could robustly and accurately measure the OF indoors and outdoors in a 1.5-decade illuminance range with strong transient variations.

This stand-alone sensor weighs less than $1 g$. The outstanding performances of this tiny μC -based visual motion sensor show that it constitutes a good trade-off between the need for reliable motion sensors and the limited power and avionic payload available on MAVs. This 1g two-directional visual motion sensor yields at its output an accurate and highly refreshed angular speed measurement in the range of $[-350^\circ/s; -80^\circ/s] \cup [80^\circ/s; 350^\circ/s]$ perfectly adapted to any MAV flying forward and performing robotic tasks such as obstacle avoidance, terrain following, take-off, landing and speed-control purposes in forward flights even possibly for lunar landers [68].

In future works an other optimization of the "time of travel", called the interpolation-based "time of travel" scheme [60] can

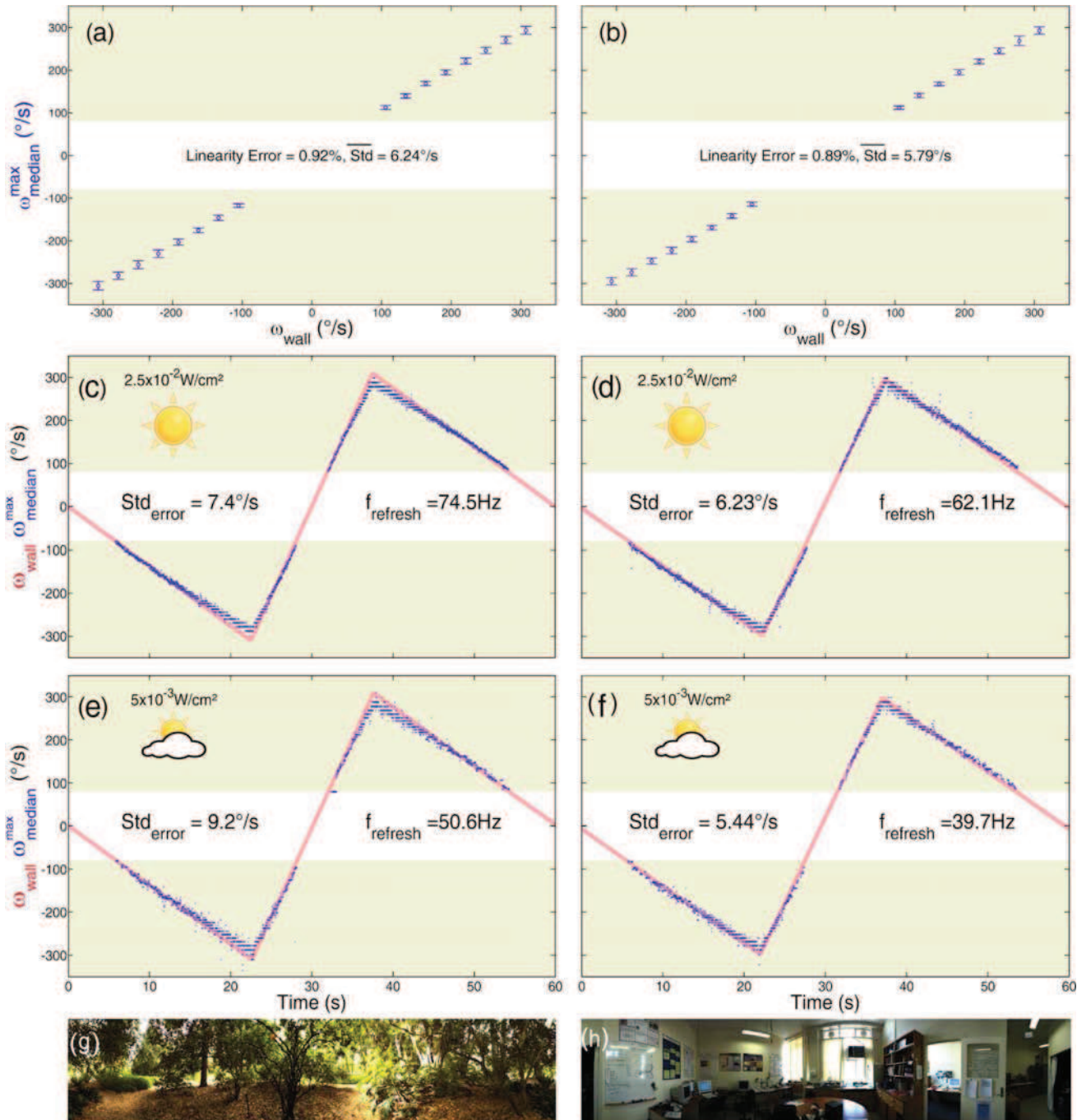


Fig. 8. Dynamic and static indoor responses of the visual motion sensor placed at an orthogonal distance $D_h = 24 \text{ cm}$ from the moving wall at an angle $\alpha = 90^\circ$. The static indoor characteristics of the visual motion sensor were assessed by applying $30^\circ/\text{s}$ steps (lasting 15s) to the printed belt in the $[-315^\circ/\text{s}; -105^\circ/\text{s}] \cup [105^\circ/\text{s}; 315^\circ/\text{s}]$ range. The mean visual motion recorded at each angular speed ω_{wall} is plotted in the figure with its standard deviation. The best linear approximation obtained in each experiment was computed, and the departure from linearity is given as a percentage. The dynamic responses of the visual motion sensor were assessed at two different irradiance values of $5 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ and $2.5 \times 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ with the two printed panoramas. The printed belt was moved using a triangular law giving a triangular pattern of angular speed variation involving a series of velocity ramps ranging from $-300^\circ/\text{s}$ to $300^\circ/\text{s}$. A fusion algorithm based on the maximum median value of the two opposite directions was used to determine the magnitude ω_{median}^{max} and the direction of the angular speed. (a) and (b) Static indoor characteristics of the visual motion sensor. With both panoramas, the visual motion sensor yielded accurate median angular speed measurements with only a small *LinearityError* of less than 1% and an excellent *Std* of less than $7^\circ/\text{s}$. (c)-(f) Dynamic indoor responses of the median angular speed ω_{median}^{max} of the visual motion sensor, along with the standard deviation error (*Std_{error}*) and refresh-rate (*f_{refresh}*) data. With the printed belt depicting bushes and trees [Fig. 8(c) and (e)], the results showed a small dispersion of less than $10^\circ/\text{s}$ and the refresh rate increased from 50.6 Hz to 74.5 Hz with the irradiance. With the printed belt depicting a laboratory, the results show that the dispersion was less than $7^\circ/\text{s}$, and the refresh rate again increased with the irradiance from 39.7 Hz to 62.1 Hz . (g) and (h) The natural colored panorama depicted on the printed belt (Fig. 7) used to assess the visual motion sensor's performances.

be used to implement a larger number of 2-pixel LMS into a single dsPIC μC and therefore process the OF from a much larger 2D retina.

ACKNOWLEDGMENT

We thank the anonymous referees. We are grateful to S. Viollet and N. Franceschini for their fruitful comments and suggestions during this study. We thank J. Blanc for correcting the English manuscript and R. Brinkworth and D. O'Carroll (Adelaide Uni., Australia) for kindly making their High Dynamic Range panoramic images available to us. We are most grateful to J. Diperi, D. Dray and Y. Luparini for their involvement in the mechanical design of the test bed and to M. Boyron and B. Fuschlock for their involvement in the overall electronic design of the test board and the visual motion sensor.

REFERENCES

- [1] F. Iida, "Goal-directed navigation of an autonomous flying robot using biologically inspired cheap vision," in *Proceedings of the 32nd International Symposium on Robotics (ISR)*, vol. 21, Seoul, South Korea, April 2001, pp. 1404–1409.
- [2] W. Green, P. Oh, and G. Barrows, "Flying insect inspired vision for autonomous aerial robot maneuvers in near-earth environments," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, vol. 3, New-Orleans, USA, April 2004, pp. 2347–2352.
- [3] J. C. Zufferey and D. Floreano, "Fly-inspired visual steering of ultralight indoor aircraft," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 22(1), pp. 137–146, 2006.
- [4] F. Ruffier and N. Franceschini, "Aerial robot piloted in steep relief by optic flow sensors," in *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Nice, France, September 2008, pp. 1266–1273.
- [5] A. Beyeler, J.-C. Zufferey, and D. Floreano, "optiPilot: control of take-off and landing using optic flow," in *European Micro Aerial Vehicle Conference (EMAV)*, vol. 27, Delft, Netherlands, September 2009, pp. 201–219.
- [6] J. Humbert, J. K. Conroy, C. Neely, and G. Barrows, "Widefield integration methods for visuomotor control," in *Flying insects and robots*, D. Floreano, J. C. Zufferey, M. Srinivasan, and C. Ellington, Eds. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2009, pp. 63–71.
- [7] G. de Croon, E. de Weerd, C. de Wagter, B. Remes, and R. Ruijsink, "The appearance variation cue for obstacle avoidance," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 28(2), pp. 529–534, 2012.
- [8] F. Ruffier and N. Franceschini, "Octave, a bioinspired visuo-motor control system for the guidance of micro-air vehicles," in *SPIE Conference on Bioengineered and Bioinspired Systems*, A. D. Rodriguez-Vazquez, A. and R. Carmona, Eds., vol. 5119, Maspalomas, Spain, May 2003, pp. 1–12.
- [9] —, "Optic flow regulation: the key to aircraft automatic guidance," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 50(4), pp. 177–194, 2005.
- [10] N. Franceschini, F. Ruffier, and J. Serres, "A bio-inspired flying robot sheds light on insect piloting abilities," *Current Biology*, vol. 17(4), pp. 329–335, 2007.
- [11] J. Zufferey, A. Beyeler, and D. Floreano, "Autonomous flight at low altitude using light sensors and little computational power," *International Journal of Micro Air Vehicles*, vol. 2(2), pp. 107–117, 2010.
- [12] B. Herisse, T. Hamel, R. Mahony, and F.-X. Russotto, "Landing a VTOL Unmanned Aerial Vehicle on a moving platform using optical flow," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 28(1), pp. 77–89, 2012.
- [13] F. Kendoul, I. Fantoni, and K. Nonami, "Optic flow-based vision system for autonomous 3D localization and control of small aerial vehicles," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 57(6-7), pp. 591–602, 2009.
- [14] L. Kerhuel, S. Viollet, and N. Franceschini, "Steering by gazing: an efficient biomimetic control strategy for visually guided micro aerial vehicles," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 26(2), pp. 307–319, 2010.
- [15] F. L. Roubieu, J. Serres, N. Franceschini, F. Ruffier, and S. Viollet, "A fully-autonomous hovercraft inspired by bees; wall-following and speed control in straight and tapered corridors," in *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, Guangzhou, China, December 2012 (*in press*).
- [16] T. Collett, "Some operating rules for the optomotor system of a hoverfly during voluntary flight," *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, vol. 138(3), pp. 271–282, 1980.
- [17] H. Wagner, "Flow-field variables trigger landing in flies," *Nature*, vol. 297(5862), pp. 147–148, 1982.
- [18] M. Srinivasan, S. Zhang, M. Lehrer, and T. Collett, "Honeybee navigation en route to the goal: visual flight control and odometry," *Journal of Experimental Biology*, vol. 199(1), pp. 237–244, 1996.
- [19] L. F. Tammero and M. H. Dickinson, "The influence of visual landscape on the free flight behavior of the fruit fly *Drosophila melanogaster*," *Journal of Experimental Biology*, vol. 205(3), pp. 327–343, 2002.
- [20] E. Baird, M. Srinivasan, S. Zhang, R. Lamont, and A. Cowling, "Visual control of flight speed and height in the honeybee," in *From Animals to Animats 9*, S. Nolfi, G. Baldassarre, R. Calabretta, J. Hallam, D. Marocco, J.-A. Meyer, O. Miglino, and D. Parisi, Eds. Springer Berlin / Heidelberg, 2006, vol. 4095, pp. 40–51.
- [21] J. Serres, G. Masson, F. Ruffier, and N. Franceschini, "A bee in the corridor: centering and wall-following," *Naturwissenschaften*, vol. 95(12), pp. 1181–1187, 2008.
- [22] E. Baird, T. Kornfeldt, and M. Dacke, "Minimum viewing angle for visually guided ground speed control in bumblebees," *The Journal of Experimental Biology*, vol. 213, pp. 1625–1632, 2010.
- [23] A. Straw, S. Lee, and M. Dickinson, "Visual control of altitude in flying *Drosophila*," *Current Biology*, vol. 20(17), pp. 1550–1556, 2010.
- [24] G. Portelli, F. L. Roubieu, F. Ruffier, and N. Franceschini, "Honeybees' speed depends on dorsal as well as lateral, ventral and frontal optic flows," *PLoS ONE*, vol. 6(5), p. e19486, 2011.
- [25] M. Srinivasan, "Honeybees as a model for the study of visually guided flight, navigation, and biologically inspired robotics," *Physiological Reviews*, vol. 91(2), pp. 413–460, 2011.
- [26] J. Gibson, *The perception of the visual world*. New York: Houghton Mifflin, 1950.
- [27] K. Hausen, "The lobula-complex of the fly: structure, function and significance in visual behaviour," in *Photoreception and Vision in Invertebrates*, M. Ali., Ed. New York: Plenum, 1984, pp. 523–559.
- [28] N. Franceschini, "Early processing of colour and motion in a mosaic visual system," *Neuroscience Research (Suppl. 2)*, pp. 17–49, 1985.
- [29] N. Franceschini, A. Riehle, and A. Le Nestour, "Directionally selective motion detection by insect neurons," in *Facets of vision*, D. Stavanga and R. Hardie, Eds. Berlin: Springer-Verlag, 1989, pp. 360–390.
- [30] C. Blanes, "Appareil visuel élémentaire pour la navigation à vue d'un robot mobile autonome (Adviser: N. Franceschini)," Master's thesis, 1986.
- [31] J. Pichon, C. Blanes, and N. Franceschini, "Visual guidance of a mobile robot equipped with a network of self-motion sensors," in *Proceedings of SPIE: Mobile Robots IV*, W. J. Wolfe and W. H. C. Editors, Eds., vol. 1195. Bellingham, USA: Society of Photo-optical Instrumentation Engineers, 1989, pp. 44–53.
- [32] N. Martin and N. Franceschini, "Obstacle avoidance and speed control in a mobile vehicle equipped with a compound eye," in *Proceedings of the Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Paris, France, October 1994, pp. 381–386.
- [33] J. Serres, D. Dray, F. Ruffier, and N. Franceschini, "A vision-based autopilot for a miniature air vehicle: joint speed control and lateral obstacle avoidance," *Autonomous Robot*, vol. 25(1), pp. 103–122, 2008.
- [34] G. Portelli, J. Serres, F. Ruffier, and N. Franceschini, "Modelling honeybee visual guidance in a 3D environment," *Journal of Physiology-Paris*, vol. 104(1-2), pp. 27–39, 2010.
- [35] N. Franceschini, J. M. Pichon, and C. Blanes, "From insect vision to robot vision," *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 337, pp. 283–294, 1992.
- [36] T. Netter and N. Franceschini, "A robotic aircraft that follows terrain using a neuromorphic eye," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Lausanne, Switzerland, September 2002, pp. 129–134.
- [37] F. Expert and F. Ruffier, "Controlling docking, altitude and speed in a circular high-roofed tunnel thanks to the optic flow," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Vilamoura, Portugal, October 2012 (*in press*), pp. 1125–1132.
- [38] C. Blanes, "Guidage visuel d'un robot mobile autonome d'inspiration bionique (Adviser: N. Franceschini)," Ph.D. dissertation, INP Grenoble, 1991.
- [39] J. Plett, A. Bahl, M. Buss, K. Khlenz, and A. Borst, "Bio-inspired visual ego-rotation sensor for MAVs," *Biological cybernetics*, vol. 106(1), pp. 51–63, 2012.

- [40] R. Harrison and C. Koch, "A robust analog VLSI motion sensor based on the visual system of the fly," *Autonomous Robots*, vol. 7(3), pp. 211–224, 1999.
- [41] S. Liu and A. Usseglio-Viretta, "Fly-like visuomotor responses of a robot using a VLSI motion-sensitive chips," *Biological Cybernetics*, vol. 85(6), pp. 449–457, 2001.
- [42] R. Brinkworth, P. Shoemaker, and D. O'Carroll, "Characterization of a neuromorphic motion detection chip based on insect visual system," in *5th International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP)*, Melbourne, Australia, December 2009, pp. 289–294.
- [43] P. Xu, J. Humbert, and P. Abshire, "Analog VLSI implementation of wide-field integration methods," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 64(3), pp. 465–487, 2011.
- [44] J. Krammer and C. Koch, "Pulse-based analog VLSI velocity sensors," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing*, vol. 44(2), pp. 86–101, 1997.
- [45] G. Barrows and C. Neely, "Mixed-mode VLSI optic flow sensors for in-flight control of a Micro Air Vehicle," in *SPIE : Critical technologies for the future of computing*, vol. 4109, 2000, pp. 52–63.
- [46] P.-E. Duhamel, N. Perez-Arancibia, G. Barrows, and R. Wood, "Altitude feedback control of a flapping-wing microrobot using an on-board biologically inspired optical flow sensor," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Minnesota, USA, May 2012, pp. 4228–4235.
- [47] R. Chan, A. Mulla, and K. Stol, "Characterisation of low-cost optical flow sensors," in *Proceedings of the IEEE of the Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA)*, Brisbane, Australia, December 2010, pp. 1–8.
- [48] J. D. Jackson, D. W. Callahan, and J. Marstrand, "A rationale for the use of optical mice chips for economic and accurate vehicle tracking," in *Proceedings IEEE International Conference on Automation Science and Engineering CASE*, Scottsdale, USA, September 2007, pp. 939–944.
- [49] H. Dahmen, A. Millers, and H. A. Mallot, "Insect inspired odometry by optic flow recorded with optical mouse chips," in *Flying insects and robots*, D. Floreano, J. C. Zufferey, M. V. Srinivasan, and C. Ellington, Eds. Berlin: Springer, 2009, pp. 115–126.
- [50] S. Griffiths, J. Saunders, A. Curtis, B. Barber, T. McLain, and R. Beard, "Maximizing miniature aerial vehicles," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 13, pp. 34–43, 2006.
- [51] A. Beyeler, J. C. Zufferey, and D. Floreano, "Vision-based control of near-obstacle flight," *Autonomous Robots*, vol. 27(3), pp. 201–219, 2009.
- [52] F. Expert, S. Viollet, and F. Ruffier, "A mouse sensor and a 2-pixel motion sensor exposed to continuous illuminance changes," in *IEEE Sensors 2011 Conference*, Limerick, Ireland, October 2011, pp. 974–977.
- [53] F. Aubépart and N. Franceschini, "Bio-inspired optic flow sensors based on FPGA: Application to Micro-Air Vehicles," *Microprocessors and Microsystems*, vol. 31, pp. 408–419, 2007.
- [54] F. Ruffier, S. Viollet, S. Amic, and N. Franceschini, "Bio-inspired optical flow circuits for the visual guidance of micro-air vehicles," in *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, vol. 3, Bangkok, Thailand, May 2003, pp. 846–849.
- [55] M. Pudas, S. Viollet, F. Ruffier, A. Kruusing, S. Amic, S. Leppävuori, and N. Franceschini, "A miniature bio-inspired optic flow sensor based on low temperature co-fired ceramics (ltcc) technology," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 133(1), pp. 88–95, 2007.
- [56] S. Viollet, F. Ruffier, T. Ray, M. Menouni, F. Aubépart, L. Kerhuel, and N. Franceschini, "Characteristics of three miniature bio-inspired optic flow sensors in natural environments," in *Fourth International Conference on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM)*, Venice, Italy, July 2010, pp. 51–55.
- [57] F. Expert, S. Viollet, and F. Ruffier, "Outdoor field performances of insect-based visual motion sensors," *Journal of Field Robotics*, vol. 28(4), pp. 974–977, October 2011.
- [58] F. L. Roubieu, F. Expert, M. Boyron, B.-J. Fuschlock, S. Viollet, and F. Ruffier, "A novel 1-gram insect based device measuring visual motion along 5 optical directions," in *IEEE Sensors Conference*, Limerick, Ireland, October 2011, pp. 687–690.
- [59] F. Ruffier and F. Expert, "Visual motion sensing onboard a 50-g helicopter flying freely under complex vicon-lighting conditions," in *IEEE International Conference on Complex Medical Engineering (CME)*, Kobe, Japan, July 2012, pp. 634–639.
- [60] F. Expert, F. Roubieu, and F. Ruffier, "Interpolation based "time of travel" scheme in a visual motion sensor using a small 2d retina," in *IEEE Sensors Conference*, Taipei, Taiwan, October 2012, pp. 2231–2234.
- [61] K. Götz, "Optomotorische untersuchung des visuellen systems einiger augenmutanten der fruchtfliege drosophila," *Biological Cybernetics*, vol. 2(2), pp. 77–92, 1964.
- [62] N. Franceschini and K. Kirschfeld, "In vivo optical study of photoreceptor elements in the compound eye of drosophila," *Biological Cybernetics*, vol. 8(1), pp. 1–13, 1971.
- [63] D. G. Stavanga, "Angular and spectral sensitivity of fly photoreceptor. I. integrated facet lens and rhabdomere optics," *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, vol. 189(1), pp. 1–17, 2003.
- [64] J.-M. Pichon, "Guidage visuel d'un robot mobile autonome d'inspiration bionique," Tech. Rep., 1991.
- [65] N. Franceschini, F. Ruffier, J. Serres, and S. Viollet, *Aerial vehicles*. Vienna: In-Tech, 2009, ch. 35 : Optic flow based visual guidance: from flying insects to miniature aerial vehicles, pp. 747–770.
- [66] M. F. Land, "Visual acuity in insects," *Annual Review of Entomology*, vol. 42(1), pp. 147–177, 1997.
- [67] G. Sabiron, P. Chavent, T. Raharijaona, P. Fabiani, and F. Ruffier, "Low-speed optic-flow sensor onboard an unmanned helicopter flying outside over fields," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2013 (submitted).
- [68] F. Valette, F. Ruffier, S. Viollet, and T. Seidl, "Biomimetic optic flow sensing applied to a lunar landing scenario," in *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Anchorage, USA, May 2010, pp. 2253–2260.

Résumé

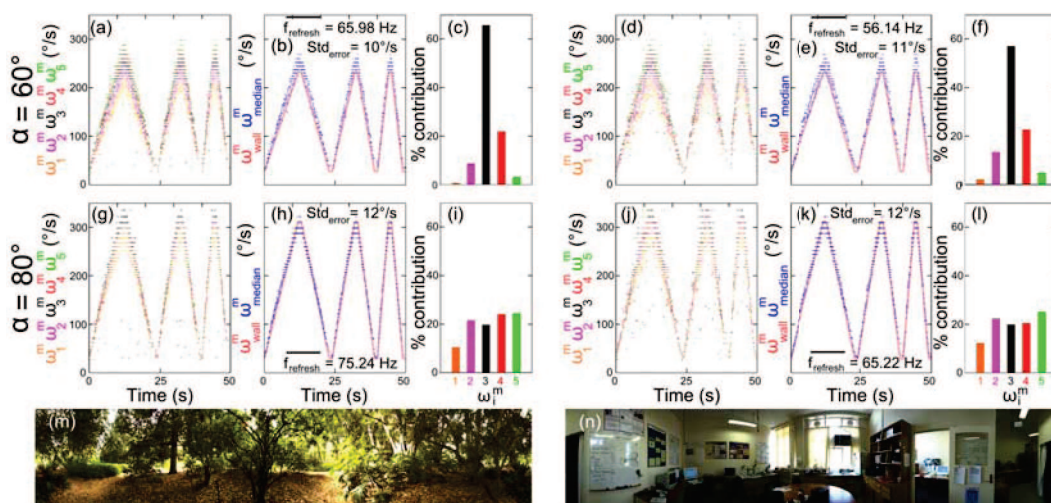


FIGURE 4.1 – Caractéristiques dynamiques de réponses du capteur de flux optique basé sur la première méthode de fusion sensorielle de 5 capteurs de flux optique élémentaires. Les caractéristiques dynamiques de ce capteur ont été obtenues en environnement intérieur en faisant défiler, sous deux orientations différentes ($\alpha = 60^\circ$ et $\alpha = 80^\circ$ entre l'axe du capteur et la direction du mur en mouvement), une bâche montrant soit une scène extérieure (arbres, feuillage), soit une scène intérieur (bureau). Cette même bâche texturée a été mise en mouvement, au moyen de deux rouleaux actionnés par un moteur et une courroie, selon une loi triangulaire de vitesse, ce qui a permis de générer vers le capteur des rampes de vitesse angulaire comprises dans la gamme $[27 \text{ }^\circ.\text{s}^{-1}; 230 \text{ }^\circ.\text{s}^{-1}]$ pour l'orientation $\alpha = 60^\circ$ et $[28 \text{ }^\circ.\text{s}^{-1}; 312 \text{ }^\circ.\text{s}^{-1}]$ pour l'orientation $\alpha = 80^\circ$. (A, D, G, J) Réponses obtenues pour les deux orientations α du capteur, on peut remarquer les différentes sorties de chaque capteur de flux optique élémentaire (ω_{1-5}^m) attestant que chacun de ces capteurs élémentaires vise une région particulière du champ visuel et mesure le flux optique dans cette zone. (B, E, H, K) Sortie fusionnée ω_{median}^m des 5 capteurs de flux optique élémentaires au moyen de l'opérateur médian. Cette mesure superpose la vitesse angulaire de défilement de la bâche ω_{wall} estimée dans la direction du plus grand contributeur ayant servi à déterminer le flux optique médian. Cette sortie fusionnée permet d'obtenir une $Std_{error} < 12\%$ et un rafraîchissement de la mesure environ 4 fois plus élevé qu'un capteur de flux optique d'uniquement 2 pixels. (C, F, I, L) Diagramme en barre montrant, en pourcentage, quel capteur de flux optique élémentaire $\omega_{1,2,3,4,5}^m$ a contribué au calcul du flux optique médian. Pour la direction $\alpha = 60^\circ$, le meilleur contributeur est la capteur de flux optique élémentaire n°3 alors que dans la direction $\alpha = 80^\circ$ les capteurs de flux optique élémentaires contribuent tous à la mesure du médian. (M-N) Textures utilisées pour recouvrir la bâche utilisée pour caractériser les performances du capteur de flux optique.

Dans ce chapitre, nous avons étudié le design électronique d'une nouvelle génération de capteurs de flux optique qui se caractérise autant par sa faible consommation

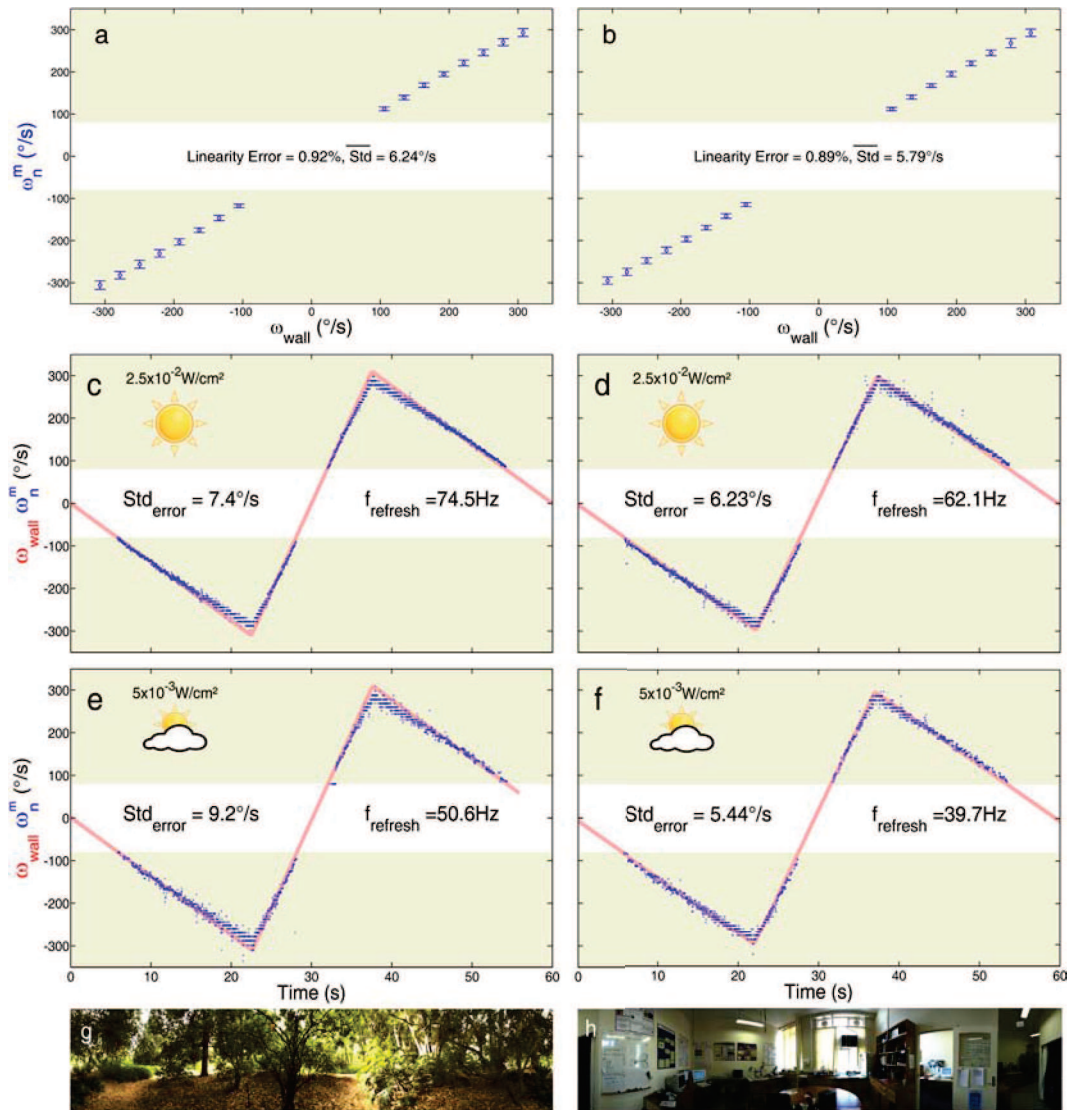


FIGURE 4.2 – Caractéristiques statiques et dynamiques du capteur de flux optique orienté face à la bache ($\alpha = 90^{\circ}$). Ce capteur incorpore la deuxième méthode de fusion sensorielle permettant, dans ce cas, d'estimer à la fois le sens et l'amplitude du flux optique 1-D. (A-B) Caractéristiques statique du capteur obtenues en faisant défiler la bache par pas de $30^{\circ} \cdot s^{-1}$ pendant 15 s dans la gamme de $[-315^{\circ} \cdot s^{-1}; -105^{\circ} \cdot s^{-1}]$ à $[105^{\circ} \cdot s^{-1}; 315^{\circ} \cdot s^{-1}]$. Les résultats montrent une erreur de linéarité inférieure à 1% et une $Std_{error} < 7^{\circ} \cdot s^{-1}$ pour les deux types d'environnements. (C-F) Caractéristiques dynamique du capteur obtenues pour deux conditions d'irradiance différentes. Les résultats montrent que la mesure du flux optique est robuste aux variations de luminosité dans une gamme d'irradiance de $2.5 \cdot 10 W \cdot cm^{-2}$ à $5 \cdot 10^{\circ} \cdot s^{-1}$ avec une très bonne $Std_{error} < 10\%$ et un haut rafraîchissement de la mesure $f_{refresh} > 39 Hz$. (G-H) Environnement visuel utilisé pour caractériser le capteur de flux optique.

électrique ($< 0.23W$) que par sa faible taille ($23.3 \times 12.3 mm$), sa faible masse embarquée (moins d'un gramme optique incluse) ainsi que son faible coût. Ce capteur met

en œuvre le principe du « temps de passage » permettant d'estimer le flux optique à partir d'une simple paire de pixels. Ce principe, directement inspiré de la vision de la mouche, résulte d'expériences électrophysiologique, dirigées dans notre laboratoire, menées directement sur les neurones détecteurs de mouvement de la mouche visant à étudier la réponse de ces derniers à une micro-stimulation des photo-récepteurs dans son œil composé. Ce modèle permet d'estimer le flux optique et il est tout à fait compatible avec une contrainte de faibles ressources calculatoires susceptibles d'intervenir dans le « cerveau » de la mouche.

Dans ce chapitre, nous avons étudié la mise en œuvre, sur l'unique micro-contrôleur du micro-capteur, de deux méthodes de fusion sensorielles utilisant les cinq paires de pixels de la micro-rétine afin de fournir une mesure du flux optique selon plusieurs directions de visée. La première méthode permet de mesurer le flux optique dans un sens préféré dans cinq directions différentes et de les fusionner en une seule constituant une sortie rafraîchie plus souvent « refresh rate » et plus précise. Enfin une deuxième méthode permet d'estimer le flux optique dans cinq directions différentes mais aussi d'en estimer le sens et la vitesse angulaire associée. Des optimisations du traitement numérique embarqué dans le micro-contrôleur ont permis d'atteindre ce niveau d'intégration qui se veut compatible avec une faible consommation en terme de ressources calculatoires.

La première méthode de fusion vise à combiner la mesure provenant de chaque paire de pixel (cinq au total) en une seule mesure grâce à l'opérateur *médian*. Ce capteur est ainsi capable de donner une estimation de la vitesse angulaire de défilement d'une scène selon cinq directions différentes mais aussi d'en donner une sortie unique issue de la fusion des cinq précédentes. Nous avons vu dans ce chapitre les performances atteintes en terme de précision de mesure en améliorant d'un facteur 1.7, au-moins, la Std_{error} de la mesure du flux optique en la diminuant de $17^\circ.s^{-1}$ pour une seule paire de pixels à $11^\circ.s^{-1}$ pour cinq paires de pixels fusionnées, mais aussi en terme de rafraîchissement de mesure en l'augmentant d'au moins un facteur 4 de $15.7 Hz$ pour une seule paire de pixel à $67 Hz$ pour les 5 mesures fusionnées (voir figure 4.1). La deuxième méthode de fusion multi-sensorielle embarquée sur ce capteur de moins d'un gramme permet d'utiliser la mesure d'un réseau de dix DEMs (ou « Local Motion Sensors »), dont cinq estiment le flux optique dans une direction préférée et les cinq autres dans l'autre direction. Cette configuration permet d'estimer, sans aucun à-priori, le sens de défilement d'une scène et sa vitesse angulaire associé dans une gamme de mesure allant de $[-350^\circ/s; -80^\circ/s]$ à $[+80^\circ/s; +350^\circ/s]$. L'utilisation d'un critère supplémentaire, le critère *maximum* permet de discriminer dans cette gamme de mesure le sens de défilement d'une scène. Les caractéristiques statique et

dynamiques de ce nouveau capteur d'une masse toujours inférieure au gramme ont été effectuées afin d'en déterminer les performances. Il en résulte que le capteur mesure la vitesse angulaire avec une excellente erreur de linéarité inférieure à 1% (figure 4.2A&B) et que la précision de mesure se révèle robuste aux variations lumineuses avec une Std_{error} du même ordre de grandeur ($< 10^\circ.s^{-1}$) (figure 4.2C-F).

Les caractéristiques du banc de test du capteur ne nous ont pas permis d'étudier les performances du capteur en extérieur mais en intérieur en utilisant des contrastes naturels défilant dans le champ visuel du capteur (figure 4.2E-F). Toutefois, une précédente étude [Expert et al., 2011b] utilisant le même type d'électronique a pu montrer une grande robustesse et une grande précision de la mesure dans une gamme de variation de 1.5 décade de l'éclairement avec de fortes variations transitoires.

Pour conclure ce chapitre, ce capteur innovant de moins d'un gramme possède d'excellentes caractéristiques d'estimation du flux optique en termes de précision de mesure et de fréquence de rafraîchissement, ce qui le rend parfaitement adapté pour le guidage visuel de robots volant dans les trois dimensions de l'espace dont les faibles constantes de temps exigent une fréquence de rafraîchissement élevée de la mesure. Une application récente a pu embarquer un capteur similaire sur un drone de type hélicoptère (RESSAC de l'ONERA) et a montré d'excellentes performances d'estimation du flux optique dans une gamme très faible de $[1.5^\circ.s^{-1}; 25^\circ.s^{-1}]$ [Sabiron et al., 2013b]. Ce capteur bi-directionnel se veut être un capteur incontournable pour des applications d'évitement d'obstacles, de suivi de terrain, d'atterrissage et de décollage automatique ainsi que pour des applications de contrôle de vitesse. Une mise en œuvre robotique future sur une plateforme telle que le micro-robot LORA augmenterait sans nul doute sa robustesse de navigation dans des environnements naturels.

Chapitre 5

Article IV. Honeybees' speed depends on dorsal as well as lateral, ventral and frontal optic flows

Article publié en 2011 dans *PLoS ONE* : volume 6, pages e19486.

Auteurs : Geoffrey Portelli, Franck Ruffier, Frédéric L. Roubieu, et Nicolas Franceschini.

Nous avons vu dans les chapitres précédents une implémentation robotique de l'hypothèse de régulation du flux optique latéral. Les résultats ont montré que le robot était alors capable de reproduire les comportements observés chez l'abeille dans le contrôle du vol sur le plan horizontal. Afin de compléter notre compréhension du modèle du contrôle du vol chez l'insecte, il est important d'étudier le contrôle du vol sur le plan vertical cette fois. Nous avons vu précédemment (chapitre 1) que les insectes contrôlent leur position latérale, hauteur et vitesse de vol en maintenant une valeur de flux optique préférée dans certaines régions de leurs yeux composés. Un modèle du contrôle du vol dans les trois dimensions a été proposé : le modèle ALIS (*Autopilot using an Insect-based vision System*) [Portelli et al., 2008]. Ce modèle de simulation du vol de l'abeille est une extension au plan vertical du principe de la double régulation du flux optique sur le plan horizontal (LORA). Ce dernier permet de lier le contrôle de la position (latérale, hauteur) et de la vitesse d'avance au moyen d'une estimation du flux optique dans quatre régions différentes : latérales (droit et gauche), dorsale (haut) et ventrale (bas). Une récente étude a permis de montrer clairement le rôle de la régulation du flux optique ventrale dans le contrôle de la hauteur [Portelli et al., 2010a]. Ce chapitre continue les investigations comportementales et s'intéresse de plus près aux mécanismes du contrôle de vitesse chez l'abeille intervenant sur le plan horizontal et vertical. Des abeilles ont été entraînées à naviguer dans un tunnel fuselé complexe présentant un fuselage sur le plan horizontal et sur le plan

vertical. Comment l'abeille va-t-elle réagir face à ces perturbations ? Les résultats comportementaux obtenus permettront de se confronter directement aux hypothèses de navigation émis par le pilote automatique ALIS.

Honeybees' speed depends on dorsal as well as lateral, ventral and frontal optic flows

Geoffrey Portelli, Franck Ruffier, Frédéric L. Roubieu and Nicolas Franceschini

Abstract—Flying insects use the optic flow to navigate safely in unfamiliar environments, especially by adjusting their speed and their clearance from surrounding objects. It has not yet been established, however, which specific parts of the optical flow field insects use to control their speed. With a view to answering this question, freely flying honeybees were trained to fly along a specially designed tunnel including two successive tapering parts: the first part was tapered in the vertical plane and the second one, in the horizontal plane. The honeybees were found to adjust their speed on the basis of the optic flow they perceived not only in the lateral and ventral parts of their visual field, but also in the dorsal part. More specifically, the honeybees speed varied monotonically, depending on the minimum cross-section of the tunnel, regardless of whether the narrowing occurred in the horizontal or vertical plane. The honeybees' speed decreased or increased whenever the minimum cross-section decreased or increased. In other words, the larger sum of the two opposite optic flows in the horizontal and vertical planes was kept practically constant thanks to the speed control performed by the honeybees upon encountering a narrowing of the tunnel. The previously described ALIS (“AutopiLot using an Insect-based vision System”) model nicely matches the present behavioral findings. The ALIS model is based on a feedback control scheme that explains how honeybees may keep their speed proportional to the minimum local cross-section of a tunnel, based solely on optic flow processing, without any need for speedometers or rangefinders. The present behavioral findings suggest how flying insects may succeed in adjusting their speed in their complex foraging environments, while at the same time adjusting their distance not only from lateral and ventral objects but also from those located in their dorsal visual field.

I. INTRODUCTION

There exists strong evidence that flying insects perceive and use the optic flow to control their flight [1]–[8]. The optic flow is the *angular velocity* at which any environmental feature sweeps past the insects eyes as the result of its own motion [1], [3], [6], [9], [10]. The *translational* optic flow perceived in a given direction depends on the ratio between the relative speed and the distance to the environment in that direction [11]. This sensitivity to the translational optic flow enables insects to navigate safely and efficiently in unfamiliar environments. Insects' terrain following and landing abilities have been explained in terms of holding the *ventral optic flow* constant by consistently adjusting the *lift* [12]. It has also been established that honeybees flying along a corridor keep a safe clearance from the walls [6], [13], [14] and

from the ground [15]. However, although many studies have focused on this topic, it is not yet clear how insects manage to adjust their speed based on the visually perceived optic flow [4], [16]–[19]. Honeybees trained to fly along a tapered tunnel were found to reduce their speed when the tunnel narrowed and to accelerate when the tunnel widened [16]. The authors of the latter study concluded that “honeybees strive to hold the angular velocity of the image in the lateral region of the eyes constant” [16]. When flying through a tunnel equipped with moving walls, honeybees have also been found to adjust their speed “so as to hold constant the image angular velocity in the eye” [17], [20]. Other evidence suggests that the ventral optic flow also contributes significantly to the speed control process [16], [20], [21]. The latter authors used various tunnels, the floor of which was lined with stationary patterns of various kinds, such as 2-D patterns providing abundant ventral optic flow cues, axial patterns providing only a few ventral optic flow cues and a homogeneous pattern providing hardly any optic flow cues. Honeybees were found to fly at a lower height and a higher speed on average when few ventral optic flow cues were available.

Based on these studies, one might expect the *lateral* optic flow to affect honeybees' flight speed and the *ventral* optic flow to affect both their flight speed and their flight height. In order to combine all these findings in a single control model, we recently developed the ALIS autopilot [22] (ALIS stands for “AutopiLot using an Insect based vision System”), which is based on the concept of *optic flow regulation* [23]. The *optic flow regulator* is a feedback control system that strives to maintain the perceived optic flow at a constant reference value: the optic flow set point. The ALIS control scheme actually incorporates two optic flow regulators: the first one controls the vertical and horizontal positions, while the second one controls the speed. The first optic flow regulator relies on the largest optic flow (left, right, dorsal, or ventral), and the second one relies on *the larger of the two sums of opposite optic flows* (i.e., “left + right” optic flows or “ventral + dorsal” optic flows). Consequently, it is the plane (horizontal or vertical) affording the larger of the two optic flow sums that will constrain the bee's speed. To test the relevance of the ALIS model, we designed a doubly-tapered flight tunnel comprising two successive tapering parts that freely flying honeybees would encounter: in the first part, a gradual constriction occurred in the vertical plane, and in the second one, a gradual constriction occurred in the horizontal plane (see figure 1C-D, see also an overall perspective sketch of the tunnel in figure 6A and a photograph of a honeybee

Article was published in 2011 in *PLoS ONE*: vol. 6, pages e19486.
 Authors are with the Aix-Marseille University,
 CNRS, ISM UMR 7287, 13288, Marseille cedex 09,
 France {geoffrey.portelli@univ-amu.fr,
 franck.ruffier, frederic.roubieu,
 nicolas.franceschini}@univ-amu.fr

flying along the doubly-tapered tunnel in supplemental figure 2, as well as an animated 3D view of the doubly-tapered tunnel in supplemental data S2). The ALIS model predicts that a honeybee flying along either of these two tapered sections will adjust its speed at all times on the basis of the minimum local cross-section of the tunnel, whether the latter occurs in the vertical or horizontal plane.

In the experiments carried out here, freely flying honeybees were trained to fly along the doubly-tapered tunnel. Their trajectories were recorded and special attention was paid to how the honeybees adjusted their speed as they crossed the various sections of the tunnel. Lastly, the flight performances of a bee were simulated in the same doubly-tapered tunnel on the basis of our ALIS model, and the actual and the simulated flight profiles were compared.

II. MATERIALS AND METHODS

A. Doubly tapered flight tunnel

The floor, roof and left wall of the outdoor flight tunnel used in this study consisted mainly of planks lined with red and white stripes. The right wall consisted of thin white insect netting lined with stripes consisting of a red Gelatin filter (Lee Filters HT019), through which the honeybees flight paths could be seen and video-recorded. The flight tunnel was 220 cm long, 40 cm high and 25 cm wide at the entrance. The tunnel comprised two successive tapering parts (figure 1C-1D). In the first of these parts, the narrowing occurred in the vertical plane with a 14deg tapering angle (figure 3B) and involved both the roof and the floor. It started 30 cm from the entrance and the maximum constriction (15 cm high by 25 cm wide) occurred 80 cm from the entrance. In the second tapering part, the narrowing occurred in the horizontal plane with a tapering angle of 18deg (figure 3A) and involved only the left wall (the right wall made of insect netting remained straight). This part started 80 cm from the entrance and the maximum constriction (15 cm high by 5 cm wide) was reached in this case 140 cm from the entrance. Beyond the second constriction, the tunnel widened out horizontally until reaching a section 15 cm high by 25 cm wide at a distance of 200 cm from the entrance. From 200 cm to 220 cm, the tunnel then widened vertically until reaching a section 25 cm high by 25 cm wide. The diagram in figure 1E shows that the minimum section was first the horizontal section (dash-dotted yellow line), then the vertical section (continuous magenta line), then the horizontal section again (dash-dotted yellow line) and lastly, the vertical section (continuous magenta line). Two manually operated openings (5 x 5 cm) centered at mid height and mid width gave single honeybees entry to the tunnel and access to the reward, respectively (only the entrance opening is shown in figures 3A,B). This outdoor flight tunnel was oriented to the north and received only indirect illumination (and no direct sunlight). A photograph of a honeybee flying along the doubly-tapered tunnel is presented in supplemental figure 2; an animated 3D view shows the overall geometry of the doubly-tapered tunnel in supplemental data S2.

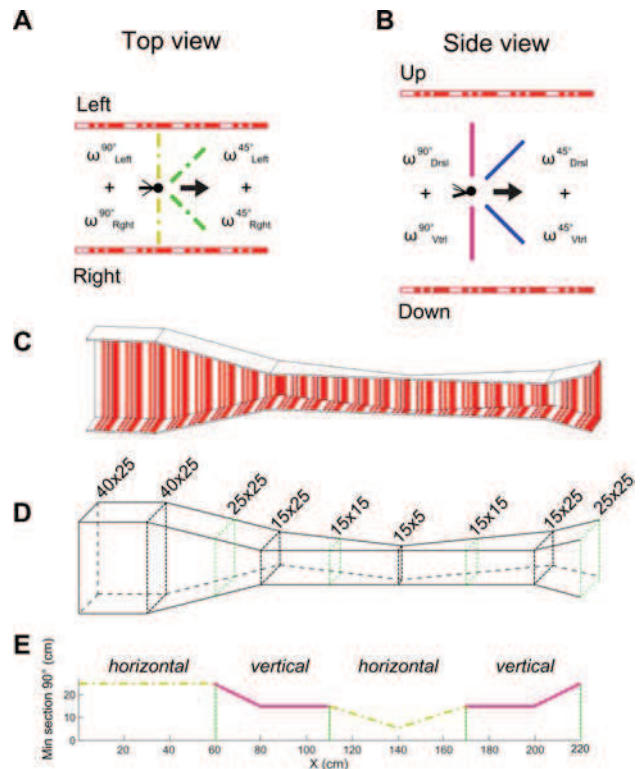


Fig. 1. Experimental flight tunnel. (A) Top view of the tunnel. The honeybee flies into the tunnel. The left optic flow (OF) $\omega_{Left}^{90^\circ}$ and the right OF $\omega_{Right}^{90^\circ}$ are generated by the contrasts on the side walls. The sum of these opposite OFs at 90° is $\sum \omega_{Lat}^{90^\circ}$ (dash-dotted yellow line). The left optical flow $\omega_{Left}^{45^\circ}$ and the right optical flow $\omega_{Right}^{45^\circ}$ are generated at an angle of 45° with respect to the forward heading direction. Their sum is $\sum \omega_{Lat}^{45^\circ}$ (dash-dotted green line). (B) Side view of the tunnel. The honeybee flies into the tunnel. The dorsal OF $\omega_{Dorsl}^{90^\circ}$ and the ventral optical flow $\omega_{Ventr}^{90^\circ}$ are generated by the contrasting stripes on the ceiling and the floor of the tunnel, respectively. The sum of these OFs at an angle of 90° is $\sum \omega_{Vert}^{90^\circ}$ (magenta line). The dorsal OF $\omega_{Dorsl}^{45^\circ}$ and the ventral optical flow $\omega_{Ventr}^{45^\circ}$ are generated at an angle of 45° with respect to the forward heading direction. Their sum is $\sum \omega_{Vert}^{45^\circ}$ (blue line). (C-D) Perspective view of the whole tapered tunnel. Two tapered zones occur in this tunnel: the first one is tapered in the vertical plane (from 30 cm to 80 cm, tapering angle 14°), and the second, in the lateral plane (from 80 cm to 200 cm, tapering angle 18°). (E) Minimum section of the tapered tunnel along the abscissa. Because of the way this particular tunnel was designed, the minimum section was encountered alternately in the lateral plane (dash-dotted yellow line) and the vertical plane (magenta line).

B. Pattern

The pattern on the walls of the tunnel consisted of red and white stripes oriented perpendicularly to the flight direction. Since honeybees are devoid of red-sensitive photoreceptors [24], they perceive red stripes as gray shades. These red stripes had two different widths (1 cm and 3 cm), forming a uniform 10cm-wide pattern that was repeated periodically, as shown in figure 1. The angle subtended by the stripes ranged from 5.7° to 53° (a 1-10 cm pattern viewed from a distance of 10 cm, respectively) and from 1.4° to 14.2° (a 1-10 cm pattern viewed from a distance of 40 cm, respectively). The Michelson contrast between the red and white stripes was $m = 0.47$ on the planks and $m = 0.25$ on the insect netting. Contrast was measured using a photodiode equipped

with a green band-pass filter (Kodak Wratten $N^{\circ}61$), the transmission spectrum of which closely matched the spectral sensitivity of the honeybee's green photoreceptors [24], which are the receptors involved in motion vision [25]–[28]. A red filter placed in front of the camcorder monitoring the honeybees' trajectories through the insect netting was used to optimize the contrast between the honeybee and the background.

C. Experimental procedure

Groups of four to six freely flying honeybees (*Apis mellifera*) were color-marked and trained outdoors to enter the tunnel and fly along it to collect sugar solution at the opposite end (see figure 2). Once honeybees had received about 30 rewards, their flight path was recorded with the digital camera from the insect-netting side, on their way to the reward. Only one honeybee at a time was allowed to enter the tunnel during each recording session. The camcorder was triggered at the moment the honeybee entered the tunnel. During the recordings, the white door giving access to the reward remained seamlessly closed to rule out the presence of any uncontrolled attractive cues.

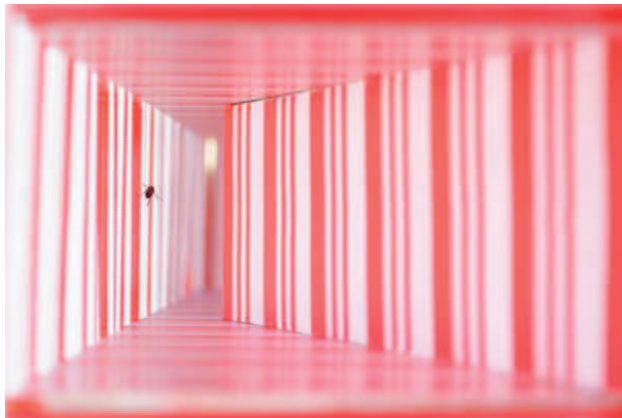


Fig. 2. A honeybee flying along the doubly-tapered tunnel. The photograph was taken at the entrance of the tunnel. (Published as a supplementary figure. Copyright DGA/F. Vignaux)

D. Video recordings and flight path analysis

The honeybees' trajectories were filmed at a rate of 20 frames per second ($T_s = 50$ ms) with a high-resolution digital black-and-white CMOS camera (Prosilica EC1280, $1/3''$ sensor size) equipped with a Fujinon HF12.5HA-1B lens. The camera was placed sideways, 265 cm from the insect netting. The small field of view ($21^{\circ}44' \times 16^{\circ}23'$) covered the whole height of the tunnel, from abscissa $x = 20$ cm to abscissa $x = 210$ cm. The lens had a maximum barrel distortion of 1.48% along x on the extreme upper border of the field of view and a maximum barrel distortion of 0.8%, vertically, on the extreme right and left border of the field of view. However, the trajectories were recorded in the middle of the field of view, where the maximum lens distortion was only 0.23% along x and 0.8%, vertically. The effect

of perspective foreshortening was therefore neglected. Image sequences were processed and analyzed using a custom-made Matlab program. In any sequence of images, this program automatically determines the honeybees' flight height (h) in each frame as a function of the abscissa (x) along the tunnel axis, thus allowing the honeybee's trajectory in the vertical plane to be reconstructed. The honeybees' instantaneous forward speed (Vx_{Bee}) was computed on each abscissa x using a four-point derivative smoothing filter ($Vx_{Bee}(t) = (2x_{Bee}(t-2) + x_{Bee}(t-1) - x_{Bee}(t+1) - 2x_{Bee}(t+2))/10T_s$), as was the honeybees' instantaneous vertical speed ($Vh_{Bee}(t) = (2h_{Bee}(t-2) + h_{Bee}(t-1) - h_{Bee}(t+1) - 2h_{Bee}(t+2))/10T_s$).

E. Analysis

The honeybees were assumed to fly taking a laterally centered course, aligned with the tunnel's x -axis, as found to occur in similar (narrow) tunnels [6], [13], [16], [19]. Their head orientation was also assumed to remain practically fixed and aligned with the tunnel axis. This assumption is supported by findings obtained on another hymenopteran [29] and on Dipterans [30]–[34], showing that insects produce consistent head counter-rotations that compensate for their body's yaw, pitch and roll motions, and thereby stabilize their gaze relative to the environment. These gaze locking properties have been observed in many species [29]. The parameters used in the present analysis were the honeybees' flight height (h) and their flight speed (V_{Bee}). The latter was resolved into the ground speed Vx_{Bee} and the vertical speed Vh_{Bee} . Depending on the honeybees' position (x , h), their distances from the four walls of the tunnel were determined at a viewing angle of 90° ($D_{Lft}^{90^{\circ}}$ = distance from the left wall, $D_{Rght}^{90^{\circ}}$ = distance from the right wall, $D_{Drsl}^{90^{\circ}}$ = distance from the roof, and $D_{Vtrl}^{90^{\circ}}$ = distance from the floor). The translational optic flows perceived at viewing angles of 90° can be defined as the speed-to-distance ratio according to the following equation: $\omega_i^{90^{\circ}} = Vx_{Bee} \times D_i^{90^{\circ}}$, where $i \in \{Rght, Lft, Drsl, Vtrl\}$, taking the distances from the walls at an angle of 90° and Vx_{Bee} the bee's ground speed (figure 1A-B).

Experiments by [13] have provided evidence that honeybees flying along a tunnel monitor the optic flow chiefly via the lateral parts of their visual field. However, the honeybee's panoramic compound eye is able to perceive the environment in many other directions, which provides the bee with relevant optic flow information to control their speed, as recently shown for the frontal visual field by [19]. Studies on recently designed insect-inspired aerial robots based on optic flow sensing mechanisms showed that the optic flow perceived at 45° from the heading direction is a particularly relevant and reliable parameter for controlling the course of a micro aircraft [35]. It can also be used for anticipation purposes and to improve the efficiency in terms of obstacle avoidance [36]. We therefore investigated the possible role of the optic flow perceived by honeybees at an angle of 45° , either laterally, ventrally or dorsally in the context of honeybees' speed control. The translational optic flows generated at 45° in the honeybees' frontal field

of view can be defined according to the following equation: $\omega_i^{45^\circ} = (V_{Bee} \times \sin\Psi_i) / D_i^{45^\circ}$ with $i \in \{Rght, Lft, Drsl, Vtrl\}$, where V_{Bee} is the honeybee's speed, resolved into the ground speed V_{xBee} and vertical speed V_{hBee} , and Ψ_i is the angle between the honeybees speed vector and the gaze direction under consideration ($\Psi_i = 45^\circ + \text{atan}(V_{hBee}/V_{xBee})$ for $i \in \{Drsl, Vtrl\}$ and $\Psi_i = 45^\circ$ for $i \in \{Rght, Lft\}$ as V_{yBee} is unknown), and $D_i^{45^\circ}$ are the distances between the bee and the four surfaces at an angle of 45° , as shown in figure 1A-B.

In figure 4B-C, the flight height h and the ground speed V_{xBee} are each plotted as a function of the abscissa x . Height and speed were averaged at 5-cm intervals along a distance of 190 cm: each of the 38 data points plotted is the mean value of the honeybee's individual height and speed values, respectively. A one-way repeated-measures ANOVA was performed on the 38 mean height data points and the 38 mean speed data points versus the position x in the tunnel. To further investigate the differences between points, a TukeyHSD post-hoc test was applied. In these analyses, significance level was taken to be $\alpha = 0.05$. The faded colors around the curves give \pm the standard error of the mean (s.e.m.). In figure 5B, the larger mean sums of the two lateral optic flows measured ($\Sigma\omega^{90^\circ} Lat = \omega_{Rght}^{90^\circ} + \omega_{Lft}^{90^\circ}$) and the two vertical optic flows measured at 90° ($\Sigma\omega^{90^\circ} Vert = \omega_{Drsl}^{90^\circ} + \omega_{Vtrl}^{90^\circ}$) are plotted as a function of the abscissa x . In figure 5C, the larger mean sums of the two lateral optic flows measured at 45° ($\Sigma\omega^{45^\circ} Lat = \omega_{Rght}^{45^\circ} + \omega_{Lft}^{45^\circ}$) and the two vertical optic flows measured at 45° ($\Sigma\omega^{45^\circ} Vert = \omega_{Drsl}^{45^\circ} + \omega_{Vtrl}^{45^\circ}$) are plotted versus the abscissa x . To compare the variance of the larger $\Sigma\omega^{90^\circ}$ with that of the larger $\Sigma\omega^{45^\circ}$, the method and the extended t -test described by Zar were used ([37], Section 9.4, pp.182-183). This involves taking the optic flow data normalized with respect to their respective means and making the following comparison based on the following one-tail hypotheses: H_0 : variance $\text{Max}(\Sigma\omega^{90^\circ}) \leq$ variance $\text{Max}(\Sigma\omega^{45^\circ})$ versus H_A : variance $\text{Max}(\Sigma\omega^{90^\circ}) >$ variance $\text{Max}(\Sigma\omega^{45^\circ})$.

III. RESULTS

The top view (figure 3A) and side view (figure 3B) of the tunnel show the two successive tapered sections existing in the vertical and horizontal planes. A typical individual honeybee's trajectory recorded sideways through the insect netting and plotted every 100ms is shown in figure 3B. The honeybee's flight can be seen to have been quite vertically centered in the tunnel (mean height: 19 ± 0.19 cm). It can be seen from figure 3C that the honeybee gradually reduced its mean ground speed V_{xBee} down to the point where it approached the narrowest section of the tunnel, located 140cm from the starting-point. The honeybee then increased its ground speed again as the tunnel widened out, first horizontally and then vertically. The mean trajectory and the mean ground speed of the 21 honeybees flying freely along the tapered tunnel are given in figure 4B-C, respectively. Figure 4A is a tentative diagram of the honeybees' trajectory in the horizontal plane, where the bees were assumed to take a laterally centered course, as suggested by previous

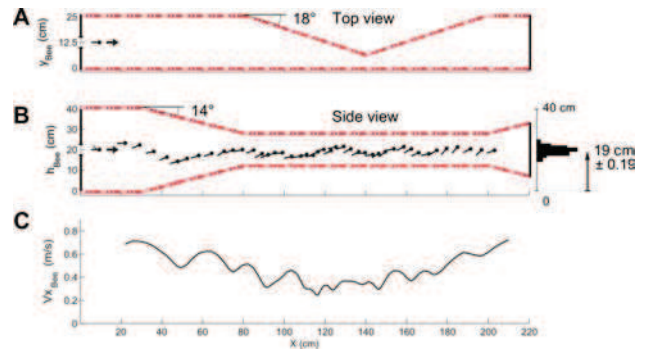


Fig. 3. Typical trajectory of an individual honeybee in the doubly-tapered tunnel. (A) Top view of the tunnel showing the entrance of the honeybee, and the tapering in the lateral plane at a distance of 80cm to 200cm from the entrance. (B) Side view of the actual trajectory of a honeybee, plotted every 100ms. The honeybee's course was fairly well centered in the tunnel (mean height $h = 19 \pm 0.19$ cm). (C) Honeybee's speed as a function of the distance along the abscissa x . The honeybee decreased its speed as the tunnel narrowed, regardless of whether the narrowing was in the vertical or the lateral plane. The honeybee then increased its speed as the tunnel widened.

experiments carried out in a narrow tapered tunnel [16]. Figure 4B gives the mean vertical trajectory of the honeybees plotted every 5cm. The honeybees' mean course was clearly centered in the vertical plane of the tunnel (mean height $h = 19 \pm 0.16$ cm). Figure 4C gives the mean honeybees' ground speed as a function of the distance along the abscissa x . The honeybees clearly reduced their speed when approaching the narrowest section of the tunnel, and increased their speed again as the tunnel widened beyond this point (d.f. = 37, $F = 28.2$, $P < 0.001$). A particular speed pattern emerged from the TukeyHSD post-hoc test on the ground speed profiles (figure 4C, bottom trace). Up to point $x = 60$ cm on the abscissa, the speed was found to be constant (NS, $P > 0.05$). Between $x = 60$ cm and $x = 90$ cm, the speed decreased significantly ($P < 0.001$). Between $x = 90$ cm and $x = 110$ cm, the speed became constant again (NS, $P > 0.05$). Between $x = 95$ cm and $x = 130$ cm, the speed decreased significantly once more ($P < 0.05$) as the honeybees were about to reach the narrowest section of the tunnel. Lastly, from $x = 130$ cm to $x = 180$ cm, the speed gradually increased again ($P < 0.01$) as the honeybees flew along the widening part of the tunnel. It is striking that the ground speed profile (figure 4C, bottom trace) practically matched the minimum section profile recorded at 90° (figure 1E).

To illustrate this point further, the minimum section profiles and the mean optic flows perceived both at 90° and at 45° by the honeybees are shown in parallel in figure 5. In figure 5B, we plotted the larger of the two mean optic flow sums perceived by the bee at 90° (either laterally or vertically) ($\omega_{Rght}^{90^\circ} + \omega_{Lft}^{90^\circ}$, yellow line and $\omega_{Drsl}^{90^\circ} + \omega_{Vtrl}^{90^\circ}$, magenta line). The larger optic flow sum first changed from lateral to vertical and from vertical to lateral just before reaching the points where the minimum section changed. The minimum section encountered at an angle of 90° narrowed twice along the tunnel, creating two constriction points:

- The first narrowing occurred in the vertical plane, creating the first constriction point at $x = 80\text{cm}$ (figure 5A, arrowhead n°1). As the bees approached this first constriction point, the *larger optic flow* sum increased. The minimum section remained steady between $x = 80\text{cm}$ to $x = 110\text{cm}$, and the larger optic flow sum decreased, reaching a similar value to that perceived before the narrowing point ($Max(\Sigma\omega^{90^\circ})_{x=60\text{cm}} = 609.5 \pm 29.6^\circ/\text{s}$ and $Max(\Sigma\omega^{90^\circ})_{x=100\text{cm}} = 702.3 \pm 36.6^\circ/\text{s}$).
- The second narrowing occurred horizontally, creating the second constriction point (arrowhead n°2) at $x = 140\text{cm}$. The larger of the two optic flow sums perceived increased until the honeybee reached the constriction. Then, as the tunnel widened, the larger optic flow sum gradually decreased again, reaching a similar value to that experienced before the narrowing point ($Max(\Sigma\omega^{90^\circ})_{x=110\text{cm}} = 624 \pm 28.8^\circ/\text{s}$ and $Max(\Sigma\omega^{90^\circ})_{x=170\text{cm}} = 707.6 \pm 40.4^\circ/\text{s}$).

One may wonder what these optic flow profiles would have looked like if the optic flow had not affected the bees ground speed. In figure 5B,C, the dash-dotted black lines show the dramatic change in the larger optic flow sum that the bee would have experienced at the viewing angles of 90° and 45° if it had kept flying at a constant ground speed (0.74 m/s), i.e. without the use of any speed control system.

The overall shape of the minimum section encountered at a viewing angle of 45° (figure 5C) did not differ much from that encountered at a viewing angle of 90° . However, at 45° , the honeybee encountered each constriction in the frontal direction at a slightly shorter distance from the entrance than at 90° . Figure 5D shows the larger of the two optic flow sums generated at 45° : the overall shape of the larger optic flow sum profile observed at an angle of 45° was similar to that observed at 90° . The larger optic flow sum increased slightly as the tunnel narrowed and tended to reach a similar value to that recorded before the constriction point. In addition, the peaks in the larger optic flow sum profile were found to occur at practically the same places as the maximum optic flow perturbation induced by the narrowing sections. The first constriction was encountered at position $x = 73\text{ cm}$ (figure 5C, arrowhead n°3), whereas the larger optic flow sum ($Max(\Sigma\omega^{45^\circ})$) occurred at $I = 82\text{ cm}$. The second constriction occurred at position $I = 135\text{ cm}$ (arrowhead n°4), whereas the larger optic flow sum ($Max(\Sigma\omega^{45^\circ})$) occurred at $x = 137\text{ cm}$. Upon comparing the profiles shown in figures 5B and 5D, the larger of the two optic flow sums generated (either vertically or laterally) was found to be better “stabilized” about a constant value at a viewing angle of 45° ($mean(Max(\Sigma\omega^{45^\circ})) = 351.7 \pm 14.2^\circ/\text{s}$) than at a viewing angle of 90° ($mean(Max(\Sigma\omega^{90^\circ})) = 711.8 \pm 24^\circ/\text{s}$). This conclusion was supported by comparisons between the variances of the larger optic flow sums obtained at 90° and at 45° ($Max(\Sigma\omega^{90^\circ})$ and $Max(\Sigma\omega^{45^\circ})$): as shown by the histograms to the right of figure 5B,D, the variance of

the normalized data¹ ratio was distinctly lower at 45° than at 90° ($t_{(36)} = 2.99$, $p < 0.01$). If the honeybees’ speed was not controlled, the honeybees would have perceived much larger maximum sum of the 2 opposite optic flows than what they actually perceived in our doubly tapered tunnel, which is shown by the dashed black lines in figures 5B and 5D ($mean(Max(\Sigma\omega_{w/oSpeedControl}^{90^\circ})) = 1258.2 \pm 85^\circ/\text{s}$ and $mean(Max(\Sigma\omega_{w/oSpeedControl}^{45^\circ})) = 610.1 \pm 14^\circ/\text{s}$).

Figure 6 shows the flight path and the speed profile of a simulated agent equipped with the ALIS autopilot [22], flying along the same tunnel comprising two constrictions, in the vertical and horizontal planes. Figure 6C and 6D shows the trajectories in the horizontal plane (x,y) and the vertical plane (x,z), respectively. In the vertical plane, the simulated agent can be seen to fly roughly in the middle of the tunnel (this is because its “positioning optic flow set-point” is set at half of the “speed optic flow set-point”, see [38]). In the horizontal plane, however, the simulated agent followed one lateral wall. The large variations in the cross-sections occurring along the tunnel continuously disturbed the ALIS autopilot and did not give the simulated agent enough time to asymptotically reach the final horizontally and vertically centered position. The simulated agent nevertheless automatically kept a safe lateral clearance from the walls (figure 6C) as well as a safe clearance from both the floor and the ceiling (figure 6D), which brought it near the middle of the tunnel. The simulated agent can be seen to automatically slow down as the minimum cross-section of the tunnel narrows and to automatically accelerate again when the minimum cross-section widens (figure 6E,F). Since the tunnel alternately narrows in the vertical and horizontal planes, the optic flow perceived laterally and vertically constraining the agents’ speed alternately. The ALIS autopilot makes the simulated agent cross the doubly-tapered tunnel safely, in spite of major optic flow disturbances that alternately affect its eyes laterally, ventrally and dorsally. All in all, these results show that the ALIS-based simulated agent adopts a speed (figure 6E) that is automatically adjusted to the minimum section profile (figure 6F): the minimum section profile producing the largest optic flow.

IV. DISCUSSION

In the experiments described here, honeybees were trained to fly along a specially designed tunnel comprising two successive tapering sections, the first of which was constricted in the vertical plane and the second, in the horizontal plane. During the trials, the honeybees, which entered the tunnel at half height, kept a centered position in the vertical plane along the whole the tunnel (figure 3B, figure 4B). The honeybees reduced their speed as the tunnel narrowed and speeded up again as the tunnel widened (figure 3C, figure 4C). The results of this experiment clearly show that the honeybees controlled their speed on the basis of all the

¹Typography error, initially published as “(...) the variance-to-the-mean ratio (...)”

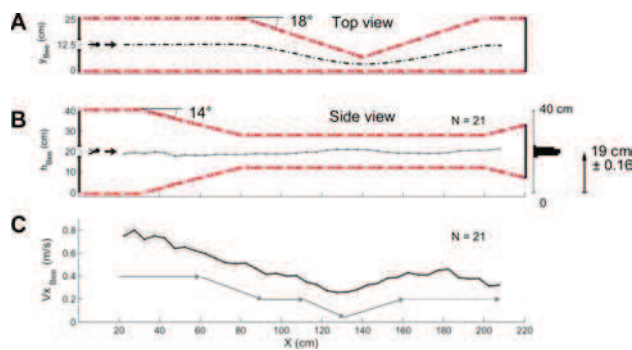


Fig. 4. Mean vertical trajectory and mean speed of the 21 honeybees in the doubly-tapered tunnel. (A) Top view of the tunnel showing the entrance of the honeybee, the part tapering in the lateral plane (from 80cm to 200cm) and the assumed trajectory of the insect in the lateral plane (see text). (B) Side view of the tapered tunnel, showing in particular the vertical constriction. The mean flight path of the honeybees is plotted as a function of the distance along the abscissa. The insects' mean trajectory can be seen to be practically vertically centered throughout the tunnel (mean height $h = 19 \pm 0.16$ cm). (C) Forward speed profile along the tunnel. The honeybees decreased their speed as the tunnel narrowed and increased their speed as it widened. The faded trace around the curves gives \pm the standard error of the mean (s.e.m.). The gray profile underneath the main curve shows the overall flight speed pattern as shown by the analysis.

surrounding optic flows (the left, right, ventral and dorsal optic flow). Two main points emerge from this study:

- 1) Honeybees react to a narrowing in the *vertical plane* by reducing speed in the same way as they do when they encounter a narrowing in the *horizontal plane* (figure 3C, figure 4C).
- 2) In reducing their speed, honeybees maintain the larger of the two perceived optic flow sums at a relatively constant value (figure 5B-D).

A. Honeybees adjusted their speed in the same way, regardless of whether the tunnel narrowed vertically or horizontally.

First, honeybees clearly reduced their speed when they encountered the first (vertical) tapering section of the corridor (figure 4C). After training honeybees to fly along a corridor with horizontally tapered walls, Srinivasan et al. established that honeybees decreased their flight speed "to hold the angular velocity of the image on the walls constant" [16]. This previous finding provided definite evidence that the lateral optic flows are directly involved in honeybees' flight speed control system. The question still remained to be answered, however, as to whether the *ventral* optic flow is involved in the insects flight speed control system. Previous studies on fruit flies [4], moths [39], and beetles [40] have shown that when following an odor plume, these insects flew faster when their distance from the floor increased. It was concluded that the insect may adjust its flight speed so as to maintain its ventral optic flow constant. In previous studies on honeybees [20], [21], various tunnels have been used, the floors of which were lined with stationary patterns of various kinds, such as 2-D patterns providing strong ventral optic flow cues, axial patterns providing weak ventral

optic flow cues or a homogeneous pattern providing hardly any optic flow cues. The honeybees were found to fly on average at a lower height and a higher speed when only a few ventral optic flow cues were available. In the present study, the honeybees were found to decrease their ground speed as they flew along the first vertically tapering part of the corridor, which perturbed both their dorsal and ventral optic flows (figure 3, figure 4). In our doubly-tapered tunnel, the bee's ground speed $V_{x_{Bee}}$ showed small oscillations (figure 3C) with a main frequency of 2.5 ± 0.3 Hz on average, based on all the individual trajectories recorded. In a completely different condition (rotary drum condition), previous authors reported that a lateral peering occurred at a frequency of about 7Hz [41]. In a straight, narrow tunnel, a lateral oscillation with a mean frequency of 4.7 ± 1.6 Hz was reported to occur in various visual conditions ([42], pp. 51-52). This discrepancy between frequencies is probably attributable to the differences between experimental conditions. These oscillations in the bees' ground speed frequency might be partly due to the bee's visual speed control system being highly constrained and disturbed by our narrow doubly-tapered tunnel. The performances of the bees shown in figure 3&4 provide evidence that in addition to the *lateral* optic flows [16], [17] and the *ventral* optic flow [20], [21], the *dorsal* optic flow is involved in the speed control process. In the experiments presented here, it is noteworthy that the honeybees did not start to decrease their ground speed at the point where they encountered the vertical tapering ($x = 30$ cm), but rather at the point ($x = 60$ cm) where the local vertical section became narrower than the local horizontal section (figure 1E, figure 4C). Up to this point ($x = 60$ cm), the honeybees' speed depended on the local *horizontal* section, presumably since it was the smaller of the two sections. At $x = 60$ cm, the *vertical* section became narrower than the *horizontal* section: the larger optic flow sum of the two was therefore that involving the top and bottom walls, and this was the parameter used to determine the honeybee's speed. The opposite situation occurred later on (at $x = 110$ cm), when the local horizontal section became narrower than the local vertical section: it was therefore the horizontal section that took over as the parameter determining the bee's speed. The honeybees' ground speed therefore depended on the minimum local cross-section of the tunnel, regardless of whether this minimum value was reached on the vertical or horizontal plane.

B. Maintaining the perceived optic flows at a constant level.

The tapered tunnel greatly modified the optic flows throughout the visual field of the honeybees. The insects reacted to these disturbances by decreasing or increasing their speed accordingly. As the result of these changes of speed, the perceived optic flows were gradually restored to a similar level to that perceived by the insects before the disturbance. This can be seen from the fact that larger optic flow sum profiles were calculated at viewing angles of both 90° and 45° with respect to the tunnel x -axis (figure 5B,D). We therefore observed that the larger optic flow sum

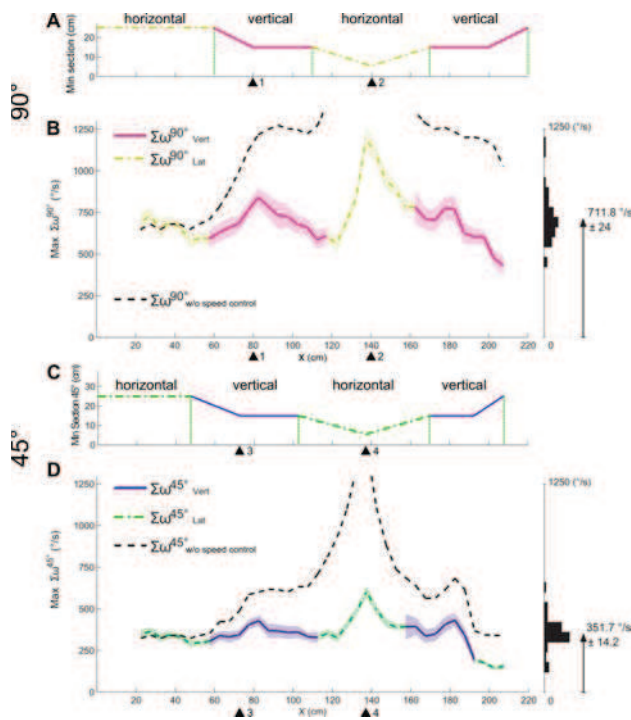


Fig. 5. Analysis of the larger of the two optic flow sums perceived by the 21 honeybees at an angle of 90° and at 45° with respect to the tunnel x -axis, in comparison to the minimum section of the tunnel at each point along the tunnel. (A) Minimum section at 90° of the tapered tunnel as a function of the distance along the abscissa. The minimum section at 90° was alternately in the horizontal plane and vertical plane. (B) Larger of the two optic flow sums in the horizontal plane (dash-dotted yellow line) and the vertical plane (magenta line), ($mean(Max\Sigma\omega^{90^\circ}) = 711.8 \pm 24^\circ/s$, the highest value peaks at $Max(Max\Sigma\omega^{90^\circ}) = 1192^\circ/s$), as well as the larger optic flow that would have been experienced theoretically at 90° at a constant ground speed (0.74 m/s), i.e., without the use of any speed control system by the bee (dashed black line, $mean(Max\Sigma\omega_{w/oSpeedControl}^{90^\circ}) = 1258.2 \pm 85^\circ/s$, the highest value peaks at $Max(Max\Sigma\omega_{w/oSpeedControl}^{90^\circ}) = 2971^\circ/s$). (C) Minimum section profile of the tapered tunnel, encountered at an angle of 45° from the frontal heading direction. The minimum section encountered at an angle of 45° occurred alternately in the horizontal plane (dash-dotted green line) and the vertical plane (blue line), and the changes of speed occurred earlier than those recorded at an angle of 90° . (D) Larger of the two optic flow sums in the horizontal plane (dash-dotted green line) and the vertical plane (blue line), ($mean(Max\Sigma\omega^{45^\circ}) = 351.7 \pm 14.2^\circ/s$, the highest value peaks at $Max(Max\Sigma\omega^{45^\circ}) = 601^\circ/s$), as well as the larger optic flow that would theoretically have been experienced at 45° at a constant speed (0.74 m/s), i.e., without the use of any speed control system by the bee (dashed black line, $mean(Max\Sigma\omega_{w/oSpeedControl}^{45^\circ}) = 610.1 \pm 14^\circ/s$, the highest value peaks at $Max(Max\Sigma\omega_{w/oSpeedControl}^{45^\circ}) = 1493^\circ/s$). The histograms on the right show the dispersion of the data. The faded colors around the curves give \pm the standard error of the mean (s.e.m.).

was stabilized (figure 5B,D) thanks to the decrease and the increase of the honeybees' speed.

In our doubly-tapered tunnel, the optic flow experienced by the bees was relatively high in comparison with that induced by other experimental conditions (bees' and wasps' learning flight [43]; bees flying along a straight tunnel [17]). However, the maximum sum of the optic flows experienced at a viewing angle of 90° by the bees in the doubly-tapered tunnel (maximum sum of either the vertical or the lateral optic flow sums: $\sim 710^\circ/s$ was similar to the value obtained

($\sim 650^\circ/s$) in another tapered tunnel by re-computing the data published in [16](figure 2). In general, the optic flow values are relatively high in the case of bees flying along a tapered tunnel and in that of bees about to land [16]. In all these cases, bees actively change their speed when performing the task. In our doubly-tapered tunnel, the decreasing section brings the bee closer to either the walls, the floor or the ceiling. These major disturbances in the optic flows are then rejected by the bees' speed control system (figure 5B, figure 5D).

Various studies have shown that flying insects tend to hold the perceived optic flows constant, and that they do so by adjusting either their distance from the nearby surfaces (the floor or nearby walls) and / or their ground speed [4], [16], [18], [20], [39]. To explain the mechanism underlying this behavior, a control system called the optic flow regulator was developed, based on a feedback loop that consistently strives to maintain the perceived optic flow at a constant level [12], [23]. This control scheme - which relies exclusively on optic flow sensors and does not require any speed sensors or range sensors - was found to account for the height control abilities of several insect species flying in open spaces devoid of lateral textures [12], [15], [23], [44], [45].

The ALIS model we recently developed [22] extends the principle of the optic flow regulator [23], [38] to include the vertical dimension. The ALIS model is minimalistic, as it does not include the large optic flow receptive fields with which insects are endowed [10], [46]. The ALIS-based simulated trajectory (figure 6) obtained in the same doubly-tapered tunnel to that used in the present experiments accounts quite well for the honeybees' vertical position and ground speed profiles observed (figure 4B and 4C, respectively). It also accounts satisfactorily for the honeybees' performance in a high-roofed tunnel equipped with a moving floor [15]. Upon arriving above the moving part of floor (which moved in the same direction as the flying insect, thus reducing the ventral optic flow), the honeybee reacted by descending, while holding the same speed it had reached above the initial, stationary part of the floor. This finding can be explained by the fact that in the straight, high-roofed tunnel, the minimum cross-section (which was always the horizontal one) remained constant throughout the tunnel, hence yielding a constant groundspeed. In those conditions, the insect was left with decreasing its groundheight so as to retrieve the optic flow set point [15]. In the present study, where the tunnel tapered successively in the vertical and horizontal planes, the minimum cross-section alternated between the horizontal and vertical sections (figure 1E). The honeybees' speed profile obtained (figure 3C, 4C) may account for the fact that (i) the speed was no longer constrained to remain constant by a constant minimum cross-section, (ii) the steady vertical positioning ("vertical centering": figure 4B, 5B) revealed that the ground speed decreased so as to maintain the larger of the two optic flow sums ("left + right" optic flows or "ventral + dorsal" optic flows) constant whether the minimum cross-section was in the horizontal or vertical plane. These new experimental findings on flying

bees are therefore fully consistent with the ALIS model [22], one outcome of which is that the groundspeed attained is proportional to the tunnel's smaller cross-section.

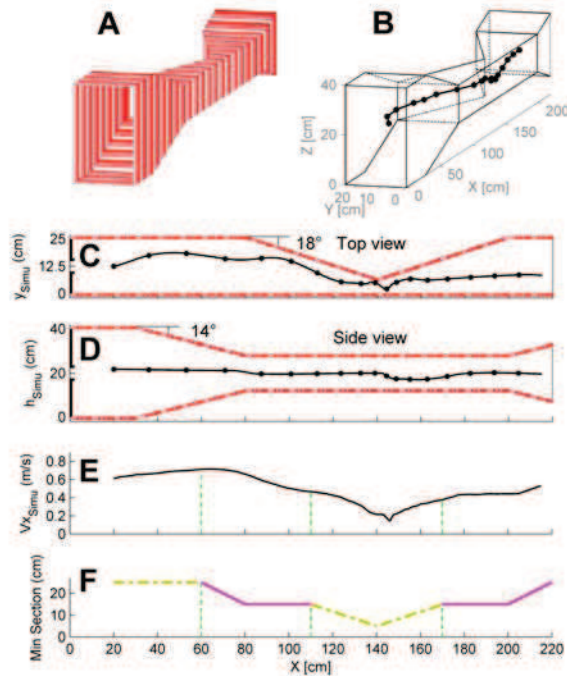


Fig. 6. Simulated performances of the minimalist ALIS model in the same doubly-tapered tunnel. (A) Perspective view of the doubly-tapered tunnel lined with red and white stripes. Two tapered zones occur in this simulated tunnel: the first one is tapered in the vertical plane (from 30 cm to 80 cm, tapering angle 14°), and the second, in the horizontal plane (from 80 cm to 200 cm, tapering angle 18°). (B) Simulated bee's 3-D trajectory starting at initial coordinates $x_0 = 0.01$ m; $y_0 = 0.135$ m; $z_0 = 0.2$ m, and at the speed $V_{x0SIMU} = 0.13$ m/s. The time markers are plotted every 250 ms. (C) Trajectory in the vertical plane (x, z). The time markers are plotted every 250 ms. (D) Trajectory in the horizontal plane (x, y). The time markers are plotted every 250 ms. (E) Ground speed V_{xSIMU} profile generated by the ALIS model based on two optic flow regulators: this profile accounts very satisfactorily for the minimum section of the doubly-tapered tunnel shown below. (F) Minimum section of the doubly-tapered tunnel along the abscissa. Due to the design of the tunnel, the minimum section was encountered alternately in the horizontal plane (dash-dotted yellow line) and the vertical plane (magenta line).

The ALIS dual optic flow regulator features two controllers (dynamic compensators) [22]: (i) a Proportional-Derivative (PD) controller in the positioning feedback loop (which is responsible for the sway and heave degrees of freedom), (ii) a Proportional-Integral (PI) controller in the speed feedback loop (which is responsible for the surge degree of freedom). But any kind of controller, including a simple proportional controller, would lead the simulated bee to adjust the ground speed proportionally to the tunnel's smaller cross-section in a similar manner, as long as it ensures dynamic stability of the feedback loop. In other words, the nature of the controller does not affect the basis

of the OF regulation scheme [22], [23].

The optic flow sensors used in the present simulation (figure 6) were based on a previously described fly-inspired "time of travel scheme" [47], [48] (see also further details in [23]). Since the optic flow sensor was implemented here to operate inside a feedback loop (the optic flow regulator) about an angular velocity constant value (the optic flow set point), there is a sole requirement with respect to the optic flow sensor: its characteristic has to be a monotonic function of the angular velocity in the range about the optic flow set-point. Various optic flow sensor schemes give a monotonic characteristic curve, including that of correlation-type motion detectors [49], [50], at least in a given range [51]. In other words, the performances resulting from the use of optic flow regulators which are the basis of the ALIS model, do not depend on how the optic flow is assessed.

Analysis of the larger of the two optic flow sums showed that their variance was lower at an angle of 45° than at 90° . This suggests that optic flow information originating from frontal regions of the visual field contributes to improving the insects flight performances, as established by [19]. To make even better use of the present findings, it is proposed in the future to develop a more sophisticated ALIS model, in which the optic flows occurring in larger fields of view, including frontal optic flows, will be regulated and therefore kept constant. Frontal optic flow information has been previously used in robot design to solve obstacle avoidance problems [47], [48], [52], ground avoidance problems [35], [36], [44], [45], and speed control problems [53], [54].

As far as insects' flight control is concerned, the optic flow regulator concept has several advantages. It makes an insect automatically select both a safe speed and a safe position in the surrounding environment without any need for onboard ground speed sensors or range sensors whatsoever. The only sensors required are optic flow sensors, the output signal of which grows with the ground speed-to-ground height ratio. This control system also provides an interesting, robust and inexpensive means of piloting an aircraft or a spacecraft, as long as there are sufficiently large numbers of photons and contrasting features in the environment [55], [56].

Optic flow processing and visuomotor control systems in insects can be expected to match the natural motion signals triggered by flight in specific environments [57]. Sensitivity to the dorsal optic flow can be said to meet ecological constraints. It enables flying honeybees to keep a safe speed while crossing complex foraging environments, where dorsally located objects abound and have to be sensed just as much as ventrally or laterally located objects. This is the case in particular whenever bees inspect dense patches of vegetation, flying under the foliage and flowers in search of nectar.

The cartoon-like tunnel experiments described here need to be extended to free 3-D space, real-life conditions and variously structured environments. Further studies are also required to test the relevance of our model in more natural environments and improve our understanding of insects flight control systems.

V. ACKNOWLEDGEMENTS

We thank J. Serres, T. Raharijaona, F. Expert and S. Viollet for their helpful comments and suggestions during this study, Y. Luparini, for building the doubly-tapered tunnel, M. Boyron for his expertise in electronics, Francois Vrignaud for taking the supplemental photograph, Serge Dini (the beekeeper) for his expertise on honeybees and J. Blanc for improving the English manuscript. We are grateful to the two anonymous Referees and the academic Editor for their suggestions, which have greatly improved the manuscript. This research was supported by CNRS (Life Science; Information and Engineering Science and Technology), Aix-Marseille University, the French Defense Agency (DGA, 05 34 022), the French Agency for Research (ANR, EVA project), the European Space Agency (ESA) under contract n° 08-6303b and the European Commission via the CURVACE project. The project CURVACE acknowledges the financial support of the Future and Emerging Technologies (FET) program within the Seventh Framework Program for Research of the European Commission, under FETOpen grant number 237940.

REFERENCES

- [1] J. S. Kennedy, "The migration of the desert locust (*Schistocerca gregaria* forsk.)," *Phil. Trans. Royal Soc. B*, vol. 235, pp. 163–290, 1951.
- [2] C. David, "The relationship between body angle and flight speed in free-flying drosophila," *Physiol Entomol*, vol. 3, pp. 191–195, 1978.
- [3] —, "Height control by free-flying drosophila," *Physiol Entomol*, vol. 7, pp. 209–216, 1979.
- [4] —, "Compensation for height in the control of ground speed by drosophila in a new 'barber's pole' wind tunnel," *J Comp Physiol A*, vol. 147, no. 4, pp. 485–493, 1982.
- [5] R. Preiss, "Set point of retinal velocity of ground images in the control of swarming flight of desert locusts," *J Comp Physiol A*, vol. 171, pp. 251–256, 1992.
- [6] W. Kirchner and M. V. Srinivasan, "Freely flying honeybees use image motion to estimate object distance," *Naturwissenschaften*, vol. 76, pp. 281–282, 1989, 10.1007/BF00368643. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1007/BF00368643>
- [7] T. Collett, H. Nallbach, and H. Wagner, *Visual stabilization in arthropods*. Elsevier, 1993, pp. 239–263.
- [8] M. V. Srinivasan and S. Zhang, "Visual motor computations in insects," *Annu Rev Neurosci*, vol. 27, pp. 679–696, 2004.
- [9] E. Buchner, *Photoreception and vision in insects*. New York London: Plenum Press, 1984, ch. Behavioral analysis of spatial vision in insects, pp. 561 – 621.
- [10] G. Taylor and H. Krapp, "Sensory systems and flight stability: What do insects measure and why?" *Advances in insect physiology*, vol. 34, pp. 231–316, 2007.
- [11] J. J. Koenderink, "Optic flow," *Vision Res*, vol. 26, no. 1, pp. 161–179, 1986.
- [12] N. Franceschini, F. Ruffier, and J. Serres, "A bio-inspired flying robot sheds light on insect piloting abilities," *Curr Biol*, vol. 17, no. 4, pp. 329–335, Feb 2007. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cub.2006.12.032>
- [13] M. V. Srinivasan, M. Lehrer, W. H. Kirchner, and S. Zhang, "Range perception through apparent image speed in freely flying honeybees," *Vis. Neurosci.*, vol. 6, pp. 519–535, 1991.
- [14] J. R. Serres, G. P. Masson, F. Ruffier, and N. Franceschini, "A bee in the corridor: centering and wall-following," *Naturwissenschaften*, vol. 95, no. 12, pp. 1181–1187, Dec 2008.
- [15] G. Portelli, F. Ruffier, and N. Franceschini, "Honeybees change their height to restore their optic flow," *J Comp Physiol A*, vol. 196, no. 4, pp. 307–313, Apr 2010. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1007/s00359-010-0510-z>
- [16] M. V. Srinivasan, S. Zhang, M. Lehrer, and T. Collett, "Honeybee navigation en route to the goal: visual flight control and odometry," *J Exp Biol*, vol. 199, pp. 237–244, 1996.
- [17] E. Baird, M. V. Srinivasan, S. Zhang, and A. Cowling, "Visual control of flight speed in honeybees," *J Exp Biol*, vol. 208, pp. 3895–3905, 2005.
- [18] S. N. Fry, N. Rohrseitz, A. D. Straw, and M. H. Dickinson, "Visual control of flight speed in drosophila melanogaster," *J Exp Biol*, vol. 212, pp. 1120–1130, 2009. [Online]. Available: <http://jeb.biologists.org/cgi/reprint/212/8/1120>
- [19] E. Baird, T. Kornfeldt, and M. Dacke, "Minimum viewing angle for visually guided ground speed control in bumblebees," *J Exp Biol*, vol. 213, no. 10, pp. 1625–1632, 2010.
- [20] E. Baird, M. V. Srinivasan, S. Zhang, R. Lamont, and A. Cowling, "Visual control of flight speed and height in honeybee," *LNAI*, vol. 4095, pp. 40–51, 2006.
- [21] A. Barron and M. V. Srinivasan, "Visual regulation of ground speed and headwind compensation in freely flying honey bees (*Apis mellifera* L.)," *J Exp Biol*, vol. 209, no. 5, p. 978, 2006.
- [22] G. Portelli, J. Serres, F. Ruffier, and N. Franceschini, "Modelling honeybee visual guidance in a 3-d environment," *J Physiol Paris*, vol. 104, no. 1-2, pp. 27–39, 2010. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jphysparis.2009.11.011>
- [23] F. Ruffier and N. Franceschini, "Optic flow regulation: the key to aircraft automatic guidance," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 50, no. 4, pp. 177 – 194, 2005, biomimetic Robotics. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V16-4F3NY1T-3/2/3ec0b2140d846adf9398f33ff0ae868b>
- [24] R. Menzel and W. Backhaus, *Vision and visual dysfunction: the perception of color*. Macmillan: London, 1991, ch. Color vision in insects, pp. 262 – 288.
- [25] L. G. Bishop, "The spectral sensitivity of motion detector units recorded in the optic lobe of the honeybee," *J Comp Physiol A*, vol. 70, pp. 374–381, 1970.
- [26] R. Menzel, "Spectral response of moving detecting and 'sustaining' fibres in the optic lobe of the bee," *J Comp Physiol A*, vol. 82, pp. 135–150, 1973, 10.1007/BF00696149. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1007/BF00696149>
- [27] W. Kaiser and E. Liske, "Die optomotorischen reaktionen von fixiert fliegenden bienen bei reizung mit spektrallichtern," *J Comp Physiol A*, vol. 89, pp. 391–408, 1974, 10.1007/BF00695355. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1007/BF00695355>
- [28] S. Zhang, W. Xiang, L. Zili, and M. V. Srinivasan, "Visual tracking of moving targets by freely flying honeybees," *Visual Neuroscience*, vol. 4, no. 04, pp. 379–386, 1990.
- [29] J. Zeil, N. Boeddeker, and J. Hemmi, "Visually guided behaviour," *New Encyclopaedia of Neuroscience, Elsevier Science Publishers, Amsterdam*, 2008.
- [30] R. Hengstenberg, "Mechanosensory control of compensatory head roll during flight in the blowfly *Calliphora erythrocephala* meig.," *J Comp Physiol A*, vol. 163, pp. 151–165, 1988.
- [31] —, "Control of head pitch in drosophila during rest and flight," in *Proceedings of Rhythmogenesis in Neurons and Networks, Proceedings of the 20th Göttingen Neurobiology Conference*, N. Elsner and D. Richter, Eds. G. Thieme Verlag, Stuttgart, 1992, p. 305.
- [32] C. Schilstra and J. van Hateren, "Blowfly flight and optic flow. 1. thorax kinematics and flight dynamics," *J Exp Biol*, vol. 202, pp. 148 –1490, 1999.
- [33] J. Hateren and C. Schilstra, "Blowfly flight and optic flow. ii. head movements during flight," *J Exp Biol*, vol. 202, no. 11, p. 1491, 1999.
- [34] R. Hengstenberg, "Pitch control of head posture in walking and flying drosophila," in *Proceeding of Invertebrate Vision Conference*, E. Warrant, D. Nilsson, and A. Gislén, Eds. Lund University, 2001, p. 224.
- [35] A. Beyeler, J. C. Zufferey, and D. Floreano, "optipilot: control of take-off and landing using optic flow," in *European Micro Aerial Vehicle Conference, EMAV09, Delft, Netherlands*, 14–17 September 2009. [Online]. Available: <http://infoscience.epfl.ch/record/140575>
- [36] F. Ruffier and N. Franceschini, "Aerial robot piloted in steep relief by optic flow sensors," in *Proceedings of the 2008 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS 2008) (ISCAS 2008)*, 2008.
- [37] J. H. Zar, *Biostatistical Analysis - fifth edition*, Inc., Ed. Prentice-Hall, 1999.

- [38] J. Serres, D. Dray, F. Ruffier, and N. Franceschini, "A vision-based autopilot for a miniature air vehicle: joint speed control and lateral obstacle avoidance," *Autonomous Robots*, vol. 25, pp. 103–122, 2008.
- [39] L. Kuenen and T. Baker, "Optomotor regulation of ground velocity in moths during flight to sex pheromone at different heights," *Physiological Entomology*, vol. 7, no. 2, pp. 193–202, 1982.
- [40] H. Fadamiro, T. Wyatt, and M. Birch, "Flying beetles respond as moths predict: Optomotor anemotaxis to pheromone plumes at different heights," *J Insect Behavior*, vol. 11, no. 4, pp. 549–557, 1998.
- [41] N. Boeddeker and J. M. Hemmi, "Visual gaze control during peering flight manoeuvres in honeybees," *Proc R Soc of London B*, vol. 277, pp. 1209–17, 2010. [Online]. Available: <http://www.biomedsearch.com/nih/Visual-gaze-control-during-peering/20007175.html>
- [42] E. Baird, "Visual flight control in the honeybee." Ph.D. dissertation, The Australian National University, 2007.
- [43] J. Zeil, A. Kelber, and R. Voss, "Structure and function of learning flights in ground-nesting bees and wasps," *J Exp Biol*, vol. 199, no. 1, pp. 245–252, 1996.
- [44] T. Netter and N. Franceschini, "A robotic aircraft that follows terrain using a neuromorphic eye," in *Proc. of IEEE Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Lausanne, Switzerland: Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, Vol. 195, 2002, pp. 129–134.
- [45] F. Ruffier and N. Franceschini, "Octave, a bioinspired visuo-motor control system for the guidance of micro-air vehicles," in *Bioengineered and Bioinspired Systems*, A. Rodriguez-Vazquez, D. Abbott, R. Carmona, Eds. Bellingham, U.S.A: SPIE Vol. 5119, 2003, pp. 1–12.
- [46] H. Krapp, B. Hengstenberg, and R. Hengstenberg, "Dendritic structure and receptive-field organisation of optic flow processing interneurons in the fly," *J of Neurophysiol*, vol. 79, pp. 1902–1917, 1998.
- [47] J.-M. Pichon, C. Blanes, and N. Franceschini, "Visual guidance of a mobile robot equipped with a network of self-motion sensors," in *Proc. of SPIE Conf. on Mobile Robots IV*, W.J. Wolfe and W.H. Chun, Eds., vol. 1195. Bellingham, U.S.A: SPIE, 1989, pp. 44–53.
- [48] N. Franceschini, J. M. Pichon, and C. Blanes, "From insect vision to robot vision," *Phil Trans R Soc Lond B*, vol. 337, pp. 283–294, 1992.
- [49] W. Reichardt, "Autokorrelations-auswertung als funktionsprinzip des zentralnervensystems," *Zeitsch Naturforsch A*, vol. 12, p. 756, 1957.
- [50] —, *Processing of Optical Data by Organisms and by Machines*. New York: Academic Press, 1969, ch. Movement perception in insects, pp. 465–493.
- [51] R. S. A. Brinkworth and D. C. O'Carroll, "Robust models for optic flow coding in natural scenes inspired by insect biology," *PLoS Computational Biology*, vol. 5, p. e1000555, 2009. [Online]. Available: <http://www.ploscompbiol.org/article/info:doi/10.1371/journal.pcbi.1000555>
- [52] J. Conroy, G. Gremillion, B. Ranganathan, and J. Humbert, "Implementation of wide-field integration of optic flow for autonomous quadrotor navigation," *Autonomous Robots*, vol. 27, pp. 189–198, 2009, 10.1007/s10514-009-9140-0. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1007/s10514-009-9140-0>
- [53] N. Martin and N. Franceschini, *Intelligent Vehicles*. MIT Press, Cambridge, U.S.A., 1994, ch. Obstacle avoidance and speed control in a mobile vehicle equipped with a compound eye., pp. 381–386.
- [54] J. Santos-Victor, G. Sandini, F. Curotto, and S. Garibaldi, "Divergent stereo in autonomous navigation: From bees to robots," *International Journal of Computer Vision*, vol. 14, pp. 159–177, 1995, 10.1007/BF01418981. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1007/BF01418981>
- [55] N. Franceschini, "Towards automatic visual guidance of aerospace vehicles: from insects to robots," *Acta Futura*, vol. 3, pp. 15–34, 2009.
- [56] F. Valette, F. Ruffier, S. Viollet, and T. Seidl, "Biomimetic optic flow sensing applied to a lunar landing scenario," in *Proceedings of IEEE international conference on robotics and automation ICRA*, Anchorage, AK, USA, 2010.
- [57] M. Eckert and J. Zeil, *Motion vision: computational, neural, and ecological constraints*. Berlin: Springer Verlag, 2001, ch. Toward an ecology of motion vision, pp. 333–369.

Résumé

On trouve dans la littérature plusieurs études qui traitent du contrôle de la vitesse chez l'abeille [Srinivasan et al., 1996, Baird et al., 2005, 2006, Barron and Srinivasan, 2006]. Mais ces dernières traitent uniquement du plan horizontal. La réalisation d'un pilote automatique qui permet de contrôler le vol dans les trois dimensions de l'espace ne peut se borner à la seule étude du plan horizontal. Nous avons vu dans les chapitres 1 et 2 de cette thèse l'implémentation du pilote automatique LORA (figure 3.4, [Serres et al., 2008a]) qui permet d'expliquer le contrôle de la position latérale et de la vitesse chez l'abeille. L'élaboration d'un pilote automatique dans les trois dimensions de l'espace, nécessite de traiter le plan vertical. De ce fait, l'extension de l'hypothèse de la *régulation du flux optique latéral* au plan vertical a pu donner naissance au pilote automatique ALIS [Portelli et al., 2008, 2010b]. Ce dernier permet d'établir l'hypothèse que le contrôle de la vitesse pourrait être piloté par un régulateur de flux optique ayant pour unique but de maintenir à une valeur constante la plus grande des sommes des flux optique dans les directions horizontales (gauche et droite) et verticales (ventral et dorsal). Ainsi, la double régulation du flux optique (boucle d'avance et latérale) permet de faire apparaître une relation de proportionnalité entre la vitesse et la largeur du tunnel. Cette dépendance, à travers la régulation du flux optique, entraîne que la vitesse est d'autant plus faible que le tunnel est étroit aussi bien dans le plan horizontal que vertical. Le pilote automatique ALIS permet alors de lier le contrôle de la vitesse d'avance avec la plus petite section du tunnel.

Dans ce chapitre, nous avons entraîné des abeilles à voler dans un tunnel comportant deux fuselages successifs : le premier dans le plan horizontal (figure 5.1A) et le second dans le plan vertical (figure 5.1B). Ce tunnel va ainsi perturber les insectes par une perturbation non constante de flux optique dans l'ensemble de leur champ visuel, aussi bien dans les zones latérales que dans les zones ventrales et dorsales. Si l'abeille est bien équipé par une stratégie du contrôle du vol de type ALIS, elle devrait contrôler sa vitesse d'avance de manière à la conserver proportionnelle à la plus petite section du tunnel. Les résultats obtenus sont sans équivoques et montrent qu'en moyenne les abeilles ralentissent, en moyenne, à l'approche du rétrécissement horizontal, mais aussi du rétrécissement vertical (figure 5.1C).

Afin de bien comprendre ce qu'il en ressort, il est important de bien saisir chaque étape du vol de l'insecte. A l'entrée, la section horizontale est inférieure à la section verticale. Cette dernière devient de plus en plus étroite jusqu'à ce qu'elle devienne inférieure à la section horizontale ($X \sim 55 \text{ cm}$). Les abeilles diminuent, en moyenne, leur vitesse d'avance à partir de cet instant (figure 5.1C). La section horizontale va

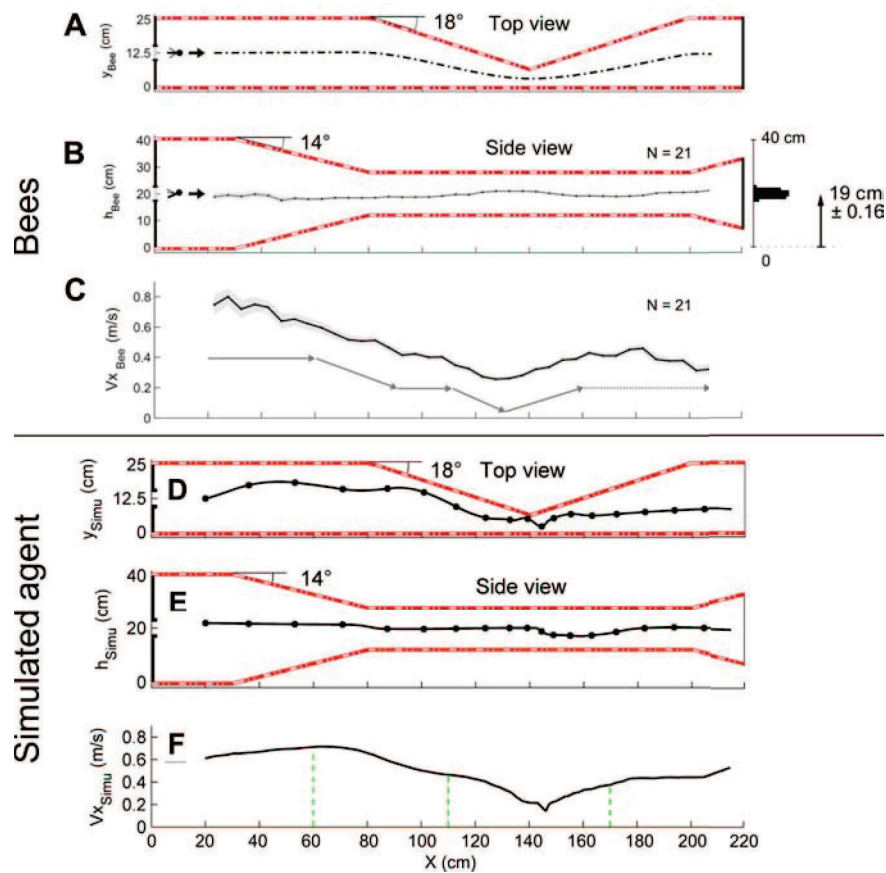


FIGURE 5.1 – (A-C) Trajectoire 3-D et vitesse moyenne (marqueur temporel : 100 ms) issue de la navigation de 21 abeilles dans un tunnel double fuselé, présentant d’abord un fuselage dans le plan vertical (angle : 14°) puis dans le plan horizontal (angle : 18°). La trajectoire dans le plan horizontal (A) n’est qu’une trajectoire présumée tandis que celle dans le plan verticale a été obtenue en traitant les vidéos des trajectoire avec un programme Matlab. Les abeilles entraient centrées à la fois dans le plan horizontal ($y_{Bee} = 12.5\text{ cm}$) et dans le plan verticale ($h_{Bee} = 20\text{ cm}$) du tunnel et adoptent, en moyenne, une trajectoire centrée dans le tunnel (hauteur moyenne : $19 \pm 0.16\text{ cm}$). Les flèches (C) indiquent le profil de vitesse des 21 abeilles dans le tunnel et montrent que celles-ci ralentissent une première fois en traversant la première constriction (plan vertical), ralentissent une seconde fois en traversant la seconde constriction et accélèrent de nouveau lorsque le tunnel s’élargit. (D-F) Trajectoire 3-D d’une abeille simulée obtenue grâce à une simulation sous Matlab/Simulink© du pilote automatique ALIS. Les conditions initiales de l’abeille simulée sont $x_0 = 0.1\text{ m}$, $y_0 = 0.135\text{ m}$, $z_0 = 0.2\text{ m}$ et $V_{x0} = 0.13\text{ m.s}^{-1}$. La trajectoire obtenue dans le plan verticale est très similaire à celle obtenue avec le vol des abeilles réel. (F) Le profil de vitesse obtenu avec le modèle ALIS est également très similaire au profil de vitesse moyen obtenu avec les trajectoires d’abeille.

elle aussi rétrécir jusqu'à devenir inférieure à la section verticale, les abeilles modifient de nouveau leur vitesse d'avance (figure 5.1C). Il semble en effet que l'abeille modifie à tout instant sa vitesse en fonction de la section minimale du tunnel et non en présence de rétrécissements. Un point très important est de constater que le profil de la vitesse d'avance des abeilles coïncide avec le profil de la section minimale du tunnel (figure 5.1C).

Une variation de la section minimale du tunnel entraîne une perturbation non constante de flux optique et donc dans les sommes des flux optiques du plan horizontal (somme des flux optiques gauche et droit) et vertical (somme des flux optiques de la région ventrale et dorsal). Ainsi, une section plus petite dans le plan horizontal entraîne une somme des flux optique latéraux (gauche et droit) plus importante que celle du plan vertical (ventral et dorsal), et réciproquement. Ainsi une étude de la somme des flux optique correspondant à la section minimale est maintenue constante, à un niveau préférée. Si tel n'était pas le cas et que l'abeille n'ajustait pas sa vitesse avec la section minimale du tunnel en maintenant la plus importante des sommes à un niveau constant, cette dernière varierait de manière beaucoup plus importante. Les travaux de Srinivasan et al. [1996] ont permis de montrer qu'en volant dans un tunnel fuselé, l'abeille ralentit lorsque les parois convergent et accélèrent lorsqu'elles divergent. Ils ont alors émis l'hypothèse qu'elles maintiennent un flux optique global à un niveau constant. Le travail présenté dans ce chapitre étend cette hypothèse au plan vertical et montre que la région ventrale mais aussi dorsale intervient dans le contrôle de la vitesse chez l'abeille.

Un modèle de simulation (Matlab/Simulink[®]) d'une abeille artificielle dotée de quatre capteurs de flux optique de deux pixels, basés sur le principe du « temps de passage » [Pichon et al., 1989, Franceschini et al., 1992], et d'un contrôle sensorimoteur basé sur le pilote automatique ALIS [Portelli et al., 2008, 2010b], a permis d'obtenir, pour des conditions initiales identiques aux expérimentations réelles, la trajectoire tri-dimensionnelle simulée du vol dans le tunnel double fuselé (figure 5.1D-E). Il est alors intéressant de constater comme la trajectoire simulée dans le plan vertical et celle obtenue par la moyenne des trajectoires de 21 agents sont similaires (figure 5.1B&E). De manière similaire à la réalité (figure 5.1C), l'abeille simulé ralentit au franchissement de la première constriction ($X = 60 \text{ cm}$) correspondant au rétrécissement vertical des parois puis à celle de la deuxième constriction ($X = 110 \text{ cm}$) correspondant au rétrécissement horizontal des parois (figure 5.1F). La régulation de la plus grande somme des flux optique dans le plan horizontal et vertical constitue alors une hypothèse sérieuse permettant d'illustrer le contrôle de la vitesse de vol de l'abeille dans un tunnel. Même si ces expérimentations ne concernent que le contrôle

de vitesse, il aurait été intéressant de pouvoir confronter les trajectoires réelles et simulées du plan horizontal. À l'avenir, ajouter une caméra qui filmerait le plan horizontal et qui serait synchronisée à celle filmant le plan vertical, serait un point d'amélioration notable pour les futures expériences éthologiques.

Chapitre 6

Discussion

Les insectes ailés fascinent par leurs extraordinaires prouesses de navigation dans les trois dimensions de l'espace. La navigation autonome d'un micro-aéronef (envergure $< 15\text{ cm}$, masse $< 100\text{ g}$), en termes de contrôle de vitesse et d'évitement d'obstacles en environnement inconnu, reste à ce jour une problématique encore non-résolue. L'approche conventionnelle visant à embarquer des capteurs coûteux en énergie, en masse et en ressources calculatoires, est encore aujourd'hui peu compatible avec ce type de robot.

Nous avons étudié, dans cette thèse, une approche bio-inspirée, via un modèle d'étude du contrôle sensorimoteur chez l'abeille intervenant sur le plan horizontal [Serres et al., 2008a], qui vise à automatiser le guidage d'un micro-robot sur la base des observations comportementales menées chez cet insecte. Des résultats comportementaux chez l'abeille obtenus dans d'autres laboratoires [Kirchner and Srinivasan, 1989, Srinivasan et al., 1991, 1996] et dans notre laboratoire [Serres et al., 2008b] fusionnés avec le principe de la régulation du flux optique [Ruffier and Franceschini, 2005, Franceschini et al., 2007], nous ont alors permis de réunir en un unique schéma fonctionnel explicite [Serres et al., 2008a] les systèmes de contrôle :

- de la position latérale,
- de la vitesse de l'insecte caractérisant son vol sur le plan horizontal.

Une étude en simulation de ce modèle de navigation mis en œuvre sur un aéroglisseur *totalelement actionné* [Serres et al., 2008a] a permis d'en montrer sa pertinence dans le contrôle du vol et de la position en environnement inconnu ainsi que sa robustesse face aux perturbations susceptibles de l'affecter. L'étape de mise en œuvre robotique sur un démonstrateur réel, constituant l'essence de ce travail de thèse, devient alors une étape fondamentale car elle permet de confronter le modèle simulé aux données

réelles, d'aller au-delà du modèle, de confirmer la plausibilité du principe et surtout d'embarquer un pilote automatique, tel que la double régulation du flux optique, sur un mini-robot autonome. Comme toute mise en œuvre robotique, un travail préliminaire de fiabilisation de la plateforme robotique dans sa conception électronique et son identification dynamique ont précédé sa mise en œuvre. Le robot aéroglisseur constitue dès lors, sur la base d'un système visuel de quatre à huit pixels, une solution totalement autonome de navigation en environnement inconnu, en termes de contrôle de vitesse et d'évitement d'obstacles latéraux, puisqu'il embarque à son bord ses capteurs de flux optique, son énergie, son moyen de communication sans fil et son pilote automatique. Les expérimentations réelles viennent ainsi concrétiser l'élaboration du modèle et faire un retour sur la biologie afin d'en confirmer la pertinence face aux observations faites chez l'abeille, dans le but de comprendre le traitement de l'information visuelle susceptible d'être mis en jeu au sein du système nerveux du contrôle sensorimoteur de l'insecte.

Nous verrons dans cette discussion, étape par étape à travers la figure 6.1, la fidélité des comportements observés chez l'abeille face aux comportements engendrés par le robot testé dans des conditions similaires à celles faites chez l'insecte.

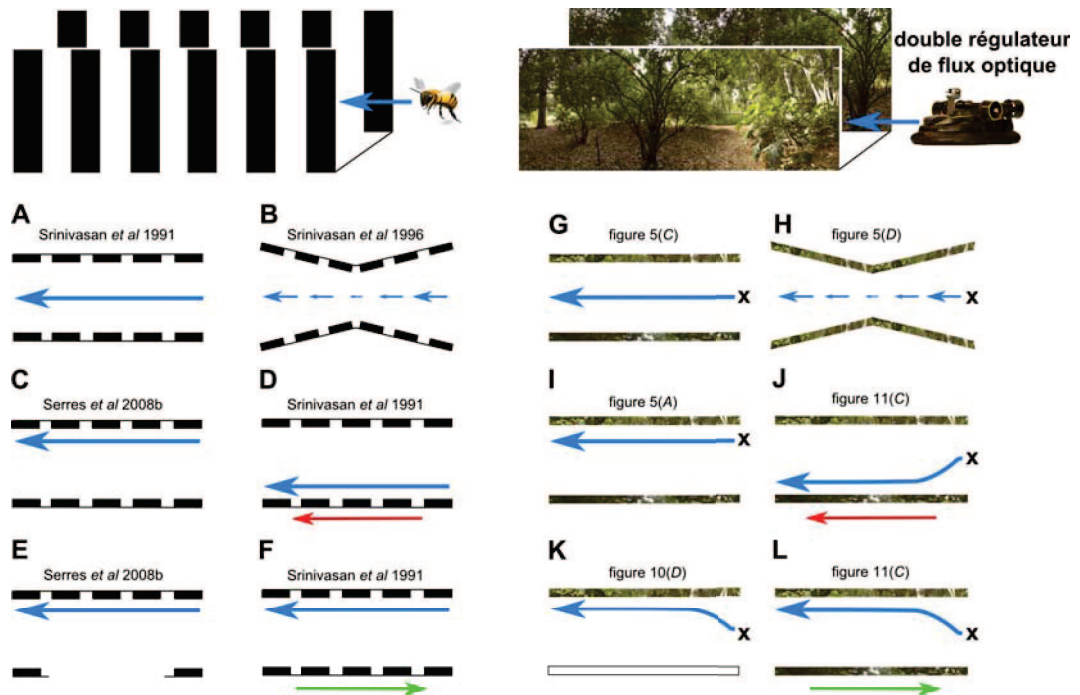


FIGURE 6.1 – Similitudes comportementales observées entre le contrôle du vol sur le plan horizontal chez l’abeille (A-F) et l’aéroglesseur miniature équipé du double régulateur de flux optique et d’un système visuel de quatre à huit pixels (G-L). Les flèches bleues indiquent la direction principale prise par l’agent dans le tunnel. Les flèches rouges et verte indiquent la direction de déplacement du mur dans un tunnel non-stationnaire.

I Similitudes comportementales entre le robot LORA et l'abeille

I.A Comportement de centrage

Plusieurs travaux font état d'un comportement de centrage des abeilles naviguant dans un tunnel étroit [Kirchner and Srinivasan, 1989, Srinivasan et al., 1991]. Ces chercheurs ont entraîné des abeilles à traverser un tunnel étroit de largeur $D = 12 \text{ cm}$ et ont observé qu'elles adoptaient systématiquement un comportement de *centrage* avec une vitesse moyenne constante ($V_f = 0.38 \text{ m.s}^{-1}$) (figure 6.1A). Les auteurs ont alors déduit, de la trajectoire des abeilles, les flux optiques latéraux générés par son mouvement et ont remarqué que ces flux optiques latéraux moyens (de l'ordre de $360 \text{ }^\circ.\text{s}^{-1}$) étaient minimaux le long de la ligne médiane [Srinivasan et al., 1991]. D'autres travaux font également état de ce comportement de centrage dans des tunnels droits de largeur différente ($D = 22 \text{ cm}$ et $D = 32 \text{ cm}$) [Baird et al., 2005] et ($D = 95 \text{ cm}$) [Serres et al., 2008b].

Sur un plan théorique, une abeille « artificielle » équipée du pilote automatique LORA traversant un même tunnel étroit adopterait un comportement de centrage pour une consigne de flux optique unilatérale respectant $\omega_{setSide} \leq \frac{\omega_{setFwd}}{2}$ [Serres et al., 2008a]. Afin d'illustrer ce comportement sur un démonstrateur robotique, nous avons placé notre robot aéroglesseur miniature contrôlé par LORA dans un tunnel droit d'une longueur de 4 m et d'une largeur de 92 cm (figure 6.2A). Le robot part de plusieurs positions initiales avec comme consignes de flux optique¹ $\omega_{setFwd} = 250 \text{ }^\circ.\text{s}^{-1}$ et $\omega_{setSide} = 125 \text{ }^\circ.\text{s}^{-1}$. Pour chaque position initiale, le robot opère un comportement de centrage, tout en maintenant une vitesse d'avance V_f constante en régime permanent. On peut également observer sur une des trajectoires (trajectoire noire, figure 6.2C), un phénomène d'oscillation, commun aux trajectoires obtenues chez les abeilles, dans le contrôle de la position. Le robot semble rejeter alternativement et automatiquement un mur puis l'autre pour se placer le long de la ligne médiane du tunnel (figure 6.1G).

Dans notre modèle, la sélection du mur le plus proche s'effectue par le critère maximum (fonction *max*, figure 3.4C page 103) et le signe de la contre-réaction donne la direction à prendre au robot vers le mur le plus proche (fonction *signe*, figure 3.4C). Le comportement de centrage est une oscillation le long de la ligne médiane du tunnel :

¹Les consignes de flux optique (ω_{setFwd} et $\omega_{setSide}$) ont été choisies ici, comme dans les autres expérimentations, plus faibles que celles observées chez l'abeille afin de s'assurer un régime permanent à mi-parcours pour tenir compte des dynamiques lentes du robot.

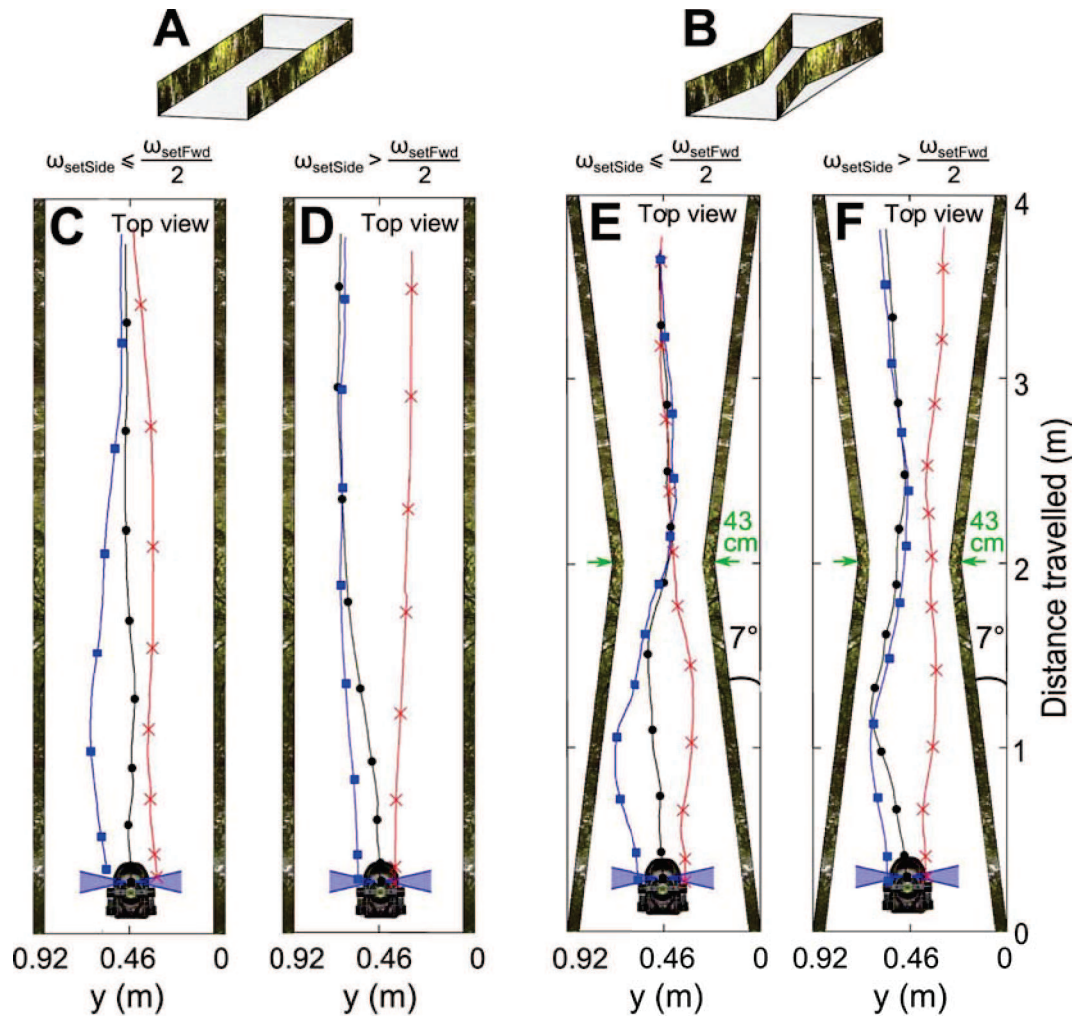


FIGURE 6.2 – Comportements de centrage et de suivi de paroi du robot LORA dans un tunnel droit et fuselé. Le changement de comportement dépend uniquement des consignes de flux optique du double régulateur de flux optique ω_{setFwd} et $\omega_{setSide}$. Dans les deux types de comportements obtenus, $\omega_{setFwd} = 250^\circ.s^{-1}$ alors que $\omega_{setSide} = 125^\circ.s^{-1}$ pour la réaction de centrage (C, E) et $\omega_{setSide} = 160^\circ.s^{-1}$ pour le suivi de paroi (D, F).

il s'agit d'un suivi de paroi alterné des murs droit et gauche, conséquence des valeurs des consignes de flux optique $\omega_{setSide}$ et ω_{setFwd} [Serres et al., 2008a]. Les observations sur les abeilles de Srinivasan et ses collaborateurs [Kirchner and Srinivasan, 1989, Srinivasan et al., 1991] s'expliqueraient par le fait que les flux optiques latéraux droit et gauche (ω_R^{fused} et ω_L^{fused} pour notre robot, figure 3.4) ne parviennent pas à annuler l'erreur ϵ_{Side} de la boucle de contrôle latérale entraînant un phénomène d'oscillations de la position de l'abeille autour de la ligne médiane du tunnel où le flux optique généré est minimal [Kirchner and Srinivasan, 1989, Srinivasan et al., 1991]. Ce phénomène ne peut s'obtenir qu'à la condition $\omega_{setSide} < \frac{\omega_{setFwd}}{2}$ [Serres et al., 2008a] et serait d'autant plus prononcée que $\omega_{setSide}$ serait petit devant $\frac{\omega_{setFwd}}{2}$.

I.B Comportement de suivi de paroi



FIGURE 6.3 – Chronophotographies du robot LORA effectuant un suivi de paroi dans un tunnel droit (intervalle de temps : 1.12 s), fuselé (intervalle de temps : 1.83 s) ou présentant un virage (intervalle de temps : 2 s). Les trajectoires ont été obtenues avec le couple de consignes de flux optique $\omega_{setFwd} = 190^\circ \cdot s^{-1}$ et $\omega_{setSide} = 125^\circ \cdot s^{-1}$.

Les observations de suivi de paroi chez les abeilles faites par Serres et al. [2008b] dans un tunnel droit ont laissé place à l'hypothèse que l'abeille sélectionne le flux optique latéral le plus élevé, généré par l'obstacle le plus proche, en ne tenant alors pas compte du flux optique le plus faible dans le contrôle de sa position [Serres et al., 2008a].

La sélection de l'un de ces flux optiques s'opère par un critère maximum (fonction

max, figure 3.4C page 103), le signe de la contre-réaction dépend tout simplement du mur à suivre (fonction *signe*, figure 3.4C). La valeur du flux optique unilatérale maintenue constante lors d'un suivi de mur correspond à la valeur de la consigne $\omega_{setSide}$ reliant à la fois la vitesse d'avance V_f et la distance au mur suivi $D_{R,L}$ [Serres et al., 2008b] tel que :

$$\omega_{setSide} = \frac{V_f}{D_{R,L}} \quad (6.1)$$

La mise en œuvre robotique du pilote automatique LORA sur l'aéroglesseur miniature a permis d'éprouver ce comportement de suivi de paroi dans diverses configurations d'environnement allant du tunnel droit (figures 6.1C & 6.2D) au tunnel fuselé (e.g., figure 6.2F) en passant par un tunnel présentant un virage (figures 6.3). Les résultats présentés dans les chapitres 2 et 3 montrent que pour un couple de consignes $\omega_{setSide}$ et ω_{setFwd} respectant $\omega_{setSide} > \frac{\omega_{setFwd}}{2}$ le robot est capable, même avec un système visuel de résolution grossière (quatre ou huit pixels), de suivre la paroi la plus proche à une distance de sécurité qui dépend de la largeur locale du tunnel D comme observé chez l'abeille [Serres et al., 2008b].

La régulation unilatérale du flux optique suivant le plus grand des flux optiques mesurés est responsable de ce comportement « réflexe » du suivi du mur le plus proche (figure 3.13F).

I.C Réaction automatique à une perturbation en échelon de flux optique dans un tunnel non-stationnaire

Après avoir étudié la réaction de centrage des abeilles dans un tunnel étroit stationnaire, l'équipe australienne de Srinivasan a fait naviguer les abeilles dans un tunnel étroit non-stationnaire dont le but est d'observer l'influence d'une modification de la vitesse apparente de défilement d'un des murs sur leur vol [Kirchner and Srinivasan, 1989, Srinivasan et al., 1991].

Ainsi, après une procédure d'entraînement des abeilles à se centrer dans un tunnel stationnaire, ces chercheurs ont observé que lorsqu'elles entrent subitement dans un tunnel étroit non-stationnaire, les abeilles se décentrent de la ligne médiane du tunnel en se rapprochant (figure 6.1D) ou en s'écartant (figure 6.1F) du mur en mouvement suivant son sens de défilement [Kirchner and Srinivasan, 1989, Srinivasan et al., 1991]. À partir des paramètres de vol, ils ont alors déduit que le flux optique d'un mur stationnaire était compris entre $135 \text{ }^\circ.s^{-1}$ et $340 \text{ }^\circ.s^{-1}$ [Srinivasan et al., 1991]. Dans le cas du tunnel non-stationnaire, celui-ci était de $105 \text{ }^\circ.s^{-1}$ lorsque le mur se déplace dans le sens d'avance de l'abeille ($V_p = 27.5 \text{ cm}.s^{-1}$) et de $325 \text{ }^\circ.s^{-1}$ dans le cas

contraire ($V_p = -27.5 \text{ cm.s}^{-1}$) [Srinivasan et al., 1991].

La mise en mouvement d'un des murs du tunnel dans le sens d'avance ou le sens contraire d'avance du vol d'une abeille vient modifier la vitesse de défilement « perçue » de ce mur en générant une perturbation ω_p en échelon de flux optique ($\omega_p = -\frac{V_p}{D_{R,L}}$) [Serres et al., 2008a].

Dans le cadre du pilote automatique LORA, cette perturbation affecte le flux optique perçu unilatéralement et perturbe à la fois la boucle d'avance et la boucle de position latérale du pilote automatique qui rejettent ce type de perturbation (voir Annexes II.A & II.B) en intervenant conjointement sur le contrôle de la vitesse et de la position latérale dans le tunnel, modifiant dès lors l'état final du système [Serres et al., 2008a] :

$$V_{f\infty} = \frac{\omega_{setSide} \cdot (\omega_{setFwd} - \omega_{setSide})}{\omega_{setFwd}} \cdot D + \frac{\omega_{setFwd} - \omega_{setSide}}{\omega_{setFwd}} \cdot V_p \quad (6.2)$$

$$y_\infty = \frac{\omega_{setFwd} - \omega_{setSide}}{\omega_{setFwd}} \cdot D - \frac{1}{\omega_{setFwd}} \cdot V_p \quad (6.3)$$

Lors de notre expérience robotique dans un tunnel non-stationnaire, le micro-robot a reflété la réaction attendue par le modèle [Serres et al., 2008a] (figure 6.4C) et observée chez l'insecte [Kirchner and Srinivasan, 1989, Srinivasan et al., 1991]. En effet, dans le cas d'un défilement du mur dans le sens contraire d'avance du robot ($V_p = -0.3 \text{ m.s}^{-1}$) générant une perturbation de flux optique élevée ($55^\circ.\text{s}^{-1}$), le robot s'éloigne du mur en mouvement tout en diminuant sa vitesse. Interprété comme un « danger » où une vitesse de défilement signifie une proximité plus grande avec la paroi, la boucle de contrôle latérale compense la perturbation en éloignant le robot du mur (figures 6.1M&6.4A, courbe verte) et en le freinant. Dans le cas contraire ($V_p = 0.3 \text{ m.s}^{-1}$), le robot se rapproche du mur en mouvement tout en accélérant (figures 6.1J&6.4A, courbe rouge) afin de compenser la chute du flux optique unilatéral ($-55^\circ.\text{s}^{-1}$).

Ces observations rejoignent les comportements observés chez l'abeille par Kirchner et Srinivasan [Kirchner and Srinivasan, 1989, Srinivasan et al., 1991, Portelli et al., 2010a], mais aussi par des recherches menées plus récemment [Baird et al., 2005, Portelli et al., 2010a] qui mettent en exergue des résultats similaires.

I.D Réaction automatique à une absence de texture ou une « ouverture »

Kirchner et Srinivasan ont testé le contrôle sensorimoteur de l'abeille en les entraînant à traverser un tunnel étroit stationnaire ($D = 12 \text{ cm}$) dont l'un des murs était tapissé d'une teinte grise homogène (contraste de Michelson $m < 0.05$) [Kirchner and

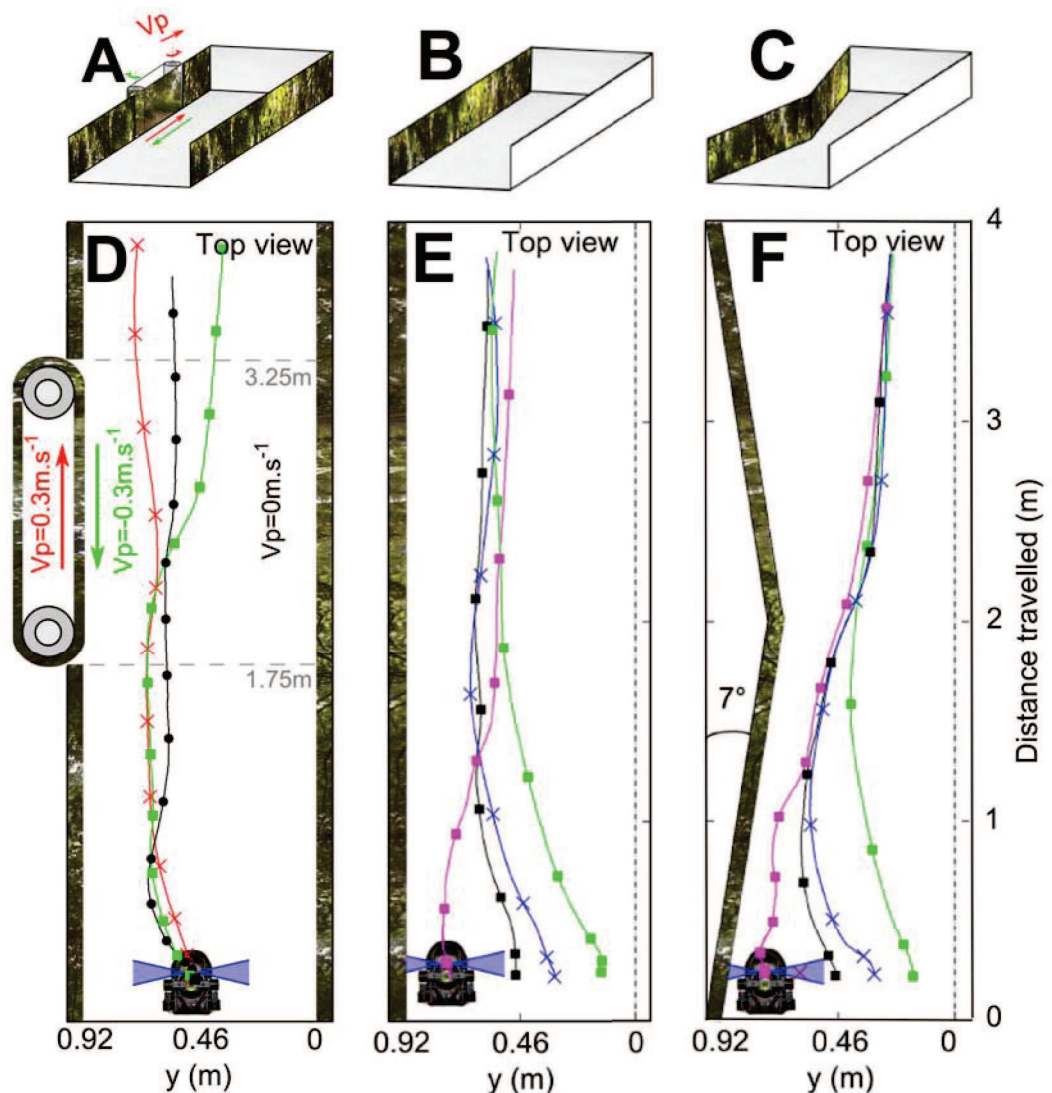


FIGURE 6.4 – Navigation de l'aéroglesseur miniature dans plusieurs configurations de tunnel incluant une absence de texture dans un tunnel droit (A) et un tunnel fuselé (B) puis la navigation du robot dans un tunnel non-stationnaire (C). En dépit de l'absence d'indices visuels provenant de la paroi non-texturée, l'aéroglesseur miniature parvient à effectuer un suivi de la paroi texturée (D) dans le tunnel droit et à esquiver la paroi texturée dans le tunnel fuselé (E) sans pour autant se « jeter » dans l'ouverture. Le contrôleur d'avance, qui repose sur une régulation bilatérale du flux optique, est perturbé par l'absence de texture dans le champ visuel droit du robot et le fait accélérer de manière à annuler l'erreur ϵ_{Fwd} faisant s'éloigner, en conséquence, ce dernier de la paroi texturée. (F) Dans le cas du tunnel non-stationnaire, le pilote automatique LORA réagit à la perturbation en échelon de flux optique, induite par le mur en mouvement, en faisant s'éloigner ou se rapprocher le robot de la paroi en mouvement, comme c'est le cas chez l'insecte ailé.

Srinivasan, 1989, Srinivasan et al., 1991].

Les auteurs ont alors observé que les abeilles se décentrent systématiquement de la ligne médiane du tunnel en direction du mur dépourvu de contrastes, une conséquence selon eux du mauvais rapport signal-sur-bruit des photorécepteurs du système visuel des abeilles mis en cause par le mur uniformément texturé [Kirchner and Srinivasan, 1989, Srinivasan et al., 1991].

Cependant, de plus récentes expérimentations ont mis en avant d'autres résultats. En effet, de façon complémentaire aux observations de l'équipe de Srinivasan, Serres et al. [2008b] ont observé que lorsque les abeilles opèrent un suivi de paroi dans un tunnel près de dix fois plus large ($D = 95 \text{ cm}$), les abeilles ne sont pas perturbées par l'absence d'un pan du mur opposé (générant de fait un flux optique quasi-négligeable $4 \pm 1 \text{ }^\circ \cdot \text{s}^{-1}$) et opèrent tout de même un comportement de suivi de mur à une distance et une vitesse d'avance équivalente qu'en présence des deux murs (figure 6.1C&E) [Serres et al., 2008b]. De plus, ces abeilles sortent par l'ouverture lorsque le pan de mur qu'elles ont été entraînées à suivre disparaît. Ces deux observations montrent que l'abeille est capable d'utiliser les indices visuelles de la paroi latérale la plus proche pour la suivre et accéder à la récompense.

Ces dernières observations sont cruciales et renforcent l'idée d'une régulation *unilatérale* du flux optique basée sur un critère sélectionnant le plus grand des flux optiques latéraux, à savoir le critère *maximum* (figure 3.4B page 103) [Serres et al., 2008b].

Lors de notre expérimentation robotique, nous avons fait naviguer notre micro-robot dans trois configurations différentes de tunnels de quatre mètres de long incluant un tunnel droit et deux tunnels fuselés (angles de fuselage : 7° et 14°) où uniquement la paroi gauche est texturée. La paroi droite ne présente aucun relief et est tapissée d'une teinte blanche homogène rendant impossible une quelconque mesure du flux optique provenant du capteur positionné à -90° (voir figure 6.5E). Une absence de mesure provenant de cette direction est similaire à une « ouverture ». Seule la paire de pixels du capteur de flux optique opposé, positionné à $+90^\circ$ (direction du mur contrasté) est en mesure de fournir une mesure du flux optique.

Les trajectoires montrent que le micro-robot est en mesure d'effectuer un suivi de paroi dans le cas du tunnel droit (figures 6.4E, 6.5, 6.6A), comme observé chez l'abeille [Serres et al., 2008b], mais aussi de rejeter le relief du mur gauche dans le cas des tunnels fuselés (figures 6.4F, 6.6B&C). En dépit de l'absence d'indices visuels en direction du mur dépourvu de texture, le robot parvient tout de même à « accrocher » le mur texturé et à le suivre sans se « jeter » dans l'ouverture, comme cela aurait été le cas s'il avait tenté d'équilibrer ses flux optiques latéraux.

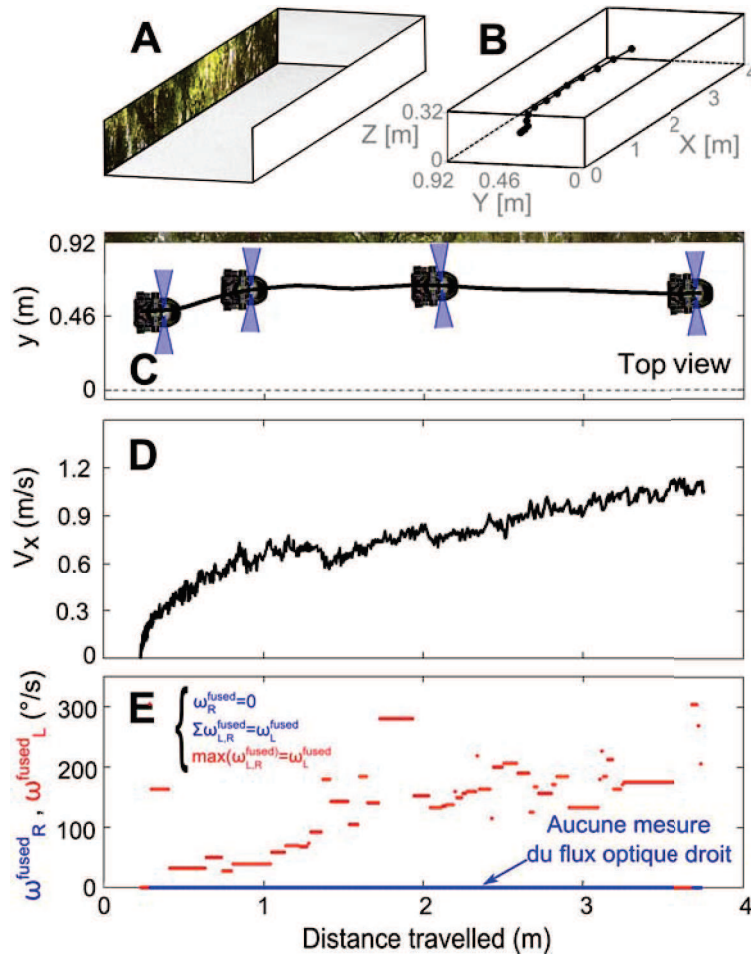


FIGURE 6.5 – Navigation de l’aéroglesseur miniature dans un tunnel droit (A) avec sa paroi latérale droite recouverte d’une teinte uniformément blanche. (B) Trajectoire 3-D du micro-robot (marquage temporel de $500ms$). (C) Trajectoire de l’aéroglesseur effectuant un suivi de paroi du mur contrasté. (D) Profil de vitesse du robot, on constate que le robot accélère tout au long du tunnel. (E) Signaux de sortie des capteurs de flux optique. On constate que seul le capteur dirigé à $\varphi_i = +90^\circ$ mesure le flux optique, le robot se dirige alors dans le tunnel en se basant uniquement sur un système visuel de 2 pixels.

Il subsiste cependant un point qui nécessite d’être discuté dans ces trajectoires robotiques : la vitesse. En effet, le robot accélère tout au long de son voyage quelle que soit la configuration du tunnel (e.g., figure 6.5D). La boucle d’avance, basée sur une régulation bilatérale du flux optique, est perturbée par l’absence de mesure provenant du mur dépourvu de texture et fait accélérer le robot de manière à générer un flux optique bilatéral $\Sigma\omega_{R,L}^{fused}$ suffisant pour minimiser l’erreur $\epsilon_{Fwd} = \omega_{setFwd} - \Sigma\omega_{R,L}^{fused}$. Conjointement à la boucle d’avance, le critère *maximum* de la boucle de contrôle latérale sélectionne le plus grand des flux optiques latéraux à savoir, dans notre cas, celui



FIGURE 6.6 – Suivi de paroi de l'aéroglesseur miniature dans trois tunnels présentant une teinte uniformément blanche sur un des murs latéraux (trajectoires obtenues avec $\omega_{setFwd} = 190^\circ \cdot s^{-1}$ et $\omega_{setFwd} = 125^\circ \cdot s^{-1}$).

généralisé par le mur gauche texturé (mesuré par le capteur de flux optique $\varphi_i = +90^\circ$). Cette boucle dirige le robot vers le mur texturé (figures 6.6&6.5) et lui fait suivre le mur sans entrer en collision avec ce dernier. Cependant, le régime permanent n'est pas atteint dans le tunnel : le robot continue d'accélérer. La boucle de contrôle latérale, qui tente de minimiser à tout instant ϵ_{Side} (i.e., $\omega_{setSide} - \max(\omega_{R,L}^{fused})$), écarte le robot du mur texturé à mesure qu'il prend de la vitesse (voir équation 6.1, page 163). C'est pourquoi le robot semble s'écarter peu à peu du mur gauche dans le cas du tunnel droit (figure 6.5C) et semble stabiliser sa position dans le cas des tunnels fuselés (voir figures 6.4E&F, figure 3.10 page 110), position qui n'est autre que la position d'équilibre du robot dans ce type de tunnel lorsque les consignes de flux optique valent $\omega_{setFwd} = 190^\circ \cdot s^{-1}$ et $\omega_{setSide} = 125^\circ \cdot s^{-1}$.

En effet, si le tunnel avait été plus long, le robot aurait pu atteindre son régime permanent avec une vitesse maximale V_{fmax} et une distance au mur gauche $D_{L\infty}$:

$$\begin{cases} V_{fmax} = \lim_{t \rightarrow +\infty} K_{Fwd} \cdot u_{fmax} \cdot (1 - \exp^{-\frac{t}{\tau_{Fwd}}}) = 1.81 \text{ m} \cdot s^{-1} \\ D_{L\infty} = \frac{V_{fmax}}{\omega_{setSide}} = 0.83 \text{ m} \end{cases} \quad (6.4)$$

avec $K_{Fwd} = 30.11 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot s^{-1} \cdot \%^{-1}$ et $u_{fmax} = 60\%$ ($u_{LiftFan} = 42\%$ pour le cas où le robot accélère au maximum).

Il est alors intéressant de faire un retour sur les résultats issus de la biologie et de

discuter sur les similarités observées entre les trajectoires d'abeilles et celles du robot LORA. Ce dernier reproduit néanmoins le suivi de paroi observé chez l'abeille par Serres et al. [2008b] en ne se jetant pas dans l'ouverture. Cependant, la prise de vitesse du robot ne semble pas vérifier les données obtenues chez les abeilles qui semble rester constante chez ces dernières [Serres et al., 2008b].

Dans notre expérimentation robotique, l'aéroglesseur est doté de seulement deux « yeux » élémentaires de 2 pixels qui regardent uniquement les directions latérales du champ visuel ($\varphi_i = \pm 90^\circ$) alors que l'abeille possède plus de 10000 ommatidies regardant chacune une direction particulière de l'environnement. Baird et al. [2010] ont d'ailleurs mis en évidence, chez le bourdon, une régionalisation du champ visuel intervenant dans le contrôle de la vitesse d'avance, estimant que le champ visuel qui s'étend de $23 - 30^\circ$ à 155° interviendrait dans le contrôle de la vitesse d'avance de l'insecte. De même que dans notre étude du contrôle de la vitesse de l'abeille dans un tunnel double fuselé (voir Chapitre 5, [Portelli et al., 2011]), nous avons pu mettre en évidence que la variance de la plus grande somme des flux optiques dans la direction de regard située à 45° était plus faible que celle de la plus grande somme des flux optiques à 90° montrant que l'abeille utilise les indices visuels de la région frontale de son champ visuel pour contrôler sa vitesse d'avance. On pourrait dès lors penser que dans les expériences de Serres et al. [2008b], l'abeille ait pu utiliser les indices visuels d'autres régions de son champ visuel, comme la région dorsale et ventrale par exemple, et ainsi ne pas considérer l'ouverture du tunnel pour maintenir sa vitesse d'avance constante et donc opérer un suivi de la paroi latérale texturée à une distance constante.

Cependant, cette hypothèse sur l'interprétation du contrôle de la vitesse d'avance chez l'abeille dans les expériences de Serres et al. [2008b] en amène une autre. Le tunnel utilisé dans ces dernières expériences était constitué de deux parois latérales longues de 4 m et hautes de 0.25 m , le sol avait été peint en blanc et le tunnel était recouvert d'une moustiquaire. Il n'est pas exclu qu'au vu de la proximité du vol de l'abeille avec ces parois, ces dernières aient pu estimer un flux optique provenant du sol et du « plafond ». En partant de ce principe et de l'observation qualitative de Julien Serres que les abeilles se centraient dans le plan vertical de ce tunnel ($h = 12.5\text{ cm}$), on peut estimer que pour une vitesse d'avance moyenne de $98 \pm 31\text{ cm.s}^{-1}$, l'abeille ait pu mesurer, dans les régions dorsales et ventrales de ses yeux composés, un flux optique

$\omega_{Drsl,Vtrl}$:

$$\omega_{Drsl,Vtrl} = \frac{98 \pm 31}{12.5} \sim 450 \pm 142 \text{ }^\circ.\text{s}^{-1} \quad (6.5)$$

Cette valeur est largement supérieure au flux optique généré par la paroi latérale gauche (estimé à $265 \pm 116 \text{ }^\circ.s^{-1}$ [Serres et al., 2008b]). Dans une situation identique et en supposant que l'abeille soit dotée du pilote automatique ALIS, cette modélisation prévoit que l'abeille se mette à suivre le plafond ou le sol pour se positionner centrée verticalement en ignorant les parois latérales [Portelli et al., 2010a] car les parois verticales seraient les plus proches que les latérales. Toutefois, l'expérience montre que l'abeille utilise les indices visuels de la paroi latérale pour suivre un corridor de hauteur étroite [Serres et al., 2008b]. Cela montre que l'abeille utilise plusieurs parois pour se guider dans un tunnel : deux parois pour le contrôle de vitesse, une paroi verticale pour le positionnement vertical, puis une paroi pour le positionnement horizontal. Un constat que l'on peut également faire vis-à-vis des expériences conduites par Portelli et al. [2010a] dans un tunnel dont la hauteur était bien plus grande que sa largeur, et pourtant l'abeille opère un suivi de terrain à vitesse constante tout en étant relativement centré horizontalement (observation qualitative) dans le tunnel. De telles observations comportementales tendent à nous démontrer l'indépendance des positionnements latéral et vertical, en utilisant pour chacun d'eux un régulateur de flux optique ayant sa propre consigne de flux optique en plus du régulateur de flux optique pour le contrôle de vitesse (voir [Portelli et al., 2011], Chapitre 5). Finalement, un tel découplage des positionnements latéral et vertical serait compatible pour les besoins d'un vol libre 3D d'une abeille dans un environnement naturel.

I.E Réaction automatique de contrôle de la vitesse d'avance dans un tunnel fuselé

Dans le but de comprendre les mécanismes responsables du contrôle de la vitesse chez les abeilles, Srinivasan et al. [1996] ont entraîné des abeilles à naviguer dans un tunnel fuselé (angle de fuselage : 14.5°) long d'un mètre et convergeant d'une largeur de 38 cm à 12 cm , puis divergeant à nouveau jusqu'à 38 cm de largeur.

Les auteurs ont alors observé que les abeilles adoptent un comportement de centrage mais surtout qu'elles adaptent également leur vitesse en fonction de la largeur locale du tunnel. En effet, elles ralentissent à mesure que les murs se rapprochent jusqu'au point de constriction (section minimale) puis ré-accélèrent lorsque le tunnel s'élargit (figure 6.1B). Ils en ont alors déduit que l'abeille contrôle sa vitesse en maintenant un flux optique total généré par les murs latéraux constant [Srinivasan et al., 1996]. Dans notre modèle, le flux optique total généré par les murs est modélisé dans le schéma de contrôle de LORA par la fonction *somme* (figure 3.4 page 103), à savoir la somme des flux optiques latéraux. Cette somme est maintenue constante tout au long

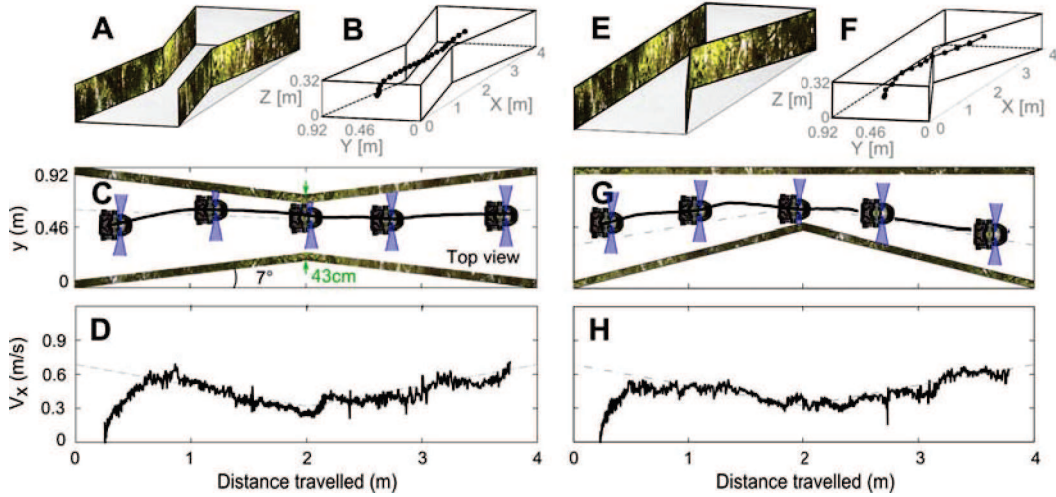


FIGURE 6.7 – Suivi de paroi et contrôle de vitesse de l'aéroglesseur miniature, équipé du double régulateur de flux optique, dans un tunnel fuselé (angle de fuselage : 7° - A -) et un tunnel fuselé unilatéralement (angle de fuselage : 14° - E -). Le robot parvient à compenser la perturbation en flux optique induite par le fuselage des murs en opérant un suivi de la paroi la plus proche (C, G) et en contrôlant sa vitesse en adéquation avec la largeur du tunnel.

de la boucle à une consigne de flux optique bilatérale : ω_{setFwd} . Ainsi, la conséquence de cette régulation bilatérale du flux optique, couplée à la régulation unilatérale du flux optique, est que la vitesse d'avance V_f devient proportionnelle à la section locale du tunnel [Serres et al., 2008a] tel que :

$$V_{f\infty} = \frac{\omega_{setSide} \cdot (\omega_{setFwd} - \omega_{setSide})}{\omega_{setFwd}} \cdot D \quad (6.6)$$

En l'occurrence, dans un tunnel fuselé, la section locale du tunnel varie linéairement. Cette variation est considéré par le pilote automatique LORA comme une perturbation non-constante de flux optique [Serres et al., 2008a] qu'il va compenser en diminuant linéairement sa vitesse à mesure que les murs se rapprochent et en augmentant sa vitesse linéairement à mesure que les murs s'élargissent.

Dans notre application robotique, nous avons reproduit ce contexte expérimental en faisant entrer notre micro-robot dans un tunnel fuselé de 7° avec un couple de consignes de flux optique respectant $\omega_{setSide} < \frac{\omega_{setFwd}}{2}$ [Serres et al., 2008a] afin d'observer un comportement de centrage. Nous avons pu voir que le robot conserve une vitesse d'avance proportionnelle à la section locale horizontale du tunnel D tout en se centrant. Le micro-robot décélère linéairement à mesure que les murs se rapprochent jusqu'au point de constriction et accélèrent linéairement lorsque les murs s'écartent.

En généralisant au suivi de paroi ($\omega_{setSide} > \frac{\omega_{setFwd}}{2}$), le robot adopte toujours une vitesse proportionnelle à la section locale du tunnel mais cette fois-ci, en suivant le mur le plus proche (figure 6.7).

Des abeilles entraînées à traverser un tunnel présentant un double fuselage, d'abord vertical puis horizontal, ont pu montrer qu'elles ralentissent en moyenne à la première constriction (verticale) puis à la deuxième (horizontale) conservant une vitesse de vol proportionnelle à la section minimale du tunnel (verticale ou horizontale) (voir Chapitre 5). Cette observation confirme celle émise par Srinivasan mais l'étend sur le plan vertical, à savoir que c'est la plus grande somme des flux optiques (vertical ou horizontal) qui sera régulée autour d'une valeur préférée.

Une abeille « artificielle » embarquant à son bord le pilote automatique LORA généralisé au contrôle du plan vertical, tel que le pilote automatique ALIS, vérifierait cette même propriété en maintenant une vitesse proportionnelle à la section minimale d'un tunnel fuselé.

II Robustesse du pilote automatique LORA aux perturbations

Au delà d'une validation expérimentale du modèle LORA dans un but d'illustrer les observations faites chez l'insecte ailé. Nous avons testé une autre configuration de tunnel propre à perturber le contrôle de vitesse de notre pilote automatique en incluant cette fois une pente frontale dans un tunnel droit.

L'aéroglesseur miniature vole à quelques millimètres du sol ($\sim 2mm$) mais il n'en reste pas moins sensible aux variations d'inclinaison du terrain. Une pente frontale sur un terrain génère une perturbation (D_{Tf}) qui dépend de la composante du poids projetée suivant l'angle de la pente (β) sur l'axe d'avance de l'aéroglesseur :

$$D_{Tf} = \frac{m \cdot g \cdot \beta}{2K_T \cdot U_{batt}} \quad (6.7)$$

Une étude de la fonction de sensibilité liant la sortie du régulateur bilatéral de flux optique ($OF_{Fwd}(s)$) à la perturbation ($D_{Tf}(s)$) montre qu'une pente (angle β constant) est rejetée par le contrôleur Proportionnel-Intégral du contrôleur d'avance $C_{Fwd}(s)$ (Annexe II.A).

Il est alors important de comprendre que la régulation du flux optique dépend de la *vitesse sol* qui va conditionner la vitesse angulaire de défilement des éléments contrastés (i.e., le flux optique) dans le champ visuel des capteurs de flux optique. Le contrôleur

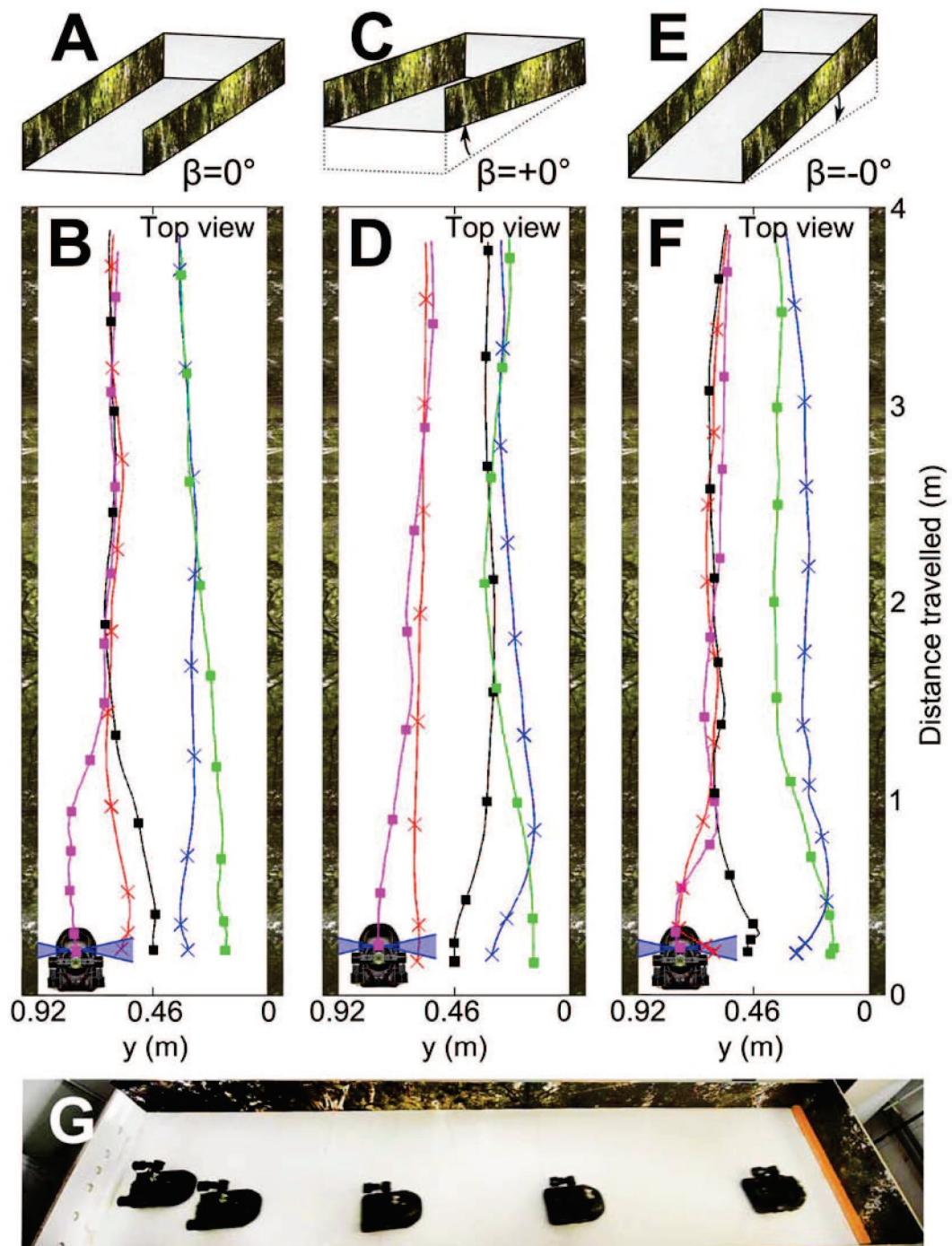


FIGURE 6.8 – Suivi de paroi du robot dans un tunnel droit présentant un sol plat (A) ou une pente (angle β) soit descendante (C), soit montante (E). Le robot parvient à suivre la paroi la plus proche de son point de départ sans être perturbé, ni par l'absence (B), ni par la présence d'une pente (D, F). (G) Chronophotographie du robot (intervalle de temps : 1.8 s) naviguant dans le tunnel avec le sol en pente descendante, cette trajectoire correspond à la trajectoire représentée en noir (D).

$C_{Fwd}(s)$ minimise alors à tout instant l'erreur ϵ_{Fwd} et tente de conserver une *vitesse sol* de « croisière » tel que la somme des flux optiques latéraux ($\omega_L^{fused} + \omega_R^{fused}$) soit maintenue constante à une consigne de flux optique bilatérale ω_{setFwd} .

Ceci montre que le contrôleur d'avance ne répond pas à une consigne de vitesse *métrique* mais à une consigne de flux optique bilatérale (ω_{setFwd}) permettant au robot d'adapter en permanence une vitesse de « sécurité » qui dépendra de la configuration de l'environnement sans aucun pré-requis préalable sur celui-ci, ni aucune mesure de sa propre vitesse.

Cette régulation du flux optique bilatérale permet entre autre de rejeter une *perturbation physique* liée à une pente (montante ou descendante) (figure 6.8) mais aussi une perturbation liée à un tunnel fuselé (figure 3.7) ou encore une *perturbation en échelon du flux optique latéral* dans un tunnel non-stationnaire (Annexe II, figure 3.11).

Une extension de la robustesse du pilote automatique LORA à la présence d'un vent peut s'avérer intéressante. En effet, tout le long de notre étude, nous avons considéré la vitesse air V_{air} nulle. En présence d'un vent, V_{air} ne s'annule pas, nous obtenons alors :

$$\vec{V}_{robot/sol} = \vec{V}_{robot/air} + \vec{V}_{air} \quad (6.8)$$

Or, chez l'insecte, il a pu être observé que bouger le sol d'un corridor non-stationnaire à une vitesse V_p dans la direction de vol d'un insecte revient à un vent de face de vitesse V_p [David, 1982] puisque ce dernier aura le même effet de réduire la vitesse de l'insecte par rapport au sol [Portelli et al., 2010a]. Une perturbation liée au vent se comporte alors similairement à une *perturbation liée à un échelon de mouvement du sol*, ce qui permet d'écrire :

$$\vec{V}_{robot/sol} = \vec{V}_{robot/mur} + \vec{V}_p \quad (6.9)$$

L'étude des fonctions de sensibilité de la boucle d'avance et latérale à une *perturbation en échelon de flux optique* montre que les boucles sensorimotrices compensent ce type de perturbations (voir Annexe II). Le robot LORA pourrait très bien être perturbé par des vents de face (ou arrières), ce qui permettrait d'étudier, en conditions réelles, la robustesse du pilote automatique LORA en présence de tels vents. Il est dès lors attendu que, dans une certaine gamme de perturbation, le robot soit insensible à un vent de face (ou arrière) et le compense afin d'obtenir une vitesse sol suffisante pour minimiser ϵ_{Fwd} comme cela a pu être observé chez l'abeille [Barron and Srinivasan, 2006].

III Une double régulation du flux optique chez l'abeille ?

Cette question permet de re-boucler sur la biologie afin de savoir si un pilote automatique de type LORA est effectivement présent chez l'abeille. Ce premier prototype de mise en œuvre du schéma de contrôle LORA sur un micro-robot nous a permis de retranscrire une grande diversité comportementale observée chez l'insecte comme résumé dans la figure 6.1. Ces résultats remettent en cause directement l'hypothèse « d'équilibrage des flux optiques latéraux » au profit de l'hypothèse de « régulation du flux optique unilatéral », seule capable de retranscrire à la fois des comportements de centrage et de suivi de paroi observés chez l'abeille. Un schéma de contrôle explicite montrant les liens de cause à effet entre la perception du flux optique et les actions motrices engendrées a été élaboré [Serres et al., 2008a] et mise en œuvre sur notre micro-aéroglesseur. Ce schéma de contrôle repose sur une boucle à verrouillage de cap dont on sait qu'elle existe chez l'abeille [von Frisch, 1948] et sur deux boucles de régulation directe du flux optique reposant sur la mesure de capteurs de flux optique, existant chez l'abeille (neurones VT [Ibbotson, 2001]). Les analogies comportementales (voir figure 6.1) observées entre le micro-robot équipé du pilote automatique LORA et l'insecte renforcent la plausibilité d'une boucle sensorimotrice LORA au sein du système nerveux de l'abeille.

Cependant, les neurones responsables de l'élaboration des signaux de commande n'ont toujours pas été identifiés mais devraient être directement rattachés aux neurones VT. Pour toutes ces raisons, la présence d'un pilote automatique, tel que LORA, au sein du système nerveux de l'abeille constitue une sérieuse possibilité permettant d'expliquer comment une abeille contrôle sa vitesse et sa position dans son environnement.

IV Pistes d'amélioration du robot LORA

Afin de tester les capacités de navigation d'un micro-robot équipé du pilote automatique LORA, nous avons embarqué un œil composé élémentaire constitué de deux à quatre yeux élémentaires regardant chacun une faible région de l'espace, (voir chapitres 2&3, figure 6.9).

Chaque œil est composé d'une lentille et d'une rétine électronique où seulement deux photodiodes voisines, qui constituent une paire de pixels, sont reliées à un seul *Détecteur Élémentaire de Mouvement* permettant d'estimer le flux optique. Bien que ce système soit basé sur la vision des insectes, il n'en demeure pas moins minimaliste (quatre DEMs) en comparaison des milliers d'ommatidies constituant chaque



FIGURE 6.9 – Œil composé minimaliste monté sur le robot (photo encart) constitué de seulement 4 facettes comportant chacune 2 pixels. Chaque facette constitue un *détecteur élémentaire de mouvement* et estime le flux optique 1-D dans sa direction de visée (directions azimuthales $\varphi_i = \pm 45^\circ$ et $\varphi_i = \pm 90^\circ$).

œil composé de l'insecte (5500 ommatidies par œil chez l'abeille ouvrière, [Seidl and Kaiser, 1981]), et donc des milliers de DEMs, lui conférant un champ visuel quasi-panoramique. Autant de direction de visée confèrent au pilote automatique de l'insecte une capacité inouïe de contrôle de son vol et d'évitement d'obstacles pouvant venir de plusieurs directions.

Notre mise en œuvre robotique a montré l'importance du champ visuel frontal dans l'amélioration de la robustesse de navigation, en terme d'évitement d'obstacles, dans des configurations de tunnel difficilement franchissables (figure 2.13). Il serait intéressant d'améliorer la navigation de l'actuel robot en utilisant la région frontale du champ visuel afin de mesurer le flux optique d'expansion

Les capteurs de flux optique utilisés sur le robot actuel ne comportent que deux pixels. Il serait alors intéressant de mettre en œuvre sur ce robot des capteurs de flux optique innovant tel que celui présenté au chapitre 4 de cette thèse. Ce dernier effectue cinq mesures simultanées du flux optique, chacune dans une région différente, et fournit une sortie fusionnée de ces cinq mesures, grâce à l'opérateur médian, dont on a vu qu'elle était plus rafraîchie et plus précise que la mesure d'un capteur de flux optique de seulement deux pixels (voir Chapitre 4). Utiliser un tel capteur sur le robot LORA permettrait sans nul doute d'augmenter significativement la qualité d'estimation du flux optique et donc la robustesse de navigation du robot dans des environnements naturels. Il serait également très intéressant d'ajouter des capteurs de flux optique dans d'autres directions, comme la région frontale, et d'utiliser le flux optique d'expansion par exemple pour détecter la présence d'obstacles frontaux et stopper le robot

en face d'un mur. Ainsi, ajouter d'autres directions visuelles permettrait également au robot de détecter la présence d'obstacles dans ces directions et lui permettrait de franchir, par exemple, une forêt d'obstacles. Un travail supplémentaire sur le pilote automatique pourrait consister à permettre au robot de contrôler son cap sur la base de la vision et de naviguer dans des tunnels encore plus complexes, comme ceux comportant des coudes ou encore des *U-turns*.

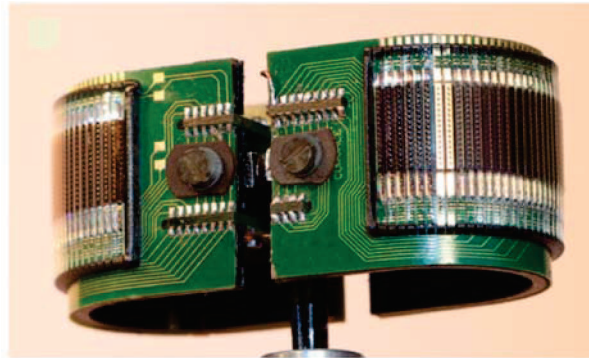


FIGURE 6.10 – Deux yeux composés CurvACE montés l'un contre l'autre, une telle configuration procure un champ visuel panoramique de $360^\circ \times 60^\circ$. (D'après [Floreano et al., 2013]).

La mise en œuvre d'un ou de deux yeux composés artificiels de type CurvACE (figure 6.10) sur le robot LORA permettrait d'aller encore plus loin dans le bio-mimétisme en mettant cette fois en œuvre un œil composé très similaire à celui de la drosophile (voir [Floreano et al., 2013]). Des études menées sur le contrôle de vitesse chez le bourdon [Baird et al., 2010] montrent que ces derniers contrôlent leur vitesse en mesurant le flux optique dans une zone de leur champ visuel allant de $\varphi = 23^\circ$ à $\varphi = 155^\circ$ (en azimuth) montrant qu'ils se préparent « à l'avance » au franchissement d'un danger. Il serait alors intéressant de définir, grâce à un œil composé artificiel comme CurvACE, de définir des régions d'intérêt du champ visuel qui, de la même manière que le bourdon, permettrait au robot de pouvoir réagir à l'avance à un potentiel danger. Dans tout les cas, améliorer le système visuel du robot en mettant en œuvre des capteurs de flux optique orientés vers d'autres directions permettrait d'augmenter grandement la diversité des comportements reproduits.

Enfin, le pilote automatique tel qu'il est présenté dans cette thèse constitue une solution de navigation de type « réflexe » en environnement inconnu. En effet, lorsque le robot effectue un comportement de suivi de paroi, celui-ci suit toujours la paroi la plus proche. Il serait intéressant de réfléchir à une stratégie, et peut être même à un critère de flux optique supplémentaire agissant en complément du critère *maximum*,

qui permettrait au robot de pouvoir contrôler sa position en sélectionnant la paroi à suivre, sans être condamné à toujours suivre la paroi la plus proche.

Toutes ces pistes constituent de possibles ouvertures à ce sujet de thèse qui permettrait d'améliorer le pilote automatique LORA et donc la navigation en environnement inconnu des micro-aéronefs, mais aussi de mieux comprendre comment l'abeille ou l'insecte ailé, plus généralement, contrôle son vol.

V La double régulation du flux optique pour guider les robots de demain ?

Cette étude a montré qu'il est tout à fait possible de mettre en œuvre sur un véhicule, i.e. un aéroglisseur *totalemt actionné*, un pilote automatique bioinspiré des observations éthologique menées chez l'abeille, capable de doter un robot de réflexes de contrôle de vitesse et d'évitement d'obstacles en environnement inconnu similaire à ceux observés chez l'abeille. Le pilote automatique LORA est d'autant plus destiné à une mise en œuvre sur des micro-robots qu'il est compatible avec une faible masse, un faible encombrement et une faible consommation d'énergie. Par exemple les boucles sensorimotrice LORA et le traitement du flux optique ont été mises en œuvre sur une petite carte électronique de $10.9 \times 2.5 \text{ cm}$, pesant 8.17 g et ne consommant pas plus de 0.75 W (figure 6.11).

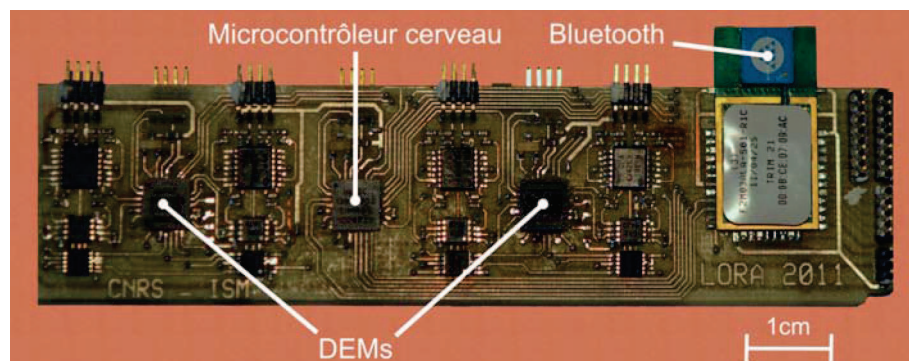


FIGURE 6.11 – Photo de la carte « Cerveau » effectuant le traitement sensorimoteur à bord du robot.

Premièrement conçu pour des robots totalement actionnés (i.e., aéronef à 8 rotors [Romero et al., 2007]), il est à noter que de nombreuses cibles aériennes restent sous-actionnées (voir figures 1.40&1.41, pages 68, 70, 72). Cependant, dès lors que les angles de roulis et de tangage d'un aéronef à voilures tournantes [Hrabar et al., 2005, Hra-

bar and Sukhatme, 2009] sont relativement faibles, on peut considérer les dynamiques d'avance et latérale comme découplées. Un système de navigation automatique en environnement inconnu, tel que LORA, ne nécessite, pour son fonctionnement, que des capteurs de flux optique non-émissifs (économique en énergie). Cette solution de navigation apporterait sans nul doute une solution de navigation élégante aux aéronefs ou micro-aéronefs sans pilotes naviguant en environnement intérieur ou dans des canyons urbains ou naturels sans aucune connaissance préalable de l'environnement, ce qui constituerait une étape supplémentaire vers plus d'autonomie dans la navigation. Enfin, une application aux véhicules *non-holonomes* serait possible même si la stratégie de contrôle, initialement prévue pour des véhicules *holonomes totalement actionnés*, devrait être revue pour y être adapté correctement. La navigation en milieu urbain encombré nécessite une attention de tout les instants, il serait alors tout à fait possible, via le principe de la régulation du flux optique d'imaginer une assistance au conducteur consistant en une aide au contrôle de vitesse et au freinage (régulation bilatérale du flux optique) ou encore de détecter la dangerosité d'obstacles latéraux (régulation unilatérale du flux optique) ou frontaux (flux optique d'expansion). Ces idées permettraient, peut-être (la piste mériterait d'être creusée), d'utiliser directement le « flux optique » dans la perception visuelle d'un danger qui pourrait échapper à l'attention du conducteur mais également améliorer son confort de conduite.

Chapitre 7

Conclusion

Ce travail de thèse a permis l'implémentation sur un démonstrateur d'un *schéma de contrôle explicite*, un double régulateur de flux optique dénommé LORA (*Lateral Optic flow Regulation Autopilot*), conçu à partir des observations éthologiques faites chez l'abeille, notamment le comportement de *suivi de paroi*, mis en évidence récemment [Serres et al., 2008b] et qui vient enrichir la diversité comportementale observée chez l'abeille (article de synthèse : [Srinivasan, 2011b]). Nous avons choisi un aéroglisseur miniature (taille : $0.36 \times 0.21 \times 0.17$ m, masse : 0.878 kg) comme démonstrateur rendu *totalelement actionné* afin de se rapprocher du mode de propulsion d'une abeille (ou d'un hélicoptère) dont les dynamiques sont découplées [Esch et al., 1975, Ellington, 1984]. Cette implémentation robotique a ainsi permis de reproduire, sur un robot réel et pour la première fois, une série de prouesses comportementales décrites depuis ces vingt dernières années chez l'abeille comme : la réaction de *centrage* dans un tunnel étroit stationnaire [Kirchner and Srinivasan, 1989, Srinivasan et al., 1991], la réaction de *décentrage* dans un tunnel étroit non-stationnaire [Kirchner and Srinivasan, 1989, Srinivasan et al., 1991], le contrôle de vitesse mis en évidence dans des tunnels fuselés ou non-stationnaires (chapitre 5, [Portelli et al., 2011]) [Srinivasan et al., 1996, Baird et al., 2005, 2006], et le suivi de paroi dans un tunnel comportant une ouverture [Serres et al., 2008b]. Nous avons également montré que le robot peut naviguer dans un tunnel présentant un virage ou comportant un terrain en pente.

Le schéma de contrôle *bioinspiré* LORA (figure 3.4) se compose d'une boucle de verrouillage du cap (présent chez les insectes - [von Frisch, 1948] -) et de deux *régulateurs de flux optique latéraux* interdépendants, ne faisant appel qu'à des capteurs de flux optique (dont leurs contrparties biologiques est présent également chez les abeilles, e.g. les neurones VT - [Ibbotson, 2001]). Chaque boucle possède sa propre consigne de flux optique préférée et contrôle un degré de liberté du micro-robot comme décrit ci-dessous :

- (i) la boucle à *verrouillage de cap* s'appuie sur la mesure d'un micro-compass et d'un micro-gyromètre pour assurer au robot des déplacements en translation permettant aux capteurs visuels de ne mesurer que la composante translationnelle du flux optique, seule dépendante *linéairement* de la vitesse du robot et *non-linéairement* de la distance aux obstacles ;
- (ii) le premier régulateur de flux optique *unilatéral* commande la poussée *latérale* du robot déterminant sa vitesse latérale et donc sa position latérale $D_{R,L}$ par rapport au mur suivi. Dans un tunnel stationnaire, le robot se positionne à une distance d'un mur générant le maximum des flux optiques latéraux et ce, proportionnellement à la vitesse d'avance déterminée en (iii) *sans qu'il n'ait à mesurer cette distance*. Ainsi, en régime établi, le paramètre essentiel et unique de ce premier régulateur est sa consigne de flux optique *unilatéral* $\omega_{setSide}$, qui n'est autre que le coefficient de proportionnalité liant cette distance à la vitesse d'avance ;
- (iii) le second régulateur *bilatéral* de flux optique commande la force *propulsive* du robot déterminant sa vitesse d'avance V_f . Dans un tunnel stationnaire, grâce aux deux régulateurs de flux optique, le robot, comme l'abeille, contrôle sa vitesse proportionnellement à la largeur locale du tunnel D *sans qu'il n'ait à mesurer ni sa vitesse ni la largeur du tunnel*. Cette propriété reste vraie quel que soit le positionnement latéral dans le tunnel. Le paramètre essentiel et unique de ce second régulateur est sa consigne de flux optique *bilatérale* ω_{setFwd} .

Notre démarche de travail bio-inspirée permet, grâce à l'application robotique d'hypothèses comportementales faites chez l'abeille, d'éclaircir la présence au niveau neuronal d'un système visuo-moteur basé sur la *régulation du flux optique* intervenant dans le contrôle de leur vol. La plausibilité d'un pilotage automatique basé sur la double régulation du flux optique, à bord de l'abeille prend alors toute son ampleur, d'autant plus que les différentes étapes de traitement nécessaires à son fonctionnement, i.e., des étapes de comparaison et de filtrage temporel, sont tout à fait plausibles d'un point de vue neuronal.

Cette étude a montré que l'intégration du pilote automatique LORA, i.e. du *régulateur dual de flux optique latéral*, sur un aéroglisseur miniature est tout à fait compatible avec une *miniaturisation draconienne* des systèmes de contrôle pour micro-robots (masse de l'électronique : 8.17 g, consommation : 0.75 W) dans la mesure où il embarque seulement des capteurs *non-émissoifs* (économique en énergie) nécessitant de *faible ressources calculatoires*. Le modèle de pilotage automatique LORA permet à un

robot *totale*ment actionné, en l'occurrence un aéroglisseur, de naviguer à la manière d'une abeille dans un tunnel, sur la base d'un système visuel de résolution grossière (quatre à huit pixels, à savoir de deux à quatre yeux élémentaires de deux pixels) inspiré de la vision des insectes, sans avoir à *mesurer* ou *estimer* ni sa vitesse, ni sa distance aux murs, ni aucun paramètre relatif à la configuration du tunnel (chapitres II et III). Ce pilote automatique propose une solution élégante et innovante de navigation « réflexe » de type « abeille » encore non-résolue à ce jour dans le contrôle de vitesse et l'évitement d'obstacles des micro-aéronefs. Le schéma de contrôle LORA est suffisamment explicite pour être adaptable facilement sur d'autres types de véhicules autonomes.

La conception de capteurs de flux optique innovants plus petits et plus légers est également un point-clé supplémentaire dans le guidage automatique des micro-aéronefs. Le capteur présenté en chapitre 4, possède des caractéristiques idéales d'intégration sur les futurs micro-robots avec une masse inférieure au gramme (optique comprise) et une faible consommation ($\leq 0.23 W$). Ce capteur de 6 pixels est capable de fournir une mesure du flux optique précise et plus fréquente (jusqu'à $\sim 70 Hz$) qu'un capteur de flux optique basé sur seulement 2 pixels (- $\sim 15 Hz$ - [Roubieu et al., 2011]). L'intégration de tels capteurs pour couvrir d'autres zones du système visuel du robot LORA (notamment frontales) permettrait d'étendre les capacités d'anticipation des obstacles frontaux et de navigation dans des environnements encore plus complexes, tels que des labyrinthes sur l'unique base de la vision du mouvement.

Enfin, les recherches éthologiques chez l'abeille continuent et sont très prometteuses car elles tentent de reconstituer l'incroyable puzzle du contrôle sensorimoteur chez l'insecte. Il semble en effet que le principe mis en jeu sur le plan horizontal, illustré par le modèle LORA, rejoigne celui du plan vertical (chapitre 5). Le pilote automatique ALIS (*Autopilot using an Insect based vision System*) [Portelli et al., 2008, 2010b] propose une extension du modèle LORA sur le plan vertical et permet d'illustrer la simulation du vol 3-D d'abeilles par l'adjonction de capteurs de flux optique supplémentaires dans les zones dorsales et ventrales. Le modèle ALIS a permis la prédiction de l'importance de la régulation du flux optique de la région dorsale mis en évidence chez l'abeille dans le contrôle de vitesse (chapitre 5). Ces observations montrent que les recherches sur la description du modèle du contrôle du vol chez l'insecte doivent continuer afin d'en approfondir notre compréhension.

Chapitre 8

Annexes

I Synthèse des correcteurs d'avance et latéral

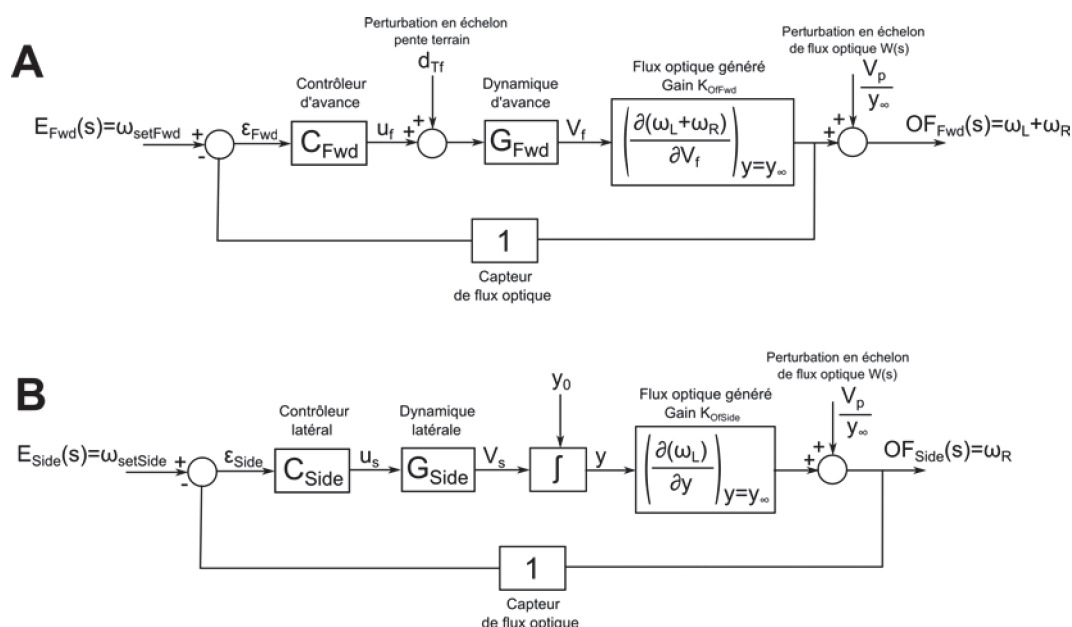


FIGURE 8.1 – (A) Linéarisation du contrôle d'avance du pilote automatique LORA. Une pente frontale génère une perturbation d_{Tf} an amont de la dynamique d'avance du robot. (B) Linéarisation du contrôle latéral du pilote automatique LORA. La mise en mouvement des motifs sur l'un des murs à la vitesse V_p génère une *perturbation en échelon de flux optique* d'amplitude $W(s) = \frac{V_p}{y_\infty}$ sur les deux boucles de régulation. Un vent de face de vitesse V_p a le même effet de réduire la vitesse sol que le défilement d'un mur à une vitesse V_p [David, 1982]. (D'après [Serres et al., 2008a, Serres, 2008])

La synthèse des correcteurs d'avance $C_{Fwd}(s)$ et latéral $C_{Side}(s)$ s'est opéré de manière fréquentielle en linéarisant les boucles de contrôle d'avance et latéral de LORA

autour du point de fonctionnement régulé :

$$\begin{cases} \omega_{setSide} = & 125^\circ \cdot s^{-1} \\ \omega_{setFwd} = & \omega_L + \omega_R \\ & = 125^\circ \cdot s^{-1} + 65^\circ \cdot s^{-1} \\ & = 190^\circ \cdot s^{-1} \end{cases} \quad (8.1)$$

avec comme point de fonctionnement $V_{f\infty} = 0.67 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $y_\infty = D_L = 0.31 \text{ m}$ dans un corridor de largeur $D = 92\text{cm}$ [Serres et al., 2008a]. Dans le cas d'un suivi du mur gauche, nous avons $\text{sgn}(\omega_L - \omega_R) = +1$.

I.A Correcteur d'avance

La fonction de transfert en boucle ouverte de la boucle d'avance linéarisé (figure 8.1A) s'écrit :

$$BO_y(s) = C_{Fwd}(s) \cdot G_{Fwd}(s) \cdot \frac{\partial(\omega_L + \omega_R)}{\partial V_f} \quad (8.2)$$

Lorsque $u_f \geq 0$ ($u_{Liftfan} = 42\%$, pousseurs arrières actionnés ou régime établi), la dynamique d'avance du robot LORA est :

$$G_{Fwd}(s) = \frac{30.11}{1 + 2.67 \cdot s} \quad (8.3)$$

Enfin, pour un couple de consignes de flux optique $\omega_{setFwd} = 190^\circ \cdot s^{-1}$ et $\omega_{setSide} = 125^\circ \cdot s^{-1}$, et une vitesse en régime établi $V_{f\infty} = 0.67 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, on a :

$$K_{OfFwd} = \left(\frac{\partial(\omega_R + \omega_L)}{\partial} \right)_{y=y_\infty} = 4.95 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1} \quad (8.4)$$

avec Le gain K_{OfFwd} correspond à la somme des flux optiques droit et gauche générés à la mise en mouvement du robot, ramené à sa vitesse d'avance.

Un correcteur Proportionnel-Intégral (PI) $C_{Fwd}(s) = 0.8 \cdot \frac{1+2.7\cdot s}{s} \cdot \frac{1}{1+8\cdot 10^{-3}s}$ a été ajusté afin de compenser le pôle dominant de la dynamique d'avance du robot lorsque $u_{LiftFan} = 42\%$. L'action intégrale de ce correcteur permet d'annuler l'erreur statique $\epsilon_{Fwd\infty}$.

Ainsi, en régime permanent, le robot a une constante de temps en boucle fermée $T_0 = 2.26 \text{ s}$, soit une rapidité accrue de 15% par rapport à la constante de temps en boucle ouverte. Un filtre passe-bas a été introduit avec le correcteur, ce qui permet de filtrer une éventuelle commande bruitée dû aux erreurs de mesure des capteurs de flux optique.

I.B Correcteur latéral

La fonction de transfert en boucle ouverte de la boucle latéral linéarisé (figure 8.1B) s'écrit :

$$BO_y(s) = C_{Side}(s) \cdot G_{Side}(s) \cdot \frac{\partial \omega_L}{\partial y_\infty} \quad (8.5)$$

avec $G_{Side}(s) = \frac{16.28}{1+2.54 \cdot s}$ en régime établi ($u_{LiftFan} = 42\%$) et $K_{OfSide} = \frac{\partial \omega_L}{\partial y_\infty} = 7.04 rad \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$. Le dernier paramètre (K_{OfSide}) correspond au flux optique généré par la paroi la plus proche suivie en régime établi.

Le correcteur latéral d'avance de phase $C_{Side}(s)$ est introduit dans la boucle afin d'augmenter la marge de phase et l'amortissement améliorant ainsi les performances dynamiques du système bouclé.

Le correcteur $C_{Side}(s) = K_d \frac{1+1.2 \cdot s}{1+0.21 \cdot s} \cdot \frac{1}{1+1.59 \cdot 10^{-2} s}$ permet d'obtenir une marge de phase de 44.55° à une pulsation critique de $2 rad \cdot s^{-1}$ soit $0.32 Hz$.

Un filtre passe-bas a été ajouté en sortie du correcteur et permet de lisser une commande bruitée dû aux erreurs de mesure des capteurs de flux optique.

II Étude du rejet des perturbations par les boucles sensorimotrices LORA

Dans un but de simplification des calculs, nous négligerons l'influence des filtre passe-bas placé en sortie des correcteurs d'avance et latéral.

II.A Boucle d'avance

Nous étudierons dans cette sous-partie le rejet des perturbations $W(S)$ et $D_{Tf}(s)$ par la boucle de contrôle d'avance de LORA (figure 8.1). L'étude des fonctions de sensibilité de la sortie du contrôleur d'avance $OF_{Fwd}(s)$ par rapport à ces perturbations se révélera intéressante pour savoir si le correcteur Proportionnel-Intégral $C_{Fwd}(s)$ rejette ces deux perturbations.

La perturbation $W(s)$ est liée à une *perturbation en échelon de flux optique* dû au défilement des motifs d'un des murs à une vitesse V_p . Dans le cas d'un corridor non-stationnaire où les deux murs latéraux sont motorisés, nous avons affaire à une *perturbation en échelon de flux optique bilatérale*. L'étude du rejet de cette perturbation est intéressant car il permet d'étudier directement l'effet d'un vent de face ou arrière sur le contrôle de vitesse de la boucle d'avance de LORA. Un vent de face aura pour effet de générer une perturbation en échelon de flux optique ω_p *négative* ($\omega_p = -\frac{V_p}{y_\infty}$) et un

vent arrière, une perturbation en échelon de flux optique ω_p *positive* ($\omega_p = +\frac{V_p}{y_\infty}$). La fonction de sensibilité liée à la perturbation $W(s)$ est :

$$\frac{OF_{Fwd}(s)}{W(s)} = \frac{s}{\tau_{Fwd}} \cdot \frac{1 + \tau_{Fwd}^2}{s^2 + s \cdot \left(\frac{1 + \tau_i \cdot K \cdot K_p \cdot K_{OfFwd}}{\tau_{Fwd} \cdot \tau_i} \right) + \frac{K_p \cdot K \cdot K_{OfFwd}}{\tau_{Fwd} \cdot \tau_i}} \quad (8.6)$$

Les pôles du dénominateur de l'équation 8.6 sont à partie réelle négative, la fonction de sensibilité $\frac{OF_{Fwd}(s)}{W(s)}$ existe. La perturbation $W(s)$ généré par une vitesse constante de défilement d'un mur ou des deux murs est une perturbation en échelon, d'où l'étude de $\lim_{s \rightarrow 0} s \cdot OF_{Fwd}(s)$ donne :

$$\lim_{s \rightarrow 0} s \cdot OF_{Fwd}(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s^2}{\tau_{Fwd}} \cdot \frac{1 + \tau_{Fwd}^2}{s^2 + s \cdot \left(\frac{1 + \tau_i \cdot K \cdot K_p \cdot K_{OfFwd}}{\tau_{Fwd} \cdot \tau_i} \right) + \frac{K_p \cdot K \cdot K_{OfFwd}}{\tau_{Fwd} \cdot \tau_i}} \cdot \frac{W}{s} = 0 \quad (8.7)$$

Le résultat précédent (equation 8.6) nous montre que la boucle de contrôle d'avance est capable, quelque soit le niveau de gonflage de la jupe, de rejeter une *perturbation en échelon de flux optique* lié au défilement des murs d'un corridor non-stationnaire ou à l'effet d'un vent de face ou arrière. Ce résultat montre que le correcteur $C_{Fwd}(s)$ rejette efficacement ce type de perturbation.

Nous allons maintenant nous pencher sur le rejet d'une perturbation lié à une pente frontale. Nous avons vu, dans le Chap. III, que la boucle de contrôle d'avance est capable de rejeter à la fois une pente frontale *ascendante* mais aussi *descendante* (figure 3.6). La pente frontale est à angle constant β constituant une perturbation en échelon $D_{Tf}(s)$.

L'étude de la fonction de sensibilité de la sortie du contrôleur d'avance $OF_{Fwd}(s)$ avec cette perturbation $D_{Tf}(s)$ nous donne :

$$\frac{OF_{Fwd}(s)}{D_{Tf}(s)} = \frac{s \cdot \frac{K \cdot K_{OfFwd}}{\tau_{Fwd}}}{s^2 + s \cdot \left(\frac{1 + \tau_i \cdot K \cdot K_p \cdot K_{OfFwd}}{\tau_{Fwd} \cdot \tau_i} \right) + \frac{K_p \cdot K \cdot K_{OfFwd}}{\tau_{Fwd} \cdot \tau_i}} \quad (8.8)$$

Les pôles du dénominateur de l'équation 8.8 sont à partie réelle négative, la fonction de sensibilité $\frac{OF_{Fwd}(s)}{D_{Tf}(s)}$ existe. L'étude de la limite de la fonction de sensibilité définie dans l'équation 8.8 donne :

$$\lim_{s \rightarrow 0} s \cdot OF_{Fwd}(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{s \cdot \frac{K \cdot K_{OfFwd}}{\tau_{Fwd}}}{s^2 + s \cdot \left(\frac{1 + \tau_i \cdot K \cdot K_p \cdot K_{OfFwd}}{\tau_{Fwd} \cdot \tau_i} \right) + \frac{K_p \cdot K \cdot K_{OfFwd}}{\tau_{Fwd} \cdot \tau_i}} \cdot \frac{d_{Tf}}{s} = 0 \quad (8.9)$$

Ce résultat démontre le rejet de la perturbation liée à une pente frontale, qu'elle soit montant ou descendante, par le correcteur PI de la boucle d'avance $C_{Fwd}(s)$.

II.B Boucle latérale

Nous nous intéressons cette fois à la boucle de contrôle latérale $C_{Side}(s)$ afin de savoir si elle rejette une *perturbation en échelon de flux optique* ($W(s)$) lié au défilement d'un des deux mur à une vitesse V_p . L'étude de la fonction de sensibilité de la sortie de la boucle latérale $OF_{max}(s)$ et la perturbation $W(s)$ donne :

$$\frac{OF_{max}(s)}{W(s)} = \frac{\frac{s}{T \cdot \tau_{Side}} \cdot (1 + T \cdot s) \cdot (1 + \tau_{Side} \cdot s)}{s^3 + s^2 \cdot \frac{T + \tau_{Side}}{T \cdot \tau_{Side}} + s \cdot \frac{1 + K_d \cdot K_{OfSide} \cdot K \cdot a \cdot T}{T \cdot \tau_{Side}} + K \cdot K_d \cdot K_{OfSide}} \quad (8.10)$$

Il nous faut maintenant étudier les pôles du dénominateur de la fonction de sensibilité $\frac{OF_{max}(s)}{W(s)}$. Les boucles sensorimotrices du contrôle d'avance et latéral de LORA sont interdépendantes. Une fois la perturbation $W(s)$ rejetée par le contrôle de la boucle d'avance, la vitesse d'avance V_f du robot atteindra son régime établi et les paramètres dynamique K_{Side} et τ_{Side} seront ceux d'un niveau de gonflage à 42%. Nous aurons alors $a = 5.7$, $T = 0.21$, $\tau_{Side} = 2.54s$, $K_{OfSide} = \frac{125 \cdot \pi}{0.31 \cdot 180} = 7.038 rad \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$ et $K_d = 0.4$.

Il revient alors à étudier les racines du polynôme du dénominateur :

$$s^3 + 5.16 \cdot s^2 + 104.72 \cdot s + 45.8 = 0 \quad (8.11)$$

Ces racines sont :

$$\begin{cases} s_1 = -0.4463 \\ s_2 = -2.3568 - 9.8520i \\ s_3 = -2.3568 + 9.8520i \end{cases} \quad (8.12)$$

Toutes les racines sont à partie réelle négatives, la fonction de sensibilité $\frac{OF_{max}(s)}{W(s)}$ existe. Nous pouvons alors étudier :

$$\lim_{s \rightarrow 0} s \cdot OF_{Max}(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{\frac{K \cdot K_{OfSide} \cdot s}{\tau}}{s^2 + s \cdot \left(\frac{1 + \tau_i \cdot K \cdot K_p \cdot K_{OfSide}}{\tau \cdot \tau_i} \right) + \frac{K_p \cdot K \cdot K_{OfSide}}{\tau \cdot \tau_i}} \cdot \frac{W}{s} = 0 \quad (8.13)$$

L'étude de la limite nous montre que lorsque le contrôleur d'avance a rejeté la perturbation en échelon de flux optique, le contrôleur latéral est tout à fait en mesure de rejeter cette même perturbation.

III Quelques précisions sur la conception du robot LORA

Le robot constitue une solution autonome de navigation (sur le plan horizontal) en environnement inconnu, il transporte ses capteurs, son moyen de communication sans fil, son énergie et ses unités de traitement microcontrôleurs qui lui permettent d'effectuer tout le traitement des capteurs à bord. Un ordinateur au sol peut être utilisé pour récolter les données du robot en temps réel et pour envoyer certaines commandes, comme les consignes de flux optique par exemple. La figure 8.2 résume la répartition des différentes cartes électroniques, capteurs et batteries embarqués dans le robot. Chacune de ces cartes effectue des fonctions bien particulières que nous allons décrire brièvement ci-dessous.

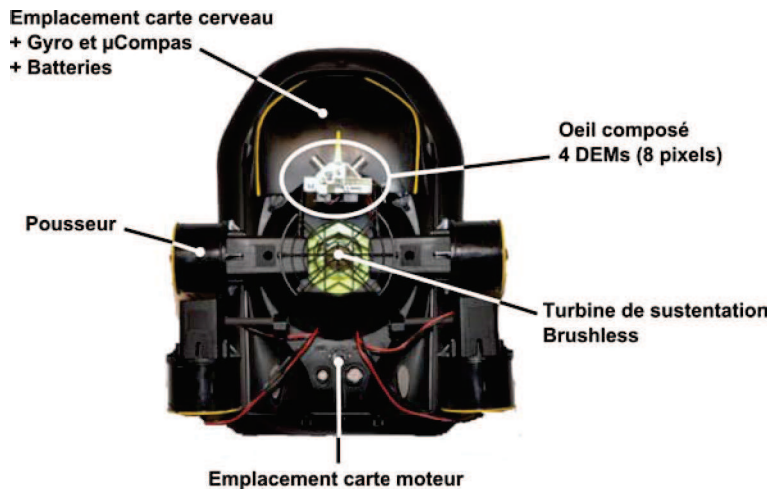


FIGURE 8.2 – Vue de dessus du robot aéroglisseur LORA où apparaissent l'emplacement des différentes cartes, batteries et capteurs embarqués, rendant le robot autonome.

III.A La carte « Cerveau » : centre névralgique du robot LORA

La carte cerveau, située à l'avant du robot (figure 8.2), représente la carte principale du robot LORA. Cette carte (dimension : 109×25 mm, masse : 8 g) centralise toutes les données visuelles (traitement des 4 DEMs) ainsi que les données inertielles (microgyromètre + compas) pour générer les commandes des actionneurs (4 pousseurs + turbine *Brushless*) qui sont transmises à la carte moteur qui se charge ensuite de commander les moteurs.

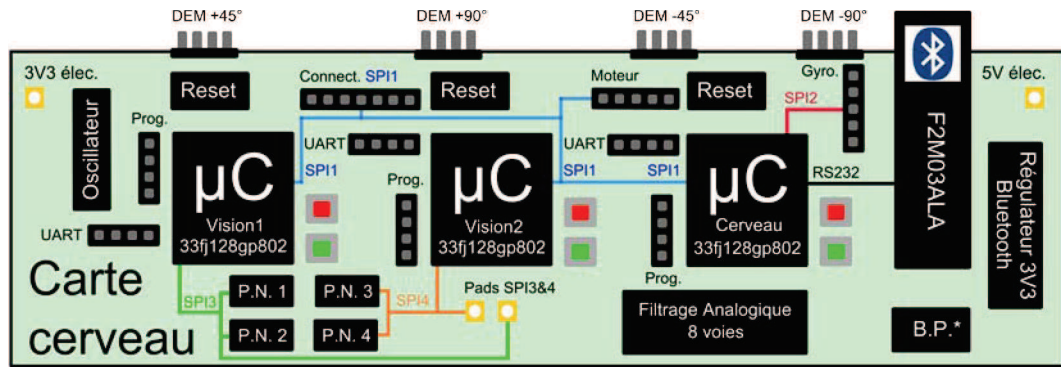


FIGURE 8.3 – Schéma faisant apparaître les différentes fonctionnalités de la carte cerveau, les 2 microcontrôleurs « Vision » chargés du traitement visuel des 4 DEMs et le microcontrôleur « Cerveau » qui récolte les données de chaque capteur (vision, micro-gyromètre, micro-compass). Ce dernier embarque à bord le pilote automatique LORA et génère les commandes à la carte moteur qui se charge de commander les actionneurs. Chaque microcontrôleur communique via un réseau SPI.

Cerveau

La carte cerveau comprend une unité de calcul principale appelée « Cerveau » qui est un microcontrôleur 16bit Microchip©*dsPIC33FJ128GP802* cadencé à $40MIPS$. Le programme principal de ce microcontrôleur tourne avec une fréquence d'échantillonnage de $1kHz$, ce dernier centralise toutes les données capteurs et effectue les calculs du double régulateur de flux optique, à partir des données visuelles, et de la boucle de verrouillage de cap à partir des données inertielles. Ces trois boucles fonctionnent avec une fréquence d'échantillonnage de $100Hz$ et génèrent les commandes moteurs adéquates qui permettront au robot de maintenir son cap et d'avancer en effectuer des translations pures sur le plan horizontal (avance et latérale). Les données capteurs ainsi que les commandes motrices transitent via 2 bus SPI (SPI1 et SPI2).

Capteurs

Modalité inertielle

Le robot est équipé d'un micro-gyromètre *ADIS16100* (Gamme de mesure : $\pm 300^\circ.s^{-1}$) qui mesure la vitesse de rotation du robot autour de son axe vertical (lacet) et d'un micro-compass magnétique (*Honeywell*, type *HMC6052* associé à deux ponts de Wheastone magnétorésistifs) qui fournit la position angulaire azimuthale absolue du robot. Ce dernier permet au robot de maintenir son cap de manière plus robuste et compense surtout les dérives lentes en lacet du robot. Le micro-compass communique la mesure de cap sous la forme d'un signal analogique envoyé au Convertisseur Analogique Numérique (CAN) du micro-gyromètre qui communique à son tour directement avec le

dsPIC « Cerveau » via le bus SPI n°2.

Enfin, le micro-gyromètre présente une large bande-passante de 40 Hz qui est près de 10 fois supérieure à la bande passante de la dynamique en lacet du robot (voir Tableau des fonctions de transfert du robot page 94).

Modalité visuelle

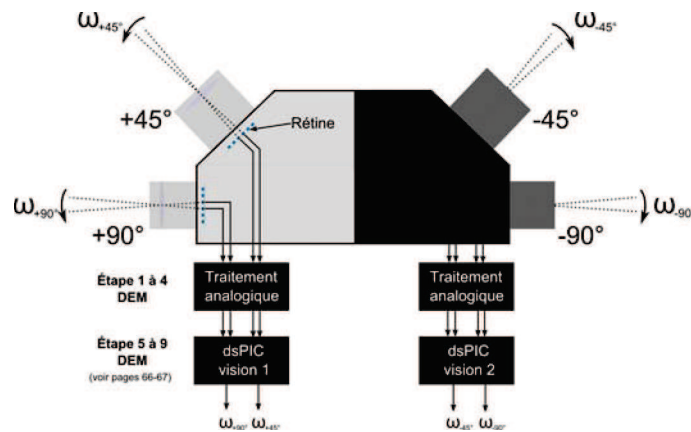


FIGURE 8.4 – Vue de dessus de la tête montrant l’œil composé élémentaire constitué de ses 4 facettes, chacune comporte une rétine LSC iC-Haus de 6 pixels parmi lesquels uniquement les photodiodes centrales sont utilisées, ce qui constitue un système visuel de 8 pixels au total. Chaque dsPIC vision est constitué de deux détecteurs élémentaires de mouvements, mesurant le flux optique, chacun dans une direction particulière du champ visuel.

Les signaux visuels provenant des deux photodiodes centrales de chaque œil (rétine LSC iC-Haus de 6 pixels, directions $\pm 45^\circ$ et $\pm 90^\circ$ soit 8 pixels, figure 8.4) sont amenés à la carte cerveau via 4 connecteurs 4 contacts sur la carte cerveau où ils subissent un traitement analogique (Étapes 1 à 4 du traitement DEM) et sont traités par 2 microcontrôleurs vision *dsPIC33FJ128GP802* (@40MIPS, $f_{ech} = 2kHz$). Chaque unité traite les étapes 5 à 9 du traitement DEM de deux yeux latéraux ($+45/90^\circ$ et $-45/90^\circ$, voir figure 8.4). L’étage de gain réglable [Ruffier and Expert, 2012] permet d’améliorer la mesure en faible luminosité et s’effectue au moyen d’un amplificateur en tension non-inverseur associé à un potentiomètre numérique (1 par DEM, MAX5403). La valeur du potentiomètre est commandée via le SPI3 par le dsPIC vision 1 et le SPI4 par le dsPIC vision 2 (figure 8.5). Ce modèle (MAX5403) correspond à un potentiomètre numérique de $10k\Omega$ dont la valeur de résistance peut être obtenue avec une précision de 8bits, soit 256 valeurs.

Les deux microcontrôleurs vision estiment le flux optique et envoient les mesures

provenant de chaque œil au microcontrôleur cerveau par le SPI1. Enfin, le microcontrôleur cerveau communique le réglage du seuillage des voies ON et OFF, ainsi que la valeur du gain souhaité pour chaque œil.

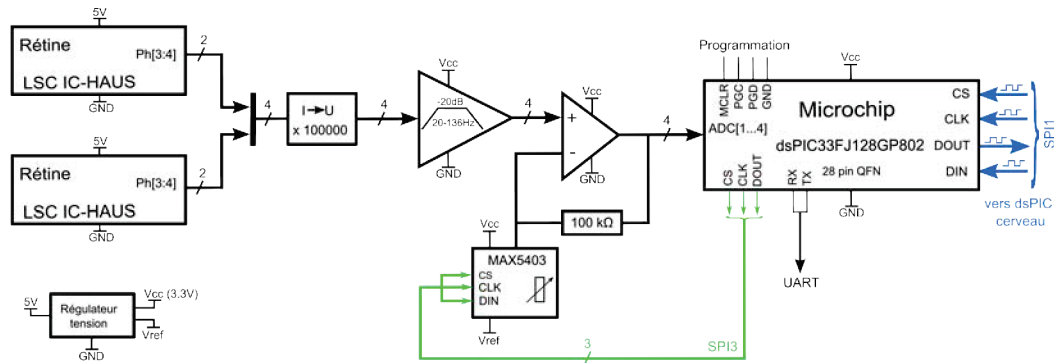


FIGURE 8.5 – Schéma électronique d’une unité de traitement des signaux analogiques des signaux photodiode (dsPIC vision 1). Un convertisseur courant/tension amplifie le signal de la photodiode qui est par la suite filtré par un filtre passe-haut ($f_c = 20\text{ Hz}$) et un filtre passe-bas ($f_c = 136\text{ Hz}$). Le signal est ensuite amplifié en tension à l’aide d’un amplificateur non-inverseur dont le gain varie grâce à un potentiomètre numérique commandé, via une liaison SPI, par le dsPIC vision.

La figure 8.6 permet de replacer l’ensemble des connectivités de la carte cerveau avec les autres cartes et capteurs du robot.

Communication sans fil

La carte cerveau établit une communication bi-directionnelle avec un ordinateur au sol via une connexion sans fil Bluetooth[®] procuré par un module à antenne intégrée F2M03ALA (figure 8.19). Une interface Windows[®] (figure 8.8) permet de faire le lien entre l’utilisateur et le robot.

Autre fonctionnalités

La carte cerveau possède également d’autres fonctionnalités (voir figures 8.3&8.6), chaque microcontrôleur dsPIC possède 2 diodes de statut, une clignotante et une autre permettant de connaître visuellement l’état du “Overload Flag Port” qui traduit l’état d’occupation du dsPIC. Les dsPICs fonctionnent à la même vitesse (40MIPS) et sont synchronisés avec la même horloge en utilisant un oscillateur actif à 10Mhz.

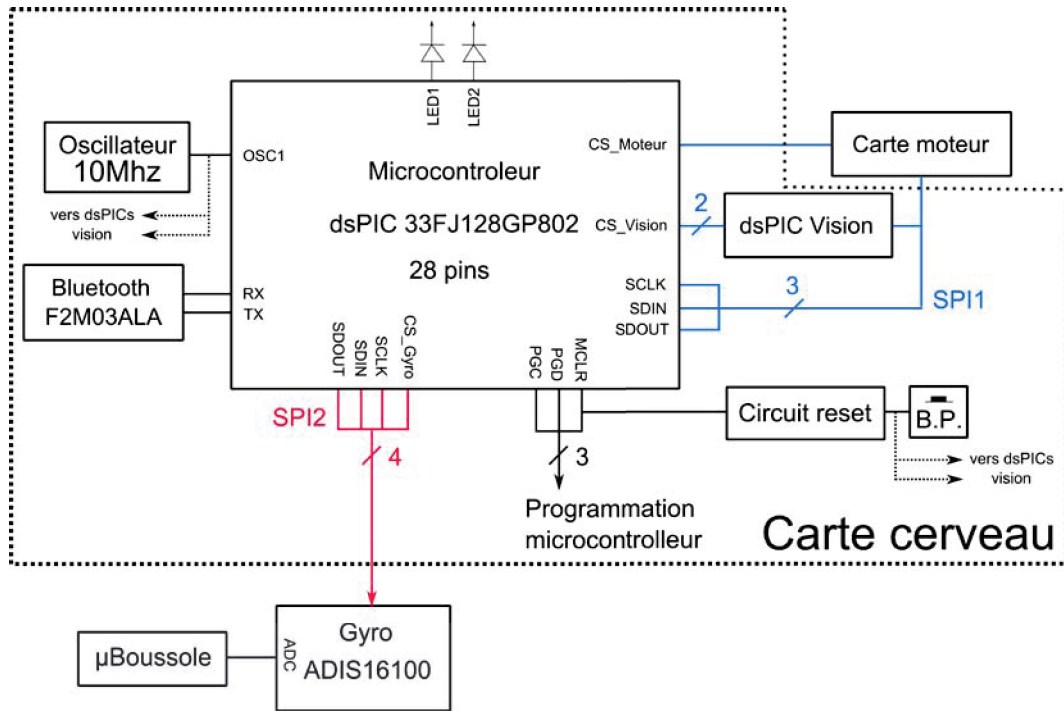


FIGURE 8.6 – Ensemble des connexions du microcontrôleur cerveau *dsPIC33FJ128GP802* avec les autres éléments du robot, notamment les deux dsPICs vision, la carte moteur et le micro-gyromètre. La carte possède également un « Bouton-Poussoir » (B.P.) qui permet de réinitialiser les 3 dsPICs présent sur la carte cerveau. Ces derniers ont leur *clock* synchronisée au moyen d’un oscillateur actif de 10 *Mhz*.

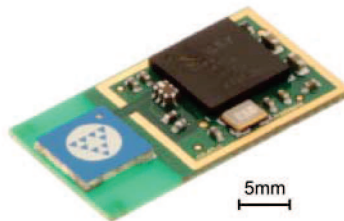


FIGURE 8.7 – Module de communication sans fil Bluetooth©F2M03ALA. D’une dimension de 24×13 *mm*, ce module a une portée théorique de 100 *m* en environnement dégagé.

III.B La carte moteur et les actionneurs : la partie motrice du robot LORA

La description de la conception de la carte moteur du robot LORA ainsi que les résultats ont été décrit plus en détails sur [Roubieu, 2009]. On pourra se référer à ce rapport pour plus de détails.

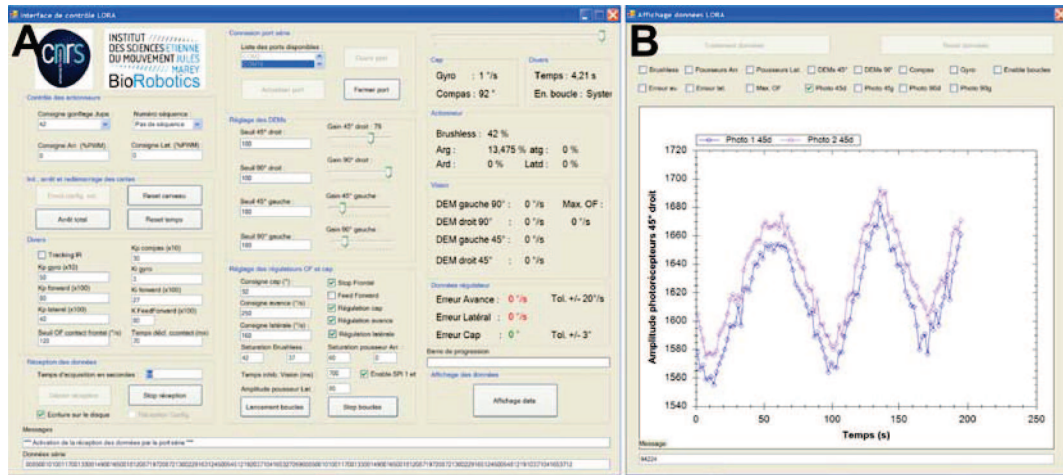


FIGURE 8.8 – (A) Interface de contrôle et d’affichage des données à bord du robot LORA. Cette interface permet de communiquer, via la liaison série de l’ordinateur, avec le robot et d’envoyer les consignes de fonctionnement du robot (consignes de flux optique ω_{setFwd} et $\omega_{setSide}$, cap Ψ , ainsi que les valeurs de seuillage et les gains des DEMs). (B) Interface d’affichage sous forme de graphique des données du robot. Ces interfaces ont été créées avec Microsoft® Visual Studio 2008 Express Edition.

III.B.1 Les actionneurs

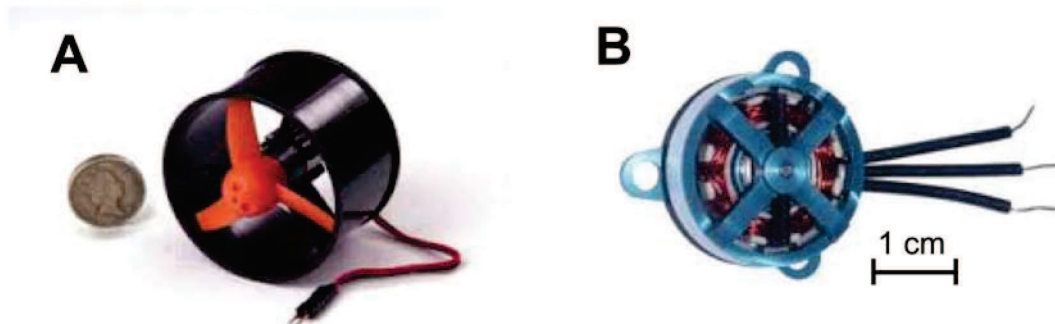


FIGURE 8.9 – (A) Pousseur GWS EDF-50 (Voltage : 7.2 V, courant max. : 3.4 A, poussée max. : 72 g, masse : 30 g) constitué d’une hélice 3 pâles non symétrique (poussée unidirectionnelle) monté sur un moteur à courant continu (CN12-RXC). (B) Moteur *Brushless* à 10 paires de pôles Micro-Rex 220/3-3200 Flyware (Voltage : 7.4 V, Courant max. : 5 A, masse : 11 g).

Le robot (voir figure 8.2) comporte plusieurs actionneurs dont quatre propulseurs constitués de moteur à courant continu et un moteur *Brushless* (figure 8.9) monté avec une turbine qui permet de gonfler la jupe du robot et de créer un coussin d’air de quelques millimètres sous celui-ci.

Parmi les quatre propulseurs, deux sont disposés en tant que pousseurs arrières et

sont utilisés pour faire translater le robot vers l'avant (commande en mode commun par le régulateur bilatéral de flux optique) ou de l'entraîner en rotation autour de son axe vertical (commande mode différentiel par la boucle de régulation du cap). Le bras de levier entre une turbine et le centre de gravité est de 9.5 cm. Enfin les deux autres pousseurs ont été disposés latéralement de part et d'autre du robot, orthogonalement aux pousseurs arrières. Ces pousseurs génèrent une poussée dont la direction est alignée avec le centre de gravité de l'aéroglesseur. Les caractéristiques précises de chacun de ces actionneurs sont décrites dans la thèse de Julien Serres [2008].

Enfin, ces actionneurs restent très sensibles à l'évolution de la tension de la batterie, ce qui est très gênant pour effectuer une identification précise des paramètres dynamiques du robot. Nous nous sommes donc penchés sur ce problème et nous avons créé deux cartes supplémentaires ayant pour fonction principales de réguler en vitesse chacun de ces actionneurs de manière à minimiser au maximum l'effet de la chute de la tension de la batterie sur la réponse des actionneurs et donc sur les dynamiques d'avance et latérales du robot.

III.B.2 Réalisation d'une carte « régulateur de vitesse sans capteur » pour les pousseurs

Structure du régulateur de vitesse sans capteur

Afin de limiter l'électronique embarqué, nous avons mis en place une régulation de vitesse sans capteur ou *sensorless* des propulseurs arrières et latéraux. La figure 8.10 montre le schéma de contrôle en boucle fermée du régulateur de vitesse *sensorless*. Ce dernier estime la vitesse de rotation du moteur Ω_E pour la réguler autour d'une consigne Ω_C (figure 8.10).

La vitesse de rotation est estimée à partir de la mesure de la tension d'induit U et du courant d'induit I traversant une résistance de shunt R_s au moyen de la tension U_s déduite des potentiels V_{sup} et V_{inf} . Les trois potentiels nécessaires à la mesure des tensions d'induit sont filtrés passe-bas au moyen d'une cellule RC (voir figure 8.10&8.23).

Après tout une suite de calculs décrite précisément dans [Viollet et al., 2008], l'estimateur renvoie une vitesse estimée Ω_E proportionnelle à la vitesse de rotation du moteur Ω (à une constante de temps τ_F prêt qui correspond au filtre passe-bas utilisé). Enfin un contrôleur Proportionnel-Intégral permet de rejeter toute perturbation en rotation (e.g., aérodynamique, électrique, voir [Viollet et al., 2008]) et d'annuler

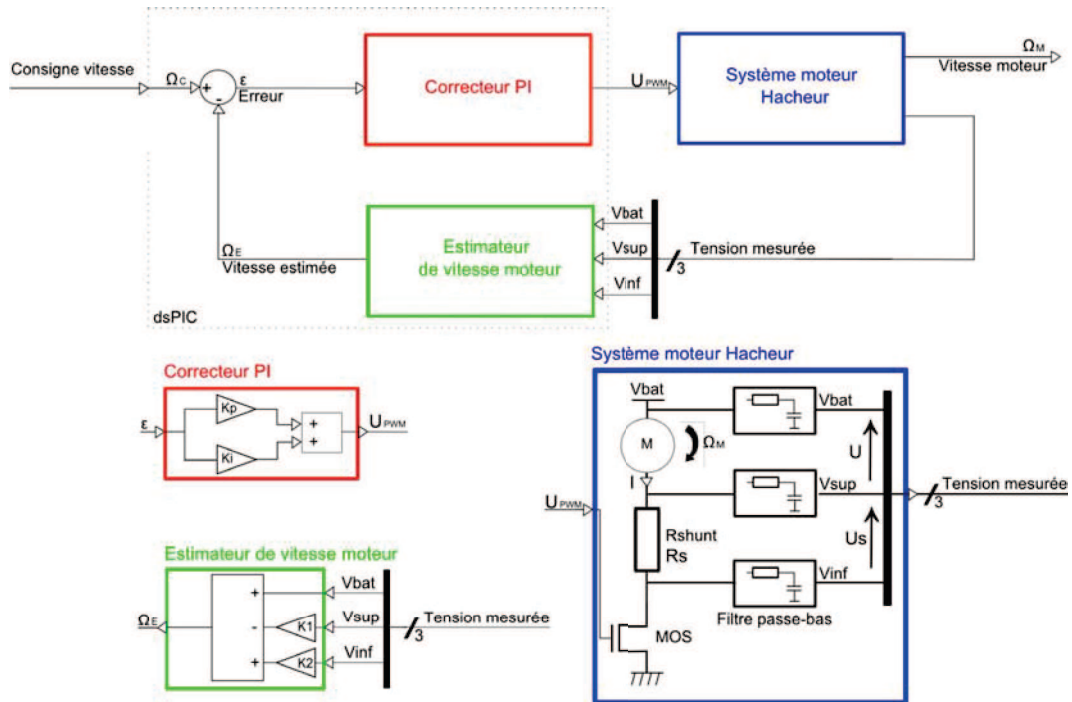


FIGURE 8.10 – Diagramme du régulateur de vitesse sans capteur.

l'erreur statique.

Nous avons alors créé une carte, appelée carte « moteur » qui est en charge de recueillir les commandes motrices de la carte cerveau et de commander les propulseurs en compensant les variations de batterie.

Cette carte moteur est située à l'arrière du robot (au plus près des actionneurs) et communique avec la carte cerveau via un bus SPI qui traverse tout le robot (figure 8.2).

Unité de calcul embarqué à faible consommation

La carte moteur se base un calculateur Microchip® *dsPIC33FJ128MC804* (« low power » 3V3) qui comporte toutes les entrées/sorties nécessaires permettant de communiquer via SPI avec la carte cerveau, les sorties *Output Compare* pour les signaux PWM des actionneurs (4 pour les pousseurs + 1 pour la turbine *Brushless*) et toutes les entrées analogiques nécessaires pour mesurer les potentiels V_{Sup} et V_{inf} de chaque pousseurs (c'est à dire 8 CANs pour les pousseurs et 1 CAN pour la tension de batterie).

Isolation galvanique entre carte « Cerveau » et puissance

On parle d'isolation galvanique entre deux circuits électroniques directement voisins

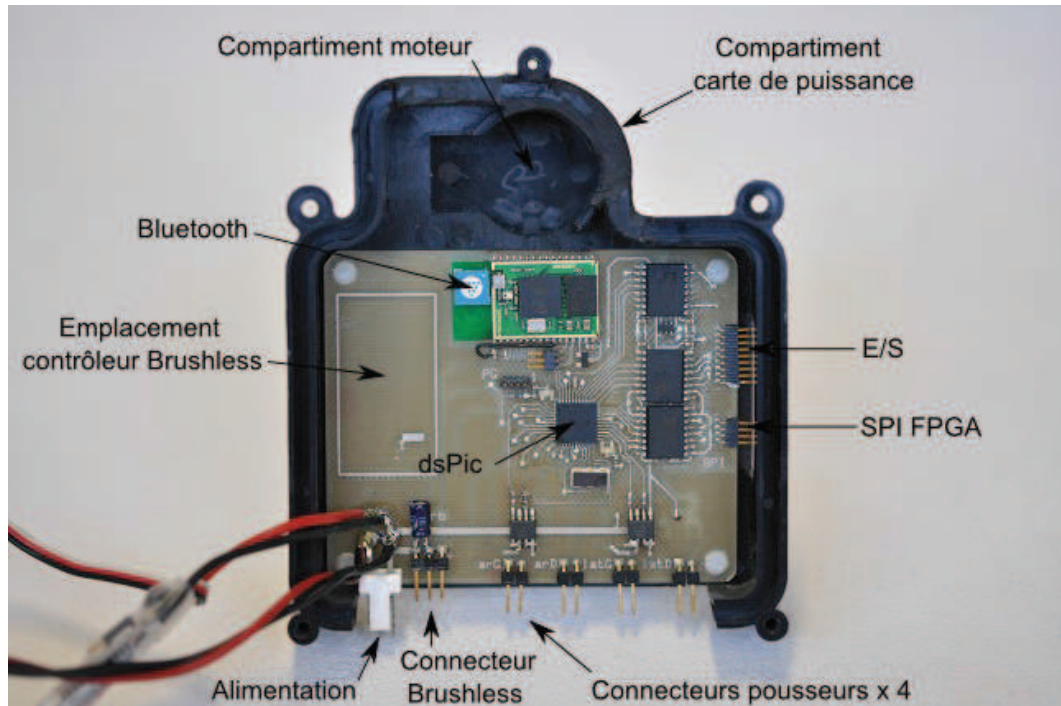


FIGURE 8.11 – La carte moteur du robot LORA est intégrée dans un compartiment qui se situe à l'intérieur du robot. Ce compartiment se referme à l'aide d'un capot sur lequel est fixé la turbine *Brushless* (voir figure 8.17).

quand le courant ne peut circuler directement entre ces deux circuits (séparation des masses). Cette isolation est nécessaire pour isoler la partie numérique (carte *Cerveau*) du bruit généré par les moteurs de la partie puissance.

L'état de l'art en la matière nous permet de dire qu'isoler un signal numérique est plus facile que d'isoler un signal analogique, ce qui nécessiterait une modulation et une démodulation du signal à isoler. Ce procédé étant trop lourd à mettre en œuvre, nous avons isolé seulement les signaux numériques issus de la carte « Cerveau » vers la carte moteur. Ce choix conduit à tout de même relier le microcontrôleur dsPIC (*dsPIC33FJ128MC804* de la carte cerveau) à la masse puissance car la régulation *sensorless* a besoin de mesurer des tensions aux bornes du moteur et de la résistance shunt qui sont référencées sur la masse puissance. La liaison des signaux entre deux parties isolées peut se faire optiquement (diode allumée ou éteinte pour un 1 ou un 0) avec des optocoupleurs ou des magnétocoupleurs (couplage magnétique entre deux bobines).

Les principales caractéristiques de ces composants à observer sont : la consommation, la tension d'isolation et la résistance d'entrées/sortie. La tension d'isolation caractérise la tension à appliquer entre deux bornes isolées pour créer un arc et donc permettre le passage du courant. Nous nous sommes dirigés vers les magnétocou-

pleurs qui montrent de bien meilleures performances d'isolation et de consommation face aux optocoupleurs. Ces derniers consomment plus de courant pour une tension d'isolation et une résistance d'entrée/sortie plus basse. Nous avons alors opté pour les magnétocoupleurs *Adum1400* pour isoler galvaniquement la carte « Cerveau » de la carte moteur.

Répartition de l'énergie aux actionneurs : l'étage de puissance

Dans la mesure où les propulseurs sont à poussée unidirectionnelle (configuration non-symétrique des hélices), un hacheur simple quadrant est suffisant pour piloter les moteurs à courant continu des pousseurs.

Les transistors MOS sont bien plus performants que les transistors bipolaires dans la distribution de la puissance. En effet, les MOS ont une résistance drain-source beaucoup plus faible que la résistance collecteur-émetteur d'un transistor bipolaire. Ils dissipent donc, par conséquent, beaucoup moins d'énergie par effet Joule.

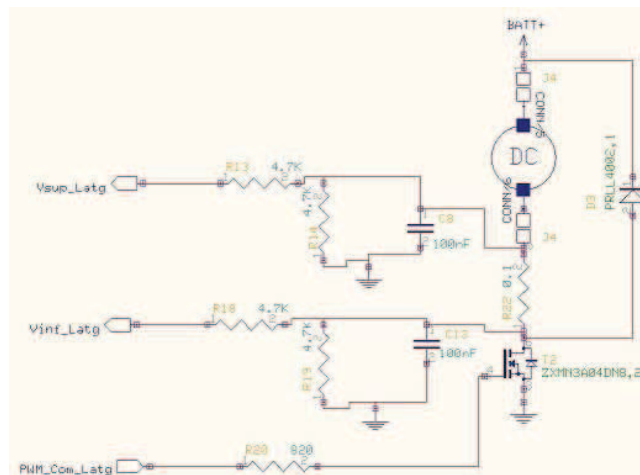


FIGURE 8.12 – Schéma électronique de l'étage de puissance.

Comme on le voit dans le schéma électronique de la figure 8.12, le moteur est branché en série avec la *résistance de shunt* R_s sur le drain du transistor MOS, ce qui permet de débloquent le MOS pour une tension de commande inférieure à la tension d'alimentation. En effet, si le moteur avait été placé sur la source du MOS, il aurait fallu une tension de commande supérieure à la tension d'alimentation pour le débloquent et ainsi permettre la rotation du moteur.

La diode disposée en parallèle sur le moteur, appelée diode de roue libre, a un rôle très important car elle permet de décharger la bobine du moteur au moment où le

courant s'interrompt. Sans la présence de cette diode, le potentiel sur le drain peut devenir supérieure à la tension d'alimentation dû à l'effet inductif de la bobine et ainsi endommager le transistor et l'électronique de commande.

Mise en œuvre du « régulateur de vitesse sans capteurs » des pousseurs

Un banc d'expérimentation a alors été mis en place pour tester la rapidité du système « pousseur » régulé mais aussi le rejet des perturbations électriques. La carte moteur a été alimentée sur une générateur de tension réglé à 8.5V. Une carte dSpace, reliée à un ordinateur, permettait de récupérer les informations de la carte moteur.

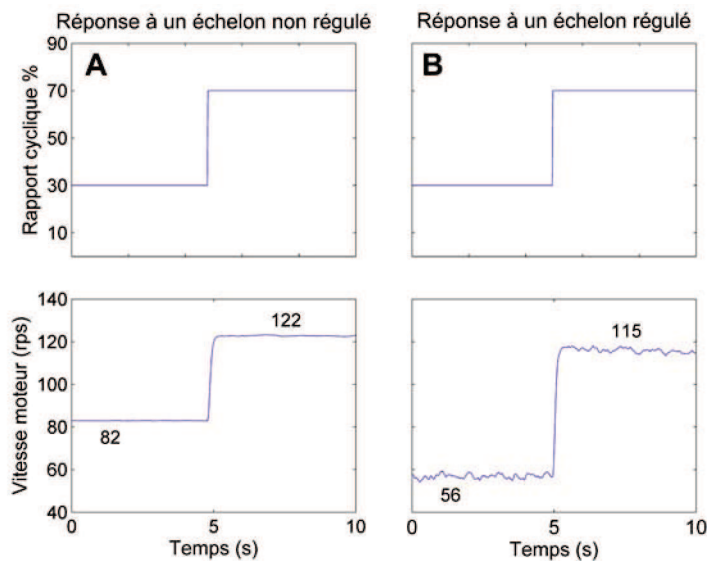


FIGURE 8.13 – Courbe de réponse à un échelon du régime moteur avec et sans régulateur *sensorless*.

Nous avons alors mesuré le temps de réponse du système en appliquant une consigne en échelon variant de 30% à 70%. Cette échelle de consigne correspond à la plage utile de commande du pousseur.

Les résultats obtenus se sont montrés concluants, le système est légèrement plus rapide avec la régulation *sensorless*. Une étude de des courbes obtenus (figure 8.13A&B) avec la toolbox « System Identification Toolbox » montre que la réponse est de type apériodique et que le temps de réponse est de 48 *ms* en boucle ouverte et de 45 *ms* en boucle fermé. Le système n'est pas ralenti par la boucle de contrôle et le régime moteur est quasiment le même avec et sans régulation : le système est précis et stable avec la régulation.

Enfin, en faisant varier la tension d'alimentation de la carte moteur de 8.5V à 6V

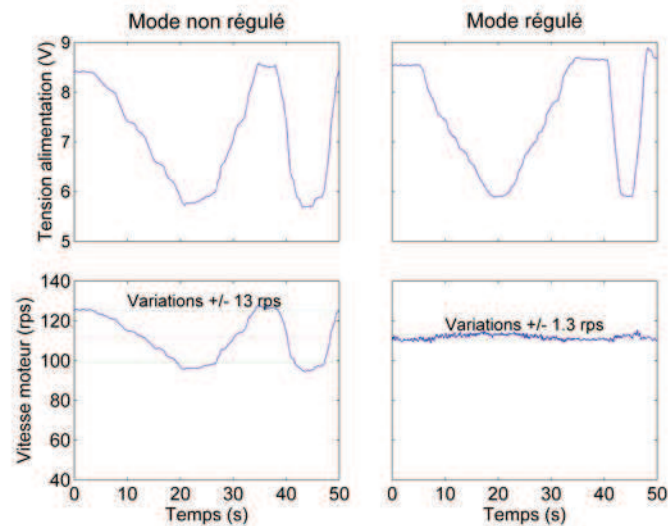


FIGURE 8.14 – Courbe de réponse du régime moteur à une consigne de 30%, en faisant varier la tension d’alimentation.

(gamme de variation : « batterie pleine→batterie vide »), nous avons pu tester la réponse à une perturbation électrique du système. Les résultats montrés en figure 8.14 ont été très concluant et montrent que la régulation de vitesse sans capteurs « sensorless » permet de réduire d’un facteur 10 l’écart-type des variations du régime moteur. Le système régulé est également précis car il régule autour de la même valeur moyenne qu’en absence de régulation. Les résultats montrent que la régulation de vitesse des pousseurs *sensorless* permet de minimiser très fortement l’influence de la tension de batterie sur les pousseurs.

III.B.3 Réalisation d’une carte « régulateur de vitesse avec capteur » de la turbine *Brushless*



FIGURE 8.15 – Variateur Hobbywing Pentium10A utilisé pour contrôler le moteur Bruhless de la turbine de sustentation (dimension : $27 \times 17 \times 6$ mm, masse : 9 g, fonction BEC : 5V/1A, courant max. continu : 10 A).

Le variateur utilisé pour commander le moteur *Brushless* (figure 8.15) possède un mode régulé (*Governor mode*) permettant de rejeter les perturbations aérodynamiques et électriques (comme la plupart des variateurs), mais des tests menés au laboratoire n'ont pas permis de confirmer ces fonctions. Nous avons alors mis en œuvre un régulateur de vitesse au moyen d'un capteur de rotation optique (figure 8.17). Ce capteur optique permet de mesurer la vitesse de rotation du moteur, il doit donc être fixé au plus proche de l'hélice du moteur. Pour cela un simple capteur à réflexion optique a été choisi. Nous avons choisi un capteur infrarouge doté d'un étage d'émission et de réception, le QRE1113 (figure 8.16).

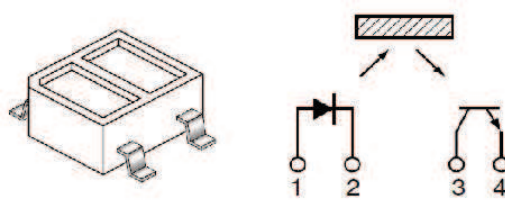


FIGURE 8.16 – Capteur infrarouge à réflexion optique QRE1113.

Ce dernier est doté d'une diode infrarouge émettant à 940 nm et d'un étage de réception qui n'est autre qu'un photo transistor sensible à l'infrarouge comme montré dans le schématique ci-dessus. Sur l'hélice du moteur « brushless » sont fixés des bandes réfléchissantes auto-adhésives qui permettront de réfléchir la lumière émise par le capteur sur sa zone sensible (figure 8.17)

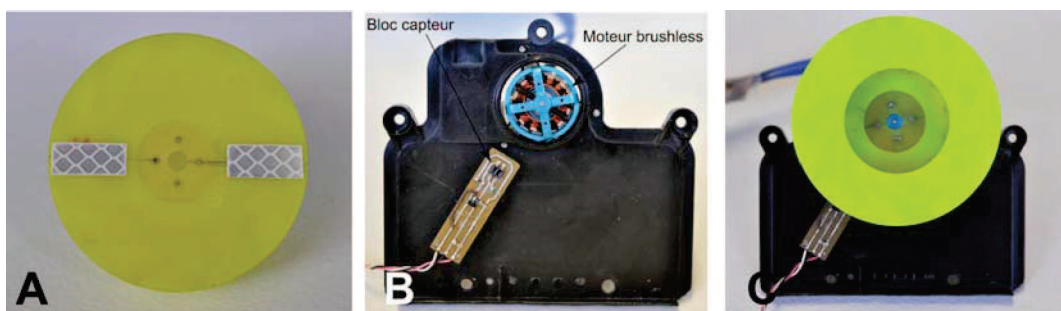


FIGURE 8.17 – (A) Deux bandes réfléchissantes adhésives sont fixées sur la turbine qui pourront réfléchir la lumière infrarouge émise par le capteur à réflexion optique infrarouge. (B-C) Capot du compartiment de la carte moteur sur lequel est fixé la turbine *Brushless* et le capteur optique (réf. : *QRE1113*).

Le signal de sortie du capteur n'étant pas saturé, un étage transistor a été rajouté

(figure 8.18) fonctionnant en bloqué/saturé pour avoir un signal en créneaux pouvant être interprété par le périphérique d' *Input Capture* du dsPIC.

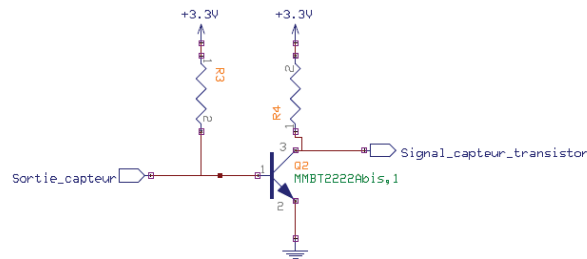


FIGURE 8.18 – Schéma de connexion du capteur au transistor.

En sortie du transistor, le capteur a un fonctionnement à l'état haut, lorsqu'un catadioptré passe sous le capteur, le signal de sortie du transistor passe de 0 à Vdd (ici 3.3V). Un transistor NPN (MMBT2222) (figure 8.18) dans un boîtier SOT-23 d'une dimension de $2.9 \times 1.9 \text{ mm}$ a été utilisé pour effectuer cette fonction. La figure 8.17 montre le capteur monté sur la carcasse sur lequel est fixée la turbine de sustentation. L'hélice est collée sur une plaque d'époxy qui est elle-même vissée sur la cage tournante du moteur *Brushless* à l'aide de quatre vis.

Le calculateur *dsPIC33FJ128MC804* de la carte moteur ne disposant pas de suffisamment d'entrées/sorties disponibles, nous avons utilisé un capteur supplémentaire basé sur un *dsPIC30F2010*. Une petite carte a alors été créée dont le schéma fonctionnel est donné en figure 8.19.

A l'aide d'un outil de prototypage rapide (*Embedded Target for microchip dsPIC*, décrit précisément sur www.kerhuel.eu/RTWWdsPIC), nous avons créé un programme à télécharger dans le *dsPIC30F2010* qui se charge de contrôler, via une régulation en boucle fermée de la vitesse du moteur *Brushless* en utilisant un correcteur Proportionnel-Intégral (figure 8.20).

Les résultats obtenus en variations lentes (à partir d'une batterie) et rapides (GBF) de la tension d'alimentation montrent que le système rejette toute perturbations électriques (figures 8.21&8.22). Une étude de l'écart-type des variations du régime moteur montrent qu'elles sont réduites d'un facteur 9 lorsque la régulation est activée. On remarquera que l'autonomie de la batterie baisse légèrement lorsque la régulation de vitesse est activée (figure 8.21). Cette observation montre que le régulateur compense la chute de tension de la batterie en générant une commande plus grande, ce qui a eu pour conséquence de consommer un peu plus d'énergie mais de garantir un régime

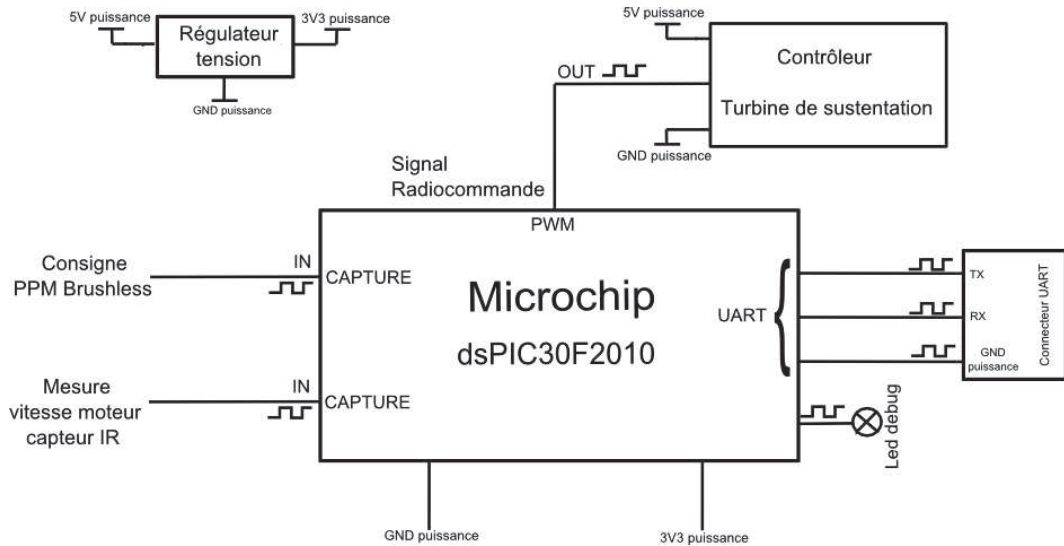


FIGURE 8.19 – Schéma de la carte électronique *Brushless* permettant la régulation en vitesse, avec un capteur infrarouge, de la turbine de sustentation *Brushless*.

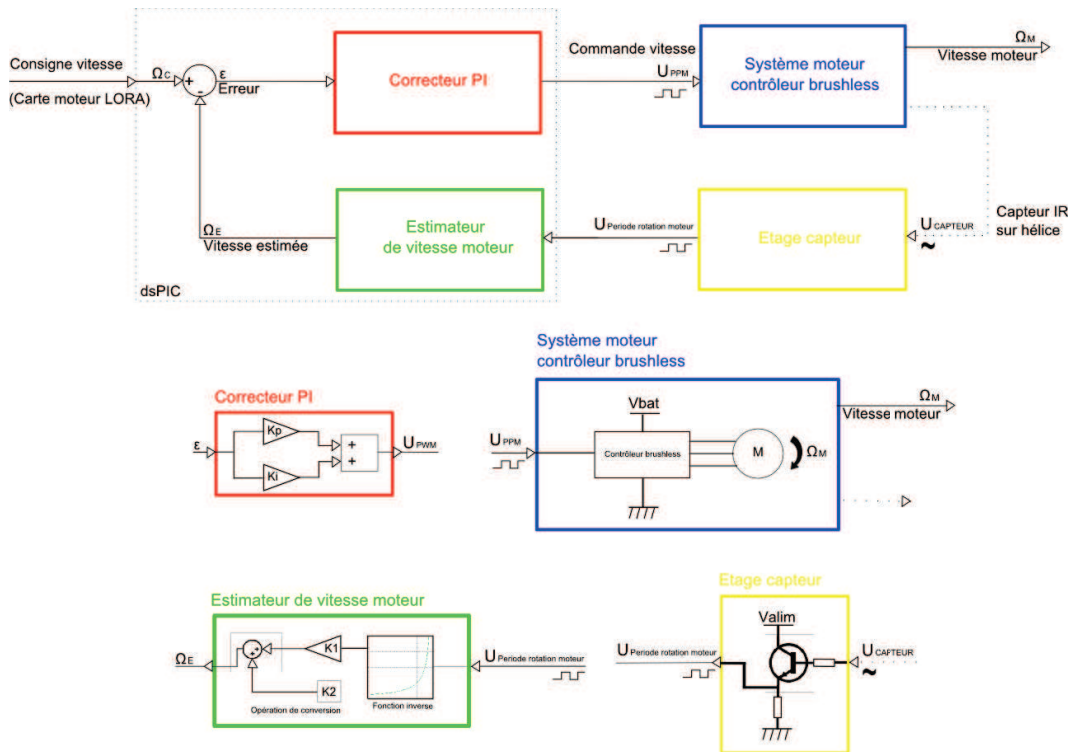


FIGURE 8.20 – Schéma bloc du régulateur de vitesse de la turbine *Brushless*. L'étage capteur (en jaune) génère un signal PWM envoyé, relatif à la période de rotation du moteur, à l'étage *Input Capture* du dsPIC qui estime la vitesse de rotation (bloc vert). Le correcteur PI de la boucle de régulation permet de contrôler la vitesse de rotation du moteur, via le variateur, en générant un signal PPM.

moteur que l'on peut considérer indépendant de la tension de batterie.

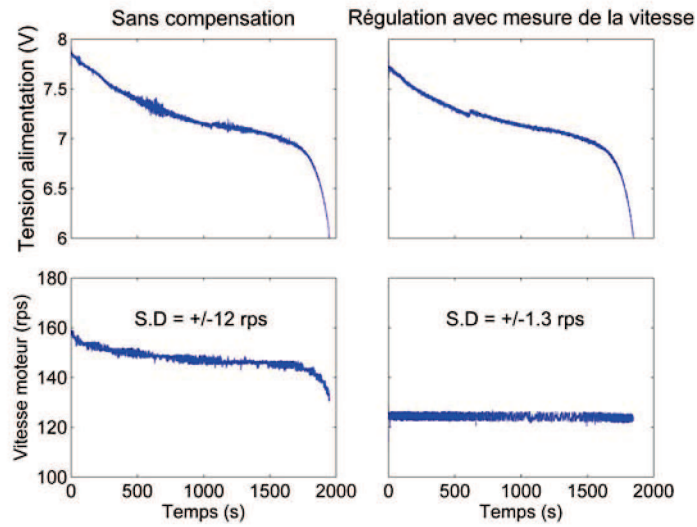


FIGURE 8.21 – Comparaison du régime moteur avec et sans régulation de vitesse de la turbine *Brushless* en variation lente. La carte moteur ainsi que la carte de régulation *Brushless* est alimentée avec une batterie 2S 2200mAh chargée au maximum

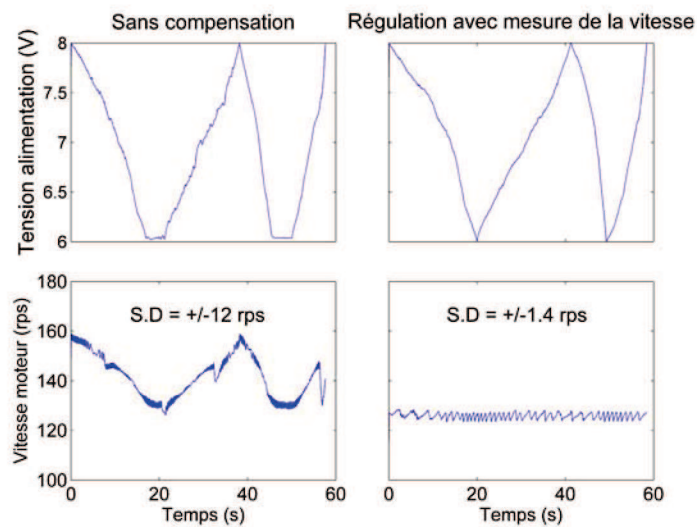


FIGURE 8.22 – Schéma de la carte électronique *Brushless* permettant la régulation en vitesse, avec un capteur infrarouge, de la turbine de sustentation *Brushless*.

Synoptique de la carte « régulateur de vitesse sans capteurs » et de la carte « régulateur de vitesse avec capteurs »

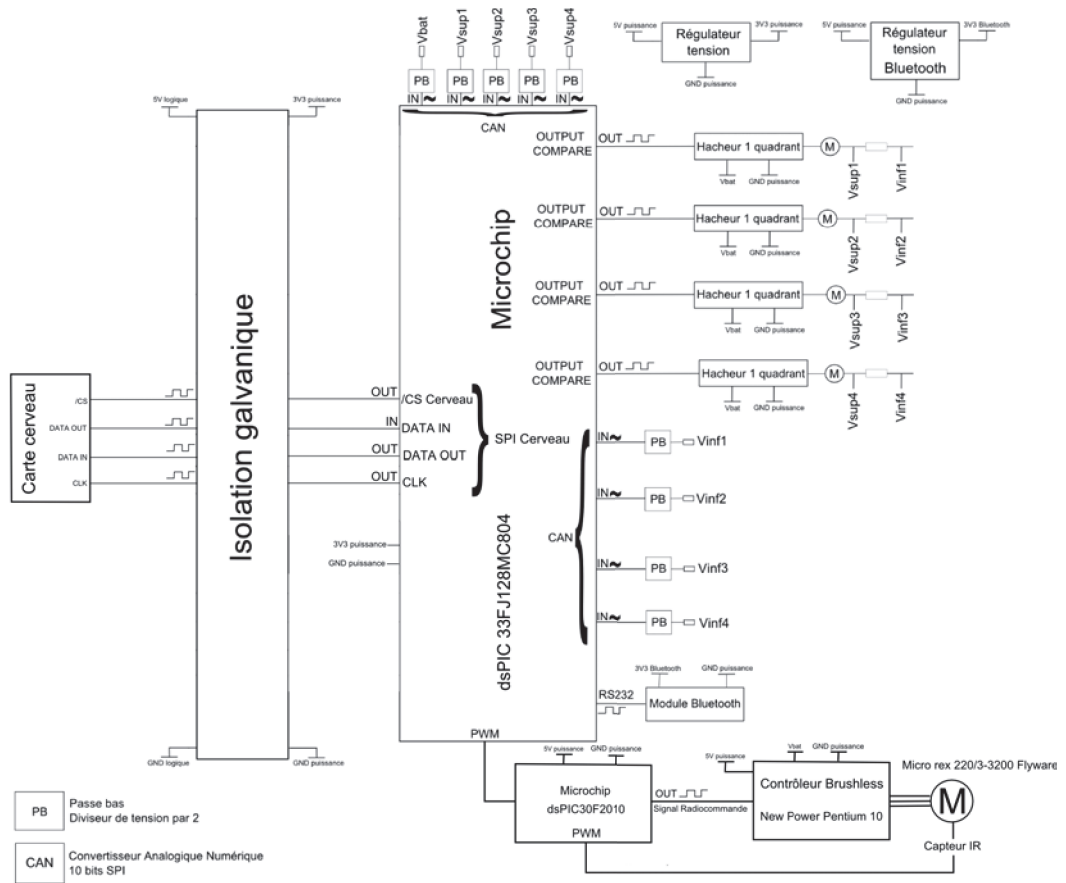


FIGURE 8.23 – Synoptique de la carte « régulateur de vitesse sans capteurs » et de la carte « régulateur de vitesse avec capteurs ». La carte cerveau communique les commandes des actionneurs à cet ensemble de carte via un port SPI.

Bibliographie

- D. Abbott, A. Bouzerdoum, and K. Eshraghian. Future directions for motion detection based on the parallel computational intelligence of insects. In *Proc. of the 23rd Euromicro Conf. (EUROMICRO)*., pages 244–249, 1997.
- A. P. Aguiar, L. Cremean, and J. P. Hespanha. Position tracking for a nonlinear underactuated hovercraft : Controller design and experimental results. In *Proc. of the 42nd IEEE Conf. on Decision and Control*, volume 4, pages 3858–3863, 2003.
- S. Amic. Intégration des fonctions de détection des mouvements par le traitement parallèle des signaux visuels. Master’s thesis, École Nationale Supérieure d’Électronique et de Radioélectricité de Grenoble (ENSERG/INPG)., 2002.
- O. Amidi, T. Kanade, and K. Fujita. A visual odometer for autonomous helicopter flight. *Robotics and Autonomous Systems*, 28(2) :185–193, 1999.
- A. A. Argyros, D. P. Tsakiris, and C. Groyer. Biomimetic centering behavior mobile robots with panoramic sensors. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 11(4) : 21–30, 2004.
- F. Aubépart and N. Franceschini. Bio-inspired optic flow sensors based on FPGA : Application to Micro-Air Vehicles. *Microprocessors and Microsystems*, 31 :408–419, 2007.
- F. Aubépart, M. Ménouni, T. Loubignac, B. Dinkelspieler, and N. Franceschini. Capteur de flux optique basé sur une rétine intégrée et un fpga. In *Colloque Interdisciplinaire en Instrumentation*, pages 508–520, 2007.
- E. Baird, M. V. Srinivasan, S. Zhang, and A. Cowling. Visual control of flight speed in honeybees. *J. Exp. Biol.*, 208(20) :3895–3905, 2005.
- E. Baird, M. V. Srinivasan, S. Zhang, R. Lamont, and A. Cowling. Visual control of flight speed and height in the honeybee. In Stefano Nolfi, Gianluca Baldassarre, Raffaele Calabretta, John Hallam, Davide Marocco, Jean-Arcady Meyer, Orazio

- Miglino, and Domenico Parisi, editors, *From Animals to Animats 9*, volume 4095, pages 40–51. Springer Berlin / Heidelberg, 2006. ISBN 978-3-540-38608-7.
- E. Baird, T. Kornfeldt, and M. Dacke. Minimum viewing angle for visually guided ground speed control in bumblebees. *J. Exp. Biol.*, 213 :1625–1632, 2010.
- G. Baratoff, C. Toepfer, and H. Neumann. Combined space-variant maps for optical flow navigation. *Biol. Cyber.*, 83(3) :199–209, 2000.
- D. B. Barber, S. R. Griffiths, T. W. McLain, and R. W. Beard. Autonomous landing of miniature aerial vehicles. *J. of Aerospace Computing, Information, and Communication*, 4(5) :770–784, 2007.
- R. M. Barrett. Adaptive aerostructures : the first decade of flight on uninhabited aerial vehicles. In *Smart Structures and Materials*, pages 190–201. Int. Soc. for Optics and Photonics, 2004.
- A. Barron and M. V. Srinivasan. Visual regulation of ground speed and headwind compensation in freely flying honey bees (*apis mellifera* l.). *J. Exp. Biol.*, 209(5) : 978–984, 2006.
- J. L. Barron, D. J. Fleet, and S. S. Beauchemin. Performance of optical flow techniques. *Int. J. of Computer Vision*, 12(1) :43–77, 1994.
- G. L. Barrows and C. Neely. Mixed-mode VLSI optic flow sensors for in-flight control of a Micro Air Vehicle. In *SPIE : Critical technologies for the future of computing*, volume 4109, pages 52–63, 2000.
- J. C. Bazin, C. Démonceaux, I. S. Vasseur, P., and Kweon. Motion estimation by decoupling rotation and translation in catadioptric vision. *Computer Vision and Image Understanding*, 114(2) :254–273, 2010.
- C. Bermes, S. Bouabdallah, D. Schafroth, and R. Siegwart. Design of the autonomous micro helicopter mufly. *Mechatronics*, 21(5) :765–775, 2011.
- S. Bermudez i Badia and P.F.M.J. Verschure. The origin and role of non-linearities in the collision avoidance system of the locust. In *Proc. of the Flying Insects and Robots Symposium (FIR)*, pages 3–4, 2007.
- S. Bermudez i Badia, U. Bernardet, and P.F.M.J. Verschure. Non-linear neuronal responses as an emergent property of afferent networks : A case study of the locust lobula giant movement detector. *PLoS Computational Biology*, 6(3) :Lyle J. Graham, 2010.

- A. Beyeler, J.-C. Zufferey, and D. Floreano. Vision-based control of near-obstacle flight. *Autonomous Robots*, 27(3) :201–219, 2009.
- L. G. Bishop. The spectral sensitivity of motion detector units recorded in the optic lobe of the honeybee. *Zeitschrift für vergleichende Physiologie*, 70(4) :374–381, 1970.
- C. Blanes. Appareil visuel élémentaire pour la navigation à vue d’un robot mobile autonome (Adviser : N. Franceschini). Master’s thesis, 1986.
- C. Blanes. *Guidage visuel d’un robot mobile autonome d’inspiration bionique* (Adviser : N. Franceschini). PhD thesis, INP Grenoble, 1991.
- M. Bloesch, S. Weiss, D. Scaramuzza, and R. Siegwart. Vision based mav navigation in unknown and unstructured environments. In *Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 21–28. IEEE, 2010.
- F. Bohorquez, P. Samuel, J. Sirohi, D. Pines, L. Rudd, and R. Perel. Design, analysis and hover performance of a rotary wing micro air vehicle. *J. of the American Helicopter Soc.*, 48(2) :80–90, 2003.
- A. Borst. *Drosophila’s* view on insect vision. *Curr. Biol.*, 19(1) :R36–R47, 2009.
- A. Borst and J. Haag. Neural networks in the cockpit of the fly. *J. of Comp. Physiol. A*, 188(6) :419–437, 2002.
- A. Borst, J. Haag, and D. F. Reiff. Fly motion vision. *Annual review Neurosci.*, 33 : 49–70, 2010.
- S. Bouabdallah. *Design and control of quadrotors with application to autonomous flying*. PhD thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2007.
- S. Bouabdallah, R. Siegwart, and G. Caprari. Design and control of an indoor coaxial helicopter. In *Proc. of Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, China, October 2006.
- R. S. A. Brinkworth, P. A. Shoemaker, and D. C. O’Carroll. Characterization of a neuromorphic motion detection chip based on insect visual system. In *5th Int. Conf. on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISS-NIP)*, pages 289–294, Melbourne, Australia, December 2009.

- A. Bry, A. Bachrach, and N. Roy. State estimation for aggressive flight in gps-denied environments using onboard sensing. In *Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), 2012*, pages 1–8, St Paul, USA, May 2012.
- E. Buchner. *Photoreception and vision in insects*, chapter Behavioral analysis of spatial vision in insects, pages 561 – 621. Plenum Press, New York London, 1984.
- R. Carelli, C. Soria, O. Nasisi, and E. Freire. Stable agv corridor navigation with fused vision-based controls signals. In *Proc. the 28th IEEE Conf. of Industrial Electronics S. (IECON)*, volume 3, pages 2433–2438, Sevilla, Spain, November 2002.
- P. Castillo, R. Lozano, and A. Dzul. Stabilization of a mini rotorcraft with four rotors. *IEEE Control Systems Magazine*, 25(6) :45–55, 2005.
- R. P. M. Chan, A. H. Mulla, and K. A. Stol. Characterisation of low-cost optical flow sensors. In *Proc. of the IEEE of the Australasian Conf. on Robotics and Automation (ACRA)*, pages 1–8, Brisbane, Australia, December 2010.
- T. S. Collett, H. Nalbach, and H. Wagner. *Visual stabilization in arthropods*, pages 239–263. Elsevier, 1993.
- S. Collins. Reconstructing the visual field of compound eyes. In *Rendering Techniques’ 97*, pages 81–92. Springer, 1997.
- J. Conroy, G. Gremillion, B. Ranganathan, and J. S. Humbert. Implementation of wide-field integration of optic flow for autonomous quadrotor navigation. *Autonomous robots*, 27(3) :189–198, 2009.
- D. Coombs and K. Roberts. “Bee-bot” : using peripheral optical flow to avoid obstacles. In *S. of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conf. Series*, volume 1825, pages 714–721, Boston, USA, September 1992.
- L. Cremean, W. B. Dunbar, D. van Gogh, J. Hickey, E. Klavins, J. Meltzer, and R. M. Murray. The Caltech Multi-Vehicle Wireless Testbed. In *Proc. of the 41st IEEE Conf. on Decision and Control (CDC)*, volume 1, pages 86–88, Las Vegas, USA, December 2002.
- H. Dahmen, A. Millers, and H. A. Mallot. Insect inspired odometry by optic flow recorded with optical mouse chips. In D. Floreano, J. C. Zufferey, M. V. Srinivasan, and C. Ellington, editors, *Flying insects and robots*, pages 115–126. Berlin : Springer, 2009.

- C. T. David. Compensation for height in the control of groundspeed by drosophila in a new "barber's pole" wind tunnel. *J. Comp. Physiol. A*, 147(4) :485–493, 1982.
- E. R. Davies. *Machine vision : theory, algorithms, practicalities*. Morgan Kaufmann, 2004.
- T. Delbrück and C. Mead. Analog vlsi phototransduction. *Signal*, 10(3) :10, 1994.
- A. Dev, B. Kröse, and F. Groen. Navigation of a mobile robot on a temporal development of the optic flow. In *Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 558–563, Grenoble, France, September 1997.
- J. K. Douglass and N. J. Strausfeld. Visual motion-detection circuits in flies : parallel direction- and non-direction-sensitive pathways between the medulla and lobula plate. *J. Neurosci.*, 16(15) :4551–4562, 1996.
- A. P. Duchon and W. H. Warren. Robot navigation from a gibsonian viewpoint. In *IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cyber. "Humans, Information and Technology"*, volume 3, pages 2272–2277, San Antonio, USA, October 1994.
- P.-E. J. Duhamel, N. O. Perez-Arancibia, G. L. Barrows, and R. J. Wood. Altitude feedback control of a flapping-wing microrobot using an on-board biologically inspired optical flow sensor. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 4228–4235, Minnesota, USA, May 2012.
- M. Egelhaaf and A. Borst. A look into the cockpit of the fly : visual orientation, algorithms, and identified neurons. *J. Neurosci.*, 13(11) :4563–4574, 1993.
- W. P. Eheim and R. Wehner. Die sehfelder der zentralen ommatidien in den appositionsaugen von *apis mellifica* und *cataglyphis bicolor* (apidae, formicidae ; hymenoptera). *Kybernetik*, 10(3) :168–179, 1972.
- H. Eichner, M. Joesch, B. Schnell, D. F. Reiff, and A. Borst. Internal structure of the fly elementary motion detector. *Neuron*, 70(6) :1155–1164, 2011.
- C. P. Ellington. The aerodynamics of hovering insect flight. i. the quasi-steady analysis. *Phil. Trans. of the Royal S. Lond.. B, Biol. Sciences*, 305(1122) :1–15, 1984.
- H. Esch, W. Nachtigall, and S. N. Kogge. Correlations between aerodynamic output, electrical activity in the indirect flight muscles and wing positions of bees flying in a servomechanically controlled wind tunnel. *J. Comp. Physiol. A : Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiol.*, 100(2) :147–159, 1975.

- F. Expert and F. Ruffier. Controlling docking, altitude and speed in a circular high-roofed tunnel thanks to the optic flow. In *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 1125–1132, Vilamoura, Portugal, October 2012.
- F. Expert, S. Viollet, and F. Ruffier. A mouse sensor and a 2-pixel motion sensor exposed to continuous illuminance changes. In *IEEE Sensors 2011 Conf.*, pages 974–977, Limerick, Ireland, October 2011a.
- F. Expert, S. Viollet, and F. Ruffier. Outdoor field performances of insect-based visual motion sensors. *J. of Field Robotics*, 28(4) :974–977, October 2011b.
- F. Expert, F. L. Roubieu, and F. Ruffier. Interpolation based « time of travel » scheme in a visual motion sensor using a small 2d retina. In *IEEE Sensors Conf.*, pages 2231–2234, Taipei, Taiwan, October 2012.
- I. Fantoni and R. Lozano. *Non-linear control for underactuated mechanical systems*. Springer, 2002.
- R. Faust. Untersuchungen zum halterenproblem. *Zool Jahrb Physiol*, 63 :325–366, 1952.
- R. S. Fearing, S. Avadhanula, D. Campolo, M. Sitti, J. Yan, R. Wood, and D. R. Ayers. A micromechanical flying insect thorax. *Neurotechnology for Biomimetic Robots*, pages 469–480, 2002.
- D. Floreano, R. Pericet-Camara, S. Viollet, F. Ruffier, A. Brückner, R. Leitel, W. Buss, M. Menouni, F. Expert, R. Juston, M. K. Dobrzynska, G. L’Eplattenier, F. Recktenwalde, H. A. Mallote, and N. Franceschini. Miniature curved artificial compound eyes. *Proc. of the National Academy of Sciences (PNAS)*, page (in press), 2013.
- N. Franceschini. *Photoreceptor Optics*, chapter Sampling of the Visual Environment by the Compound Eye of the Fly : Fundamentals and Applications, pages 98–125. Springer, Berlin, 1975.
- N. Franceschini. Early processing of colour and motion in a mosaic visual system. *Neuroscience Research (Suppl. 2)*, pages 17–49, 1985.
- N. Franceschini and K. Kirschfeld. Les phénomènes de pseudopupille dans l’oeil composé de *Drosophila*. *Kybernetik*, 9(5) :159–182, 1971.

- N. Franceschini, A. Riehle, and A. Le Nestour. *Facets of vision*, chapter Directionally Selective Motion Detection by Insect Neurons, pages 360–390. Springer-Verlag, Berlin, 1989.
- N. Franceschini, J. M. Pichon, and C. Blanes. From insect vision to robot vision. *Phil. Trans. of the Royal S. B : Biol. Sciences*, 337 :283–294, 1992.
- N. Franceschini, F. Ruffier, and J. Serres. A bio-inspired flying robot sheds light on insect piloting abilities. *Curr. Biol.*, 17 :329 – 335, 2007.
- N. Franceschini, F. Ruffier, J. Serres, and S. Viollet. *Aerial vehicles*, chapter 35 : Optic flow based visual guidance : from flying insects to miniature aerial vehicles, pages 747–770. Vienna : In-Tech, 2009.
- S. Fuller and R. M. Murray. A hovercraft robot that uses insect-inspired visual autocorrelation for motion control in a corridor. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pages 1474–1481, Karon Beach, Phuket, December 2011.
- M. A. Garratt and J. S. Chahl. Vision-based terrain following for an unmanned rotorcraft. *J. of Field Robotics*, 25(4-5) :284–301, 2008.
- J. J. Gibson. *The perception of the visual world*. Houghton Mifflin, New York, 1950.
- J. J. Gibson. Visually controlled locomotion and visual orientation in animals*. *British J. of psychology*, 49(3) :182–194, 1958.
- M. Giurfa. Cognitive neuroethology : dissecting non-elemental learning in a honeybee brain. *Current opinion in neurobiology*, 13(6) :726–735, 2003.
- M. Giurfa. Behavioral and neural analysis of associative learning in the honeybee : a taste from the magic well. *J. Comp. Physiol. A*, 193(8) :801–824, 2007.
- L. Goodman. *Form and function in the honeybee*. Int. Bee Research Association, 2003.
- K. G. Götz. Optomotorische untersuchung des visuellen systems einiger augenmutanten der fruchtfliege drosophila. *Kybernetik*, 2(2) :77–92, 1964.
- K. G. Götz. Die optischen übertragungseigenschaften der komplexaugen von drosophila. *Kybernetik*, 2(5) :215–221, 1965.

- W. E. Green, P. Y. Oh, and G. Barrows. Flying insect inspired vision for autonomous aerial robot maneuvers in near-earth environments. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, volume 3, pages 2347–2352, New-Orleans, USA, April 2004.
- S. Griffiths, J. Saunders, A. Curtis, B. Barber, T. McLain, and R. Beard. Maximizing miniature aerial vehicles. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 13 :34–43, 2006.
- S. Griffiths, J. Saunders, A. Curtis, B. Barber, T. McLain, and R. Beard. Obstacle and terrain avoidance for miniature aerial vehicles. In *Advances in Unmanned Aerial Vehicles*, pages 213–244. Springer, 2007.
- Y. Gu, J. Oberwinkler, M. Postma, and R. C. Hardie. Mechanisms of light adaptation in *Drosophila* photoreceptors. *Current Biol.*, 15(13) :1228–1234, 2005.
- N. Guenard, T. Hamel, and R. Mahony. A practical visual servo control for an unmanned aerial vehicle. *Trans. on Robotics*, 24(2) :331–340, 2008.
- M. S. Guzel and R. Bicker. Optical flow based system design for mobile robots. In *IEEE Conf. on Robotics Automation and Mechatronics (RAM), 2010*, pages 545–550, Singapore, June 2010.
- R. C. Hardie. Functional organisation of fly retina. In D. Ottoson, editor, *Progress in sensory Physiol.*, volume 5. Berlin : Springer, 1985.
- R. R. Harrison. A biologically inspired analog ic for visual collision detection. *IEEE Trans. on Circuits and Sys. I : Regular Papers*, 52(11) :2308–2318, 2005.
- R. R. Harrison and C. Koch. A robust analog VLSI motion sensor based on the visual system of the fly. *Autonomous Robots*, 7(3) :211–224, 1999.
- R. R. Harrison and C. Koch. A silicon implementation of the fly’s optomotor control system. *Neural Comput.*, 12(10) :2291–2304, 2000.
- K. Hausen. Motion sensitive interneurons in the optomotor system of the fly. i. *Biol. Cyber.*, 45(2) :143–156, 1982a.
- K. Hausen. Motion sensitive interneurons in the optomotor system of the fly. ii. *Biol. Cyber.*, 46 :67–79, 1982b.
- K. Hausen. *Photoreception and Vision in Invertebrates*, chapter The lobula-complex of the fly : structure, function and significance in visual behaviour, pages 523–559. Plenum, New York, 1984.

- K. Hausen and M. Egelhaaf. Neural mechanisms of visual course control in insects. In *Facets of vision*, pages 391–424. Springer, 1989.
- M. Heisenberg and R. Wolf. *Vision in Drosophila. Genetics of microbehaviour*. Springer Verlag, 1984.
- R. Hengstenberg. Mechanosensory control of compensatory head roll during flight in the blowfly *Calliphora erythrocephala* Meig. *J. Comp. Physiol. A*, 163(2) :151–165, 1988.
- R. Hengstenberg. Biological sensors : Controlling the fly’s gyroscopes. *Nature*, 392(6678) :757–758, 1998.
- B. Herisse, T. Hamel, R. Mahony, and F.-X. Russotto. A nonlinear terrain-following controller for a vtol unmanned aerial vehicle using translational optical flow. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 3251–3257, Kobe, Japan, May 2009.
- B. Herisse, T. Hamel, R. Mahony, and F.-X. Russotto. Landing a VTOL Unmanned Aerial Vehicle on a moving platform using optical flow. *IEEE Trans. on Robotics*, 28(1) :77–89, 2012.
- C. M. Higgins and V. Pant. A biomimetic vlsi sensor for visual tracking of small moving targets. *IEEE Trans. on Circuits and Sys. I : Regular Papers*, 51(12) : 489–502, 2005.
- G. M. Hoffmann, H. Huang, S. L. Waslander, and C. J. Tomlin. Quadrotor helicopter flight dynamics and control : Theory and experiment. In *Proc. of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf.*, pages 1–20, Hilton Head, South Carolina, August 2007.
- D. Honegger, L. Meier, P. Tanskanen, and M. Pollefeys. An open source and open hardware embedded metric optical flow cmos camera for indoor and outdoor applications. In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, page in press, Karlsruhe, Germany, May 2013.
- B. K. P. Horn. *Robot vision*. the MIT Press, 1986.
- Eberhard Horn and Rüdiger Wehner. The mechanism of visual pattern fixation in the walking fly, *Drosophila melanogaster*. *Journal of comparative physiology*, 101(1) : 39–56, 1975.

- G. A. Horridge. Insects which turn and look. *Endeavour*, 1 :7–17, 1977.
- S. Hrabar and G. Sukhatme. Vision-based navigation through urban canyons. *J. of Field Robotics*, 26(5) :431–452, 2009.
- S. Hrabar and G. S. Sukhatme. Omnidirectional vision for an autonomous helicopter. In *Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation*, volume 1, pages 558–563, Taipei, Taiwan, May 2003.
- S. Hrabar and G. S. Sukhatme. Optimum camera angle for optic flow-based centering response. In *Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pages 3922–3927, Beijing, China, October 2006. IEEE.
- S. Hrabar, G. Sukhatme, P. Corke, K. Usher, and J. Roberts. Combined optic-flow and stereo-based navigation of urban canyons for a UAV. In *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 3309–3316, Los Angeles, USA, August 2005.
- J. S. Humbert and A. M. Hyslop. Bioinspired visuomotor convergence. *IEEE Trans. on Robotics*, 26(1) :121–130, 2010.
- J. S. Humbert, R. M. Murray, and M. H. Dickinson. A control-oriented analysis of bio-inspired visuomotor convergence. In *44th IEEE Conf. on Decision and Control and European Control Conf. (CDC-ECC)*, pages 245–250, Seville, Spain, December 2005.
- J. S. Humbert, A. M. Hyslop, and M. Chinn. Experimental validation of wide-field integration methods for autonomous navigation. In *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 2144–2149, San Diego, USA, October 2007.
- M. R. Ibbotson. Wide-field motion-sensitive neurons tuned to horizontal movement in the honeybee, *apis mellifera*. *J. Comp. Physiol. A*, 168(1) :91–102, 1991.
- M. R. Ibbotson. Evidence for velocity-tuned motion-sensitive descending neurons in the honeybee. *Proc. R. S. Lond.. Series B : Biol. Sciences*, 268(1482) :2195–2201, 2001.
- M. R. Ibbotson and L. J. Goodman. Response characteristics of four wide-field motion-sensitive descending interneurons in *Apis Mellifera*. *J. Exp. Biol.*, 148(1) : 255–279, 1990.

- F. Iida. Goal-directed navigation of an autonomous flying robot using biologically inspired cheap vision. In *Proc. of the 32nd Int. Symposium on Robotics (ISR)*, volume 21, pages 1404–1409, Seoul, South Korea, April 2001.
- G. Indiveri, J. Kramer, and C. Koch. Analog vlsi architecture for computing heading direction. In *Proc. of the Intelligent Vehicles Symp.*, pages 24–29, 1995.
- G. Indiveri, J. Kramer, and C. Koch. Parallel analog vlsi architectures for computation of heading direction and time-to-contact. *Advances in Neural Information Processing Systems*, pages 720–728, 1996a.
- G. Indiveri, J. Kramer, and C. Koch. System implementations of analog vlsi velocity sensors. *IEEE Micro*, 16(5) :40–49, 1996b.
- J. D. Jackson, D. W. Callahan, and J. Marstrander. A rationale for the use of optical mice chips for economic and accurate vehicle tracking. In *Proc. IEEE Int. Conf. on Automation Science and Engineering CASE*, pages 939–944, Scottsdale, USA, September 2007.
- Z. Jin, S. Waydo, E. B. Wildanger, M. Lammers, H. Scholze, P. Foley, D. Held, and R. M. Murray. MVWT-II : the second generation Caltech Multi-Vehicle Wireless Testbed. In *Proc. of the 2004 American Control Conf.*, volume 6, pages 5321–5326, Boston, USA, July 2004.
- W. Kaiser and E. Liske. Die optomotorischen reaktionen von fixiert fliegenden bienen bei reizung mit spektrallichtern. *J. Comp. Physiol. A*, 89(4) :391–408, 1974.
- F. Kendoul, I. Fantoni, and K. Nonami. Optic flow-based vision system for autonomous 3D localization and control of small aerial vehicles. *Robotics and Autonomous Systems*, 57(6-7) :591–602, 2009a.
- F. Kendoul, K. Nonami, I. Fantoni, and R. Lozano. An adaptive vision-based autopilot for mini flying machines guidance, navigation and control. *Autonomous Robots*, 27(3) :165–188, 2009b.
- J. S. Kennedy. The visual responses of flying mosquitoes. In *Proc. of the Zoological S. Lond.*, volume 109(4), pages 221–242. Wiley Online Library, 1939.
- J. S. Kennedy. The migration of the desert locust (*schistocerca gregaria* forsk.). i. the behaviour of swarms. ii. a theory of long-range migrations. *Phil. Trans. R. S. Lond.. Series B, Biol. Sciences*, pages 163–290, 1951.

- W. H. Kirchner and M. V. Srinivasan. Freely flying honeybees use image motion to estimate object distance. *Naturwissenschaften*, 76(6) :281–282, 1989.
- K. Kirschfeld and N. Franceschini. Optische eigenschaften der ommatidien im komplexauge von musca. *Biol. Cyber.*, 5 :47–52, 1968.
- H. C. Ko, M. P. Stoykovich, J. Song, V. Malyarchuk, M. Choi, W., C.-J. Yu, Joseph B. Geddes, I., J. Xiao, S. Wang, Y. Huang, and J. A. Rogers. A hemispherical electronic eye camera based on compressible silicon optoelectronics. *Nature*, 454(7205) :748–753, 2008.
- J. J. Koenderink. Optic flow. *Vision research*, 26(1) :161–179, 1986.
- J. J. Koenderink and A. J. van Doorn. Facts on optic flow. *Biol. Cyber.*, 56 :247–254, 1987a.
- J. J. Koenderink and A. J. van Doorn. Representation of local geometry in the visual system. *Biol. Cyber.*, 55(6) :367–375, 1987b.
- J. Krammer and C. Koch. Pulse-based analog VLSI velocity sensors. *IEEE Trans. on Circuits and Systems II : Analog and Digital Signal Processing*, 44(2) :86–101, 1997.
- H. G. Krapp, B. Hengstenberg, and R. R. Hengstenberg. Dendritic structure and receptive-field organisation of optic flow processing interneurons in the fly. *J of Neurophysiol*, 79 :1902–1917, 1998.
- I. Kroo and P. Kunz. Mesoscale flight and miniature rotorcraft development. *Fixed and Flapping Wing Aerodynamics for Micro Air Vehicle Applications*, pages 503–517, 2001.
- L. P. S. Kuenen and T. C. Baker. Optomotor regulation of ground velocity in moths during flight to sex pheromone at different heights. *Physiol. Entomol.*, 7(2) :193–202, 1982.
- P. Kunze. Untersuchung des bewegungssehens fixiert fliegender bienen. *Zeitschrift für vergleichende Physiologie*, 44(6) :656–684, 1961.
- T. Labhart. Specialized photoreceptors at the dorsal rim of the honeybee’s compound eye : polarizational and angular sensitivity. *J. Comp. Physiol.*, 141(1) :19–30, 1980.
- M. F. Land and T. S. Collett. A survey of active vision in invertebrates. *From living eyes to seeing machines*, pages 16–36, 1997.

- S.B. Laughlin and M. Weckstrom. Fast and slow photoreceptors - a comparative study of the functional diversity of coding and conductances in the diptera. *J. of Comp. Physiol. A*, 172(5) :593–609, 1993.
- N. F. Lepora, P. Paul Verschure, and T. J. Prescott. The state of the art in biomimetics. *Bioinspiration & Biomimetics*, 8 :013001, 2013.
- J. Li and R. Chellappa. A factorization method for structure from planar motion. In *Seventh IEEE Workshops on Application of Computer Vision (WACV/MOTIONS'05) Vol. 1*, volume 2, pages 154–159, 2005.
- S. C. Liu and A. Usseglio-Viretta. Fly-like visuomotor responses of a robot using a VLSI motion-sensitive chips. *Biol. Cyber.*, 85(6) :449–457, 2001.
- B. D. Lucas and T. Kanade. An iterative image registration technique with an application to stereo vision. In *Proc. of the 7th Int. joint Conf. on Artificial intelligence*, 1981.
- K. Y. Ma, P. Chirarattananon, S. B. Fuller, and R. J. Wood. Controlled flight of a biologically inspired, insect-scale robot. *Science*, 340(6132) :603–607, 2013.
- N. Martin and N. Franceschini. Obstacle avoidance and speed control in a mobile vehicle equipped with a compound eye. In *Proc. of the Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, pages 381–386, Paris, France, October 1994.
- C. Mead. *Analog VLSI and neural systems*. Reading, MA : Addison-Wesley, 1989.
- R. Menzel and W. Backhaus. *Vision and visual dysfunction : the perception of color*, chapter Color vision in insects, pages 262 – 288. Macmillan : London, 1991.
- R. Menzel and M. Giurfa. Cognitive architecture of a mini-brain : the honeybee. *Trends in cognitive sciences*, 5(2) :62–71, 2001.
- K. T. Miller and G. L. Borrows. Feature tracking linear optic flow sensor chip. In *Proc. of the IEEE Int. Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, volume 5, pages 116–119, 1999.
- R. Moeckel and S.-C. Liu. Motion detection circuits for a time-to-travel algorithm. In *IEEE Int. Symp. on Circuits and Sys. (ISCAS 2007)*., pages 3079–3082, 2007.
- R. Moeckel and S.-C. Liu. Motion detection chips for robotic platforms. In and Zufferey J.-C. and Srinivasan M. V. and C. Elington Floreano, D., editor, *Flying Insects and Robots*, chapter 8, pages 101–114. Springer Verlag, Berlin, 2009.

- A. Moini. *Vision chips*. Kluwer Academic Pub, 2000.
- F. Mura and N. Franceschini. Visual control of altitude and speed in a flying agent. *From animals to animats*, 3 :91–99, 1994.
- F. Mura and N. Franceschini. Obstacle avoidance in a terrestrial mobile robot provided with a scanning retina. In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, pages 47–52, Tokyo, Japan, September 1996.
- L. Muratet, S. Doncieux, Y. Briere, and J. A. Meyer. A contribution to vision-based autonomous helicopter flight in urban environments. *Robotics and Autonomous Systems*, 50(4) :195–209, 2005.
- G. Nalbach. The halteres of the blowfly *Calliphora*. *J. of Comp. Physiol. A*, 173(3) : 293–300, 1993.
- G. Nalbach. Extremely non-orthogonal axes in a sense organ for rotation : behavioural analysis of the dipteran haltere system. *Neuroscience*, 61(1) :149–163, 1994.
- G. Nalbach and R. Hengstenberg. The halteres of the blowfly calliphora. *J. Comp. Physiol. A : Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiol.*, 175(6) :695–708, 1994.
- T. Netter and N. Franceschini. A robotic aircraft that follows terrain using a neuro-morphic eye. In *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 129–134, Lausanne, Switzerland, September 2002.
- T. R. Neumann and H. H. Bülthoff. Insect inspired visual control of translatory flight. In *Advances in Artificial Life*, pages 627–636. Springer, 2001.
- T. R. Neumann and H. H. Bülthoff. Behavior-oriented vision for biomimetic flight control. In *Proc. of the EPSRC/BBSRC Int. workshop on biologically inspired robotics*, pages 196–203, 2002.
- J.-M. Pichon. Guidage visuel d’un robot mobile autonome d’inspiration bionique. Technical report, 1991.
- J.-M. Pichon, C. Blanes, and N. Franceschini. Visual guidance of a mobile robot equipped with a network of self-motion sensors. In *Proc. of SPIE : Mobile Robots IV*, volume 1195, pages 44–53, Bellingham, USA, 1989. S. of Photo-optical Instrumentation Engineers.

- D. J. Pines and F. Bohorquez. Challenges facing future micro-air-vehicle development. *Journal of aircraft*, 43(2) :290–305, 2006.
- J. Plett, A. Bahl, M. Buss, K. Kühnlenz, and A. Borst. Bio-inspired visual ego-rotation sensor for MAVs. *Biol. Cyber.*, 106(1) :51–63, 2012.
- T. N. Pornsin-Sirirak, Y.-C. Tai, C.-M. Ho, and M. Keennon. Microbat : A palm-sized electrically powered ornithopter. In *Proc. of NASA/JPL Workshop on Biomorphie Robotics*, pages 14–17, August 2001.
- G. Portelli, J. Serres, F. Ruffier, and N. Franceschini. A 3d insect-inspired visual autopilot for corridor-following. In *2nd Biennial IEEE Int. Conf. on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob)*, pages 19–26, Scottsdale, USA, Oct. 2008.
- G. Portelli, F. Ruffier, and N. Franceschini. Honeybees change their height to restore their optic flow. *J. Comp. Physiol. A : Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiol.*, 196(4) :307–313, 2010a.
- G. Portelli, J. Serres, F. Ruffier, and N. Franceschini. Modelling honeybee visual guidance in a 3D environment. *J. of Physiol. Paris*, 104(1-2) :27–39, 2010b.
- G. Portelli, F. L. Roubieu, F. Ruffier, and N. Franceschini. Honeybees’ speed depends on dorsal as well as lateral, ventral and frontal optic flows. *PLoS ONE*, 6(5) :e19486, 2011.
- J. P. Praagh, van, W. Ribí, C. Wehrhahn, and D. Wittmann. Drone bees fixate the queen with the dorsal frontal part of their compound eyes. *J. Comp. Physiol. A : Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiol.*, 136(3) :263–266, 1980.
- M. Pudas, S. Viollet, F. Ruffier, A. Kruusing, S. Amic, S. Leppävuori, and N. Franceschini. A miniature bio-inspired optic flow sensor based on low temperature co-fired ceramics (ltcc) technology. *Sensors and Actuators A : Physical*, 133(1) :88–95, 2007.
- W. Reichardt. Autokorrelations-auswertung als funktionsprinzip des zentralnervensystems. *Zeitsch Naturforsch A*, 12 :756, 1957.
- W. Reichardt. *Processing of Optical Data by Organisms and by Machines*, chapter Movement perception in insects, pages 465–493. Academic Press, New York, 1969.
- W. Reichardt. Evaluation of optical motion information by movement detectors. *J. Comp. Physiol. A*, 161(4) :533–547, 1987.

- A. Riehle and N. Franceschini. Motion detection in flies : parametric control over on-off pathways. *Experimental Brain Research*, 54(2) :390–394, 1984.
- JR Riley, U Greggers, AD Smith, DR Reynolds, and R Menzel. The flight paths of honeybees recruited by the waggle dance. *Nature*, 435(7039) :205–207, 2005.
- L. Ristroph, A. J. Bergou, G. Ristroph, K. Coumes, G. J. Berman, J. Guckenheimer, Z. J. Wang, and I. Cohens. Discovering the flight autostabilizer of fruit flies by inducing aerial stumbles. *Proc. of the National Academy of Sciences*, 107(11) : 4820–4824, 2010.
- A. F. Rodriguez, E. Andersen, J. M. Bradley, and C. N. Taylor. Wind estimation using an optical flow sensor on a miniature air vehicle. In *AIAA Conf. on guidance, navigation, and control*, 2007.
- H. Romero, S. Salazar, A. Sanchez, P. Castillo, and R. Lozano. Modelling and real-time control stabilization of a new vtol aircraft with eight rotors. In *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 147–152, San Diego, USA, October 2007.
- F. L. Roubieu. Conception d’une carte moteur conférant un comportement indépendant de la batterie à un robot aéroglisseur. Master’s thesis, École Supérieure de Chimie Physique Électronique de Lyon, 2009.
- F. L. Roubieu, F. Expert, M. Boyron, B.-J. Fuschlock, S. Viollet, and F. Ruffier. A novel 1-gram insect based device measuring visual motion along 5 optical directions. In *IEEE Sensors Conference*, pages 687–690, Limerick, Ireland, October 2011.
- F. Ruffier. *PILOTE AUTOMATIQUE BIOMIMETIQUE Système générique inspiré du contrôle visuomoteur des insectes pour : le décollage, le suivi de terrain, la réaction au vent et l’atterrissage automatique d’un micro-aéronef*. PhD thesis, INP Grenoble, 2004a.
- F. Ruffier. *PILOTE AUTOMATIQUE BIOMIMETIQUE Système générique inspiré du contrôle visuomoteur des insectes pour : le décollage, le suivi de terrain, la réaction au vent et l’atterrissage automatique d’un micro-aéronef*. PhD thesis, PhD thesis (in French), Institut National Polytechnique de Grenoble, 2004b.
- F. Ruffier and F. Expert. Visual motion sensing onboard a 50-g helicopter flying freely under complex vicon-lighting conditions. In *IEEE Int. Conf. on Complex Medical Engineering (CME)*, pages 634–639, Kobe, Japan, July 2012.

- F. Ruffier and N. Franceschini. Octave, a bioinspired visuo-motor control system for the guidance of micro-air vehicles. In Abbott D. Rodriguez-Vazquez, A. and R. Carmona, editors, *SPIE Conf. on Bioengineered and Bioinspired Systems*, volume 5119, pages 1–12, Maspalomas, Spain, May 2003.
- F. Ruffier and N. Franceschini. Visually guided micro-aerial vehicle : automatic take off, terrain following, landing and wind reaction. In *Robotics and Automation, 2004. Proc. ICRA'04. 2004 IEEE Int. Conf. on*, volume 3, pages 2339–2346, 2004.
- F. Ruffier and N. Franceschini. Optic flow regulation : the key to aircraft automatic guidance. *Robotics and Autonomous Systems*, 50(4) :177–194, 2005.
- F. Ruffier and N. Franceschini. Aerial robot piloted in steep relief by optic flow sensors. In *Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 1266–1273, Nice, France, September 2008.
- F. Ruffier, S. Viollet, S. Amic, and N. Franceschini. Bio-inspired optical flow circuits for the visual guidance of micro-air vehicles. In *IEEE Int. Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, volume 3, pages 846–849, Bangkok, Thailand, May 2003.
- G. Sabiron, P. Chaven, T. Raharijaon, P. Fabiani, and F. Ruffier. Low-speed optic-flow sensor onboard an unmanned helicopter flying outside over fields. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, 2013a.
- G. Sabiron, P. Chavent, T. Raharijaona, P. Fabiani, and F. Ruffier. Low-speed optic-flow sensor onboard an unmanned helicopter flying outside over fields. In *IEEE Int. Conf. of Robotics and Automation (ICRA)*, Karlsruhe, Germany, May 2013b.
- S. P. Sane, A. Dieudonné, M. A. Willis, and T. L. Daniel. Antennal mechanosensors mediate flight control in moths. *Science Signaling*, 315(13) :863, 2007.
- J. Santos-Victor, G. Sandini, F. Curotto, and S. Garibaldi. Divergent stereo in autonomous navigation : learning from bees. In *Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pages 434–439, NY, USA, June 1993.
- J. Santos-Victor, G. Sandini, F. Curotto, and S. Garibaldi. Divergent stereo in autonomous navigation : From bees to robots. *Int. J. of Computer Vision*, 14(2) : 159–177, 1995.
- D. Schafroth, S. Bouabdallah, C. Bernes, and R. Siegwart. From the test benches to the first prototype of the muffy micro helicopter. In *Unmanned Aircraft Systems*, pages 245–260. Springer, 2009.

- S. Scherer, S. Singh, L. Chamberlain, and S. Saripalli. Flying fast and low among obstacles. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 2023–2029, 2008.
- H. Seguchi and O. Ohtsuka. Nonlinear receding horizon control of an underactuated hovercraft. *Int. J. of Robust and Nonlinear Control*, 13(3-4)(3-4) :381–398, 2003.
- R. Seidl and W. Kaiser. Visual field size, binocular domain and the ommatidial array of the compound eyes in worker honey bees. *J. Comp. Physiol. A : Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiol.*, 143(1) :17–26, 1981.
- R. A. Seidl. *Die Sehfelder und Ommatidien Divergenzwinkel von Arbeiterin, Königin und Drohn der Honigbiene (Apis mellifica)*. PhD thesis, 1982.
- T. Serrano-Gotarredona and B. Linares-Barranco. A new 5-parameter mos transistors mismatch model. In *Proc. of the 6th IEEE Int. Conf. on Electronics, Circuits and Systems (ICECS)*., volume 1, pages 315–318, 1999.
- J. Serres. *DE L'ABEILLE AU ROBOT : « LA RÉGULATION DU FLUX OPTIQUE » Contrôle conjoint de vitesse et d'évitement d'obstacles latéraux pour véhicules totalement actionnés*. PhD thesis, Université MONTPELLIER II, 2008.
- J. Serres, D. Dray, F. Ruffier, and N. Franceschini. A vision-based autopilot for a miniature air vehicle : joint speed control and lateral obstacle avoidance. *Autonomous Robot*, 25(1) :103–122, 2008a.
- J. Serres, G. Masson, F. Ruffier, and N. Franceschini. A bee in the corridor : centering and wall-following. *Naturwissenschaften*, 95(12) :1181–1187, 2008b.
- S. Shen, N. Michael, and V. Kumar. Autonomous indoor 3d exploration with a micro-aerial vehicle. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 9–15, St Paul, USA, May 2012.
- Y. M. Song, Y. Xie, V. Malyarchuk, J. Xiao, I. Jung, K.-J. Choi, Z. Liu, H. Park, C. Lu, and R.-H. Kim. Digital cameras with designs inspired by the arthropod eye. *Nature*, 497(7447) :95–99, 2013.
- K. Souhila and A. Karim. Optical flow based robot obstacle avoidance. *Int. J. of Advanced Robotic Systems*, 4(1) :13–16, 2007.
- P. S. Sreetharan, J. P. Whitney, M. D. Strauss, and R. J. Wood. Monolithic fabrication of millimeter-scale machines. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 22(5) :055027, 2012.

- M. V. Srinivasan. visually evoked roll response in the housefly. *J. Comp. Physiol.*, 119 :1–14, 1977.
- M. V. Srinivasan. An image-interpolation technique for the computation of optic flow and egomotion. *Biol. Cyber.*, 71(5) :401–415, 1994.
- M. V. Srinivasan. Honey bees as a model for vision, perception, and cognition. *Annual Review of Entomology*, 55 :267–284, 2009.
- M. V. Srinivasan. Honeybees as a model for the study of visually guided flight, navigation, and biologically inspired robotics. *Physiological Reviews*, 91(2) :413–460, 2011a.
- M. V. Srinivasan. Visual control of navigation in insects and its relevance for robotics. *Current Opinion in Neurobiology*, 21(4) :535–543, 2011b.
- M. V. Srinivasan and M. Lehrer. Temporal acuity of honeybee vision : behavioural studies using moving stimuli. *J. Comp. Physiol. A*, 155(3) :297–312, 1984.
- M. V. Srinivasan and M. Lehrer. Spatial acuity of honeybee vision and its spectral properties. *J. Comp. Physiol. A*, 162(2) :159–172, 1988.
- M. V. Srinivasan, M. Lehrer, W. H. Kirchner, and S. W. Zhang. Range perception through apparent image speed in freely flying honeybees. *Visual neuroscience*, 6(5) :519–535, 1991.
- M. V. Srinivasan, S. W. Zhang, and K. Chandrashekara. Evidence for two distinct movement-detecting mechanisms in insect vision. *Naturwissenschaften*, 80(1) :38–41, 1993.
- M. V. Srinivasan, S. Zhang, M. Lehrer, and T. Collett. Honeybee navigation en route to the goal : visual flight control and odometry. *J. Exp. Biol.*, 199(1) :237–244, 1996.
- M. V. Srinivasan, S. W. Zhang, J. S. Chahl, E. Barth, and S. Venkatesh. How honeybees make grazing landings on flat surfaces. *Biol. Cyber.*, 83(3) :171–183, 2000.
- MV Srinivasan, JS Chahl, K Weber, S Venkatesh, MG Nagle, and SW Zhang. Robot navigation inspired by principles of insect vision. *Robotics and Autonomous Systems*, 26(2) :203–216, 1999.

- N. J. Strausfeld. *Atlas of an insect brain*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1976.
- A. D. Straw, S. Lee, , and M. H. Dickinson. Visual control of altitude in flying *Drosophila*. *Curr. Biol.*, 20(17) :1550–1556, 2010.
- L. F. Tammero and M. H. Dickinson. The influence of visual landscape on the free flight behavior of the fruit fly *drosophila melanogaster*. *J. Exp. Biol.*, 205(3) : 327–343, 2002.
- G. K. Taylor and H. G. Krapp. Sensory systems and flight stability : What do insects measure and why? *Advances in insect Physiol.*, 34 :231–316, 2007.
- S. Ullman. Analysis of visual motion by biological and computer systems. *IEEE Computer*, 14(8) :57–69, 1981.
- K. P. Valanis. *Advances in unmanned aerial vehicles : state of the art and the road to autonomy*, volume 33. Berlin : Springer, 2007.
- S. Viollet and N. Franceschini. Biologically-inspired visual scanning sensor for stabilization and tracking. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, volume 1, pages 204–209, Kyongju, South Korea, 1999.
- S. Viollet and F. Ruffier. Visual guidance systems for small Unmanned Aerial Vehicles. *Autonomous Robot*, 27 :145–146, 2009.
- S. Viollet and J. Zeil. Feed-forward and visual feedback control of head roll orientation in wasps (*polistes humilis*, vespidae, hymenoptera). *The J. of Exp. biol.*, 216(7) : 1280–1291, 2013.
- S. Viollet, L. Kerhuel, and N. Franceschini. A 1-gram dual sensorless speed governor for micro-air vehicles. In *16th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, pages 1270–1275, Ajaccio, France, June 2008.
- S. Viollet, F. Ruffier, T. Ray, M. Menouni, F. Aubépart, L. Kerhuel, and N. Franceschini. Characteristics of three miniature bio-inspired optic flow sensors in natural environments. In *Fourth Int. Conf. on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM)*, pages 51–55, Venice, Italy, July 2010.
- K. von Frisch. Gelöste und ungelöste rätsel der bienensprache. *Naturwissenschaften*, 35(1) :12–23, 1948.

- H. Wagner. Flow-field variables trigger landing in flies. *Nature*, 297(5862) :147–148, 1982.
- T. H. Waterman. Polarization sensitivity. *Handbook of sensory Physiol.*, VII(6B) : 281–469, 1981.
- K. Weber, S. Venkatesh, and M. V. Srinivasan. Insect inspired behaviors for the autonomous control of mobile robots. In M. V. Srinivasan and S. Venkatesh, editors, *Proc. of the 13th Int. Conf. on Pattern Recognition, 1996.*, pages 226–248, Vienna, Austria, August 1997. U.K. : Oxford Univ. Press.
- S. Weiss, D. Scaramuzza, and R. Siegwart. Monocular-slam-based navigation for autonomous micro helicopters in gps-denied environments. *J. of Field Robotics*, 28(6) :854–874, 2011.
- T. Whiteside and G. Samuel. Blur zone. *Nature*, 225 :94–95, 1970.
- R. J. Wood. The first takeoff of a biologically-inspired at-scale robotic insect. *IEEE Trans. on Robotics*, 24(2) :341–347, 2008.
- W.-C. Wu, L. Schenato, and ands R. S. Fearing Wood, R. J. Biomimetic sensor suite for flight control of a micromechanical flying insect : design and experimental results. In *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, volume 1, pages 1146–1151, Taipei, Taiwan, September 2003.
- P. Xu, J. S. Humbert, and P. Abshire. Analog vlsi implementation of wide-field integration methods. *J. of Intelligent & Robotic Systems*, 64(3-4) :465–487, 2011.
- J. Yan, R. J. Wood, S. Avadhanula, M. Sitti, and R. S. Fearing. Towards flapping wing control for a micromechanical flying insect. In *Proc. on IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, volume 4, pages 3901–3908, Seoul, Korea, May 2001.
- S. W. Zhang, W. Xiang, L. Zili, and M. V. Srinivasan. Visual tracking of moving targets by freely flying honeybees. *Visual Neuroscience*, 4(04) :379–386, 1990.
- J.-C. Zufferey. *Bio-inspired vision-based flying robots*. PhD thesis, École polytechnique fédérale de Lausanne, 2005.
- J.-C. Zufferey and D. Floreano. Toward 30-gram autonomous indoor aircraft : Vision-based obstacle avoidance and altitude control. In *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation.*, pages 2594–2599, 2005.

-
- J.-C. Zufferey and D. Floreano. Fly-inspired visual steering of ultralight indoor aircraft. *IEEE Trans. on Robotics*, 22(1) :137–146, 2006.
- J.-C. Zufferey, A. Klaptocz, A. Beyeler, J.-D. Nicoud, and D. Floreano. A 10-gram vision-based flying robot. *Advanced Robotics*, 21(14) :1671–1684, 2007.
- J.-C. Zufferey, A. Beyeler, and D. Floreano. Autonomous flight at low altitude using light sensors and little computational power. *Int. J. of Micro Air Vehicles*, 2(2) : 107–117, 2010.

RÉALISATION D'UN MICRO-ROBOT AUTONOME,
INSPIRÉ DU CONTRÔLE DE VITESSE ET D'ÉVITEMENT D'OBSTACLES OBSERVÉS CHEZ L'ABEILLE

RESUME : Cette thèse présente, pour la première fois, l'implémentation d'une stratégie visuelle bio-inspirée sur un aéroglisseur miniature totalement actionné (taille : 36x21x17.8cm, masse : 0.878kg), qui lui permet de naviguer dans le plan horizontal d'un tunnel inconnu. L'élaboration de ce pilote automatique, dénommé LORA (*Lateral Optic flow Regulation Autopilot*), fait suite aux études comportementales menées sur l'abeille dans d'autres laboratoires et plus récemment dans notre laboratoire. Ces expériences nous ont amené à énoncer le principe de la régulation du flux optique pour le contrôle du vol de croisière.

Le pilote automatique LORA est un double régulateur de flux optique latéral. Il consiste en deux boucles visuo-motrices interdépendantes, chacune comportant une consigne de flux optique qui contrôle un degré de liberté du robot. La première boucle est un régulateur bilatéral de flux optique qui contrôle la vitesse d'avance du robot, alors que la seconde est un régulateur unilatéral de flux optique qui contrôle la position par rapport aux obstacles. La clé de voûte de ce système de guidage bio-inspiré est une troisième boucle destinée à maintenir le cap. Celle-ci repose sur la mesure d'un micro-gyromètre et d'un micro-compass magnétique, ce qui permet à l'aéroglisseur d'effectuer des mouvements de translation et de ne générer, sur son œil composé artificiel, que du flux optique de translation, seul dépendant du ratio "vitesse/distance aux obstacles". L'estimation du flux optique s'effectue par un œil composé minimaliste, constitué de deux ou quatre Détecteurs élémentaires de mouvement (DEMs) (seulement 4 ou 8 pixels). Ce système visuel suffit au pilote automatique pour contrôler le ratio "vitesse/distance aux obstacles", tout en contrôlant conjointement la vitesse et la position du robot, sans avoir à mesurer ou estimer aucun de ces paramètres.

L'aéroglisseur est ainsi capable de franchir sans collision des tunnels aux formes diverses : droit, fuselé, présentant une pente, un virage, une absence de texture sur un mur ou même une zone non-stationnaire. Il adapte automatiquement sa vitesse et sa position aux obstacles à la manière d'une abeille. Cette stratégie visuelle bio-inspirée fournit non seulement une solution de navigation élégante, en environnement inconnu, pour des micro-robots totalement actionnés, mais elle permet aussi d'expliquer comment une abeille de 100mg peut naviguer avec si peu de ressources calculatoires, c'est à dire sans l'aide de SONAR, RADAR, LIDAR, ou GPS.

MOT-CLES : Bio-inspiration, Flux optique, Pilote automatique, Évitement d'obstacles, Navigation en canyon urbain, Aéroglisseur

DESIGN OF AN AUTONOMOUS MICRO-ROBOT
INSPIRED FROM THE SPEED CONTROL AND OBSTACLE AVOIDANCE OBSERVED ON HONEYBEES

ABSTRACT : In this work, we present for the first time a bio-inspired motion vision-based navigation strategy embedded on a miniature fully-actuated hovercraft (size: 36x21x17cm, mass: 0.878kg) allowing it to navigate safely on the horizontal plane of an unknown corridor. The design of this autopilot, called LORA (*Lateral Optic flow Regulation Autopilot*), follows the ethological findings made on honeybees in other laboratories and more recently in our laboratory, which led us to elaborate the principle of the *optic flow regulation* which might be used by insects to control their flight.

The bee-inspired LORA autopilot is a *dual optic flow regulator* which consists in two intertwined visuomotor feedback loops, each one has its own optic flow set-point and controls its own degree of freedom. The first loop is a bilateral optic flow regulator which controls the forward speed of the robot, whereas the second loop is an unilateral optic flow regulator controlling the clearance of the robot to the obstacles. The keystone of this bio-inspired guidance system is a heading-lock system enabling the robot to move in translations and therefore experience a purely translational optic flow which depends only on the ratio "speed/clearance to obstacles" thanks to the measurements of both a micro-gyrometer and a micro-magnetic compass. The estimation of optic flow is made by a minimalist compound eye, constituted of two or four Elementary Motion Detectors (EMDs) (only 4 or 8 pixels), which is sufficient for the autopilot to control the ratio "speed/clearance to obstacles" and thus control jointly both the speed and the position of the robot without having to measure or estimate any of these parameters.

The hovercraft is therefore able to cross without crashing a straight or a tapered corridor, presenting a frontal sloping terrain, a bend, a textureless wall, or even a non-stationary section by automatically adapting both its forward speed and its clearance to the walls imitating the honeybee. This bio-inspired visual strategy not only provides an elegant navigation solution in an unknown environment aimed to equip fully-actuated miniature vehicles but also to explain how a 100mg honeybee can navigate with few computational resources, i.e., without any SONAR, RADAR, LIDAR or GPS.

KEYWORDS : Optic flow, Autonomous guidance, Collision avoidance, Urban canyon navigation, Hovercraft, Bionics
