DE L'ABEILLE AU ROBOT : LA RÉGULATION DU FLUX OPTIQUE. Contrôle conjoint de vitesse et d'évitements d'obstacles latéraux pour véhicules totalement actionnés.

Julien Serres

▶ **To cite this version:**

Julien Serres. DE L'ABEILLE AU ROBOT : LA RÉGULATION DU FLUX OPTIQUE. Contrôle conjoint de vitesse et d'évitements d'obstacles latéraux pour véhicules totalement actionnés.. Automatique / Robotique. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 2008. Français. NNT : . tel-00645272

HAL Id: tel-00645272

https://theses.hal.science/tel-00645272

Submitted on 27 Nov 2011

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

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

UNIVERSITE MONTPELLIER II
SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC

N°attribué par la bibliothèque
|__|__|__|__|__|__|__|__|__|__|

T H E S E

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE MONTPELLIER II

Discipline : Systèmes Automatiques et Microélectroniques

Ecole Doctorale : Information, Systèmes, Structures

présentée et soutenue publiquement

par

Julien SERRES

le 11 juillet 2008

Titre

DE L'ABEILLE AU ROBOT : « LA RÉGULATION DU FLUX OPTIQUE »

Contrôle conjoint de vitesse et d'évitement d'obstacles latéraux pour véhicules totalement actionnés

JURY

M. R. ZAPATA	, Président
M. N. FRANCESCHINI	, Directeur de Thèse
M. A. IJSPEERT	, Rapporteur
M. S. THORPE	, Rapporteur
M. R. LOZANO	, Examinateur
M. P. BIDAUD	, Examinateur

« L'intelligence artificielle se définit comme
le contraire de la bêtise naturelle »

Woody Allen [1935-]
Comédien et réalisateur américain

« Une mouche ne doit pas tenir dans la tête d'un
naturaliste plus de place qu'elle n'en tient dans la Nature »

Georges-Louis Leclerc, Conte de Buffon [1707-1788]
Naturaliste français

Remerciements

Je tiens en tout premier lieu à remercier Nicolas Franceschini, Directeur de Recherche CNRS à l'Institut des Sciences du Mouvement (ISM) – E-J. Marey (UMR 6233), pour m'avoir accueilli au sein de l'équipe Biorobotique et pour m'avoir accordé toute sa confiance quant à la réalisation de mon projet de thèse. Il a su me transmettre les clés de ce que j'appellerais la *démarche de recherche biorobotique*, qui est devenue pour moi une passion.

Je remercie tous les membres du jury (le Président, les Rapporteurs, et les Examinateurs) pour avoir accepté d'évaluer mon travail :

- M. René Zapata, Professeur à l'Université de Montpellier II, Président,
- M. Auke Ijspeert, Professeur à l'École Polytechnique de Lausanne, Rapporteur,
- M. Simon Thorpe, Directeur de Recherche CNRS au Centre de Recherche Cerveau et Cognition (CERCO), Toulouse, Rapporteur,
- M. Rogelio Lozano, Directeur de Recherche CNRS à l'Université de Technologie de Compiègne (HEUDIASYC UMR 6599), Examinateur,
- M. Philippe Bidaud, Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie, Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique (ISIR), Examinateur,

Je tiens particulièrement à remercier M. Boyron pour sa minutie dans la réalisation des cartes électroniques, L. Kerhuel pour son aide à la programmation des DEM, Y. Luparini, F. Paganucci, et D. Dray pour leur aide dans la réalisation des tunnels à abeilles, G. Masson pour son aide dans l'enregistrement et l'analyse des trajectoires d'abeilles, A. Dilly et F. Aubépart pour leur contribution à la réalisation et la simulation du système visuo-moteur intégré sur FPGA.

Je tiens également à remercier l'ensemble des personnes avec lesquelles j'ai travaillé ou que j'ai pu côtoyer au laboratoire, pour les moments constructifs et agréables passés ensemble : S. Amic, B. Besson, A. Boyer, P. Guigues, P. Negrel, M. Ogier, F. Paganucci, G. Portelli, J-L. Vercher.

Je remercie F. Ruffier pour son encadrement sans faille et les nombreux échanges fructueux entretenus pendant ma thèse, et S. Viollet pour son aide en automatique.

Enfin, je remercie Serge et Brigitte Dini, apiculteurs à Peypin, pour la mise à disposition bénévole de leurs abeilles, et Robert Tollari pour la cartographie des lieux de l'expérimentation.

Je remercie Émilie de la Tousche, ses parents, mes grand-parents, et la famille Conigliaro pour leur soutien sans faille.

Distinctions

2nd Prix de thèse du GDR Robotique édition 2009

http://www.gdr-robotique.org/

Liste des publications pendant le projet de thèse

Revues scientifiques avec comité de lecture

N. Franceschini, S. Viollet, F. Ruffier and **J. Serres** (2008)

Neuromimetic robots inspired by insect vision.

Advances in Science and Technology, vol. 58, pp. 127-136.

J. Serres, G. P. Masson, F. Ruffier and N. Franceschini (2008)

Honeybee in the corridor: centering and wall-following.

Naturwissenchaften, vol. 95(12), pp. 1181-1187.

J. Serres, D. Dray, F. Ruffier and N. Franceschini (2008)

A vision-based autopilot for a miniature hovercraft: joint speed control and lateral obstacle avoidance.

Autonomous Robots, vol. 25, pp. 103-122.

N. Franceschini, F. Ruffier and **J. Serres** (2007)

A bio-inspired flying robot sheds light on insect piloting abilities.

Current Biology, vol. 17, pp. 329-335.

J. Serres, F. Ruffier, S. Viollet and N. Franceschini (2006)

Toward optic flow regulation for wall-following and centring behaviours.

International Journal of Avanced Robotic Systems, vol. 3, no. 2, pp. 147-154.

Chapitres de livre sur invitation

F. Aubépart, **J. Serres**, A. Dilly, F. Ruffier, S. Viollet and N. Franceschini (2009)

Field-programmable gate array (FPGA) for bio-inspired visuo-motor control systems applied to micro-air vehicles. In: *Aerial Vehicles* (Ed. Thanh Mung Lam), Chapter 3, pp. 29-54

In-Tech (Vienna, Austria), ISBN 978-953-7619-41-1

N. Franceschini, F. Ruffier, **J. Serres** and S. Viollet (2009)

Optic flow based visual guidance: from flying insects to miniature aerial vehicles

In: Aerial Vehicles (Ed. Thanh Mung Lam), Chapter 35, pp. 747-770

In-Tech (Vienna, Austria), ISBN 978-953-7619-41-1

N. Franceschini, F. Ruffier and **J. Serres** (2009)

Optic flow based autopilots: speed control and obstacle avoidance

In: *Flying Insects and Robots* (Eds. D. Floreano, M. Srinivasan, C. Ellington, and J-C. Zufferey), Springer Verlag, Chapitre 3, pp. 29-35, ISBN 298-3-540-89392-9

N. Franceschini, S. Viollet, F. Ruffier and **J. Serres** (2008)

The insect compound eye : from micro-optics and neuronics to biorobotics.

In: Nanomaterials and Insect Biomimetics. Masatsugu Shimomura, Tateo Shimozawa (Ed.), Tokyo: NTS Inc., pp. 1-18, ISBN 978-4-86043-198-3

N. Franceschini, F. Ruffier and **J. Serres** (2007)

Y a-t-il un pilote dans l'insecte ?

In: *Voir l'invisible* (Ed. Omniscience, collection Ecrin), pp. 216-217.

Conférences internationales avec comité de lecture

G. Portelli, **J. Serres**, F. Ruffier, N. Franceschini (2008)

A 3D insect-inspired visual autopilot for corridor-following. In *proceedings of the second IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical robotics and Biomechatronics* (BIOROB), (Scottsdale, Arizona, USA, Oct. 19-22), paper n°57.

F. Ruffier, T. Mukai, H. Nakashima, **J. Serres** and N. Franceschini. (2008)

Combinings sound and optic flow cues to reach a sound source despite lateral obstacles

In: Proceedings of the 1st IEEE International Symposium on System Integration (SI International), (Nagoya, Japan, Dec. 4th), paper n°24.

J. Serres, F. Ruffier and N. Franceschini (2006)

Two optic flow regulators for speed control and obstacle avoidance. In *proceedings of the first IEEE International Conference on Biomedical robotics and Biomechatronics* (BIOROB), (Pise, Italy, Feb. 20-22), pp. 750- 757.

J. Serres, F. Ruffier and N. Franceschini (2005)

Biomimetic visual navigation in a corridor: to centre or not to centre? In *proceedings of the Int. Mediterranean Modeling Multiconference* (I3M), (Marseille, France, Oct. 20-22), pp 91-97.

F. Ruffier, **J. Serres**, and N. Franceschini (2005)

Automatic landing and take off at constant slope without terrestrial aids. In *proceedings of the 31st European Rotorcraft Forum* (ERF), (Florence, Italy, Sept. 13-15), pp. 92.1-92.8.

Conférences internationales

J. Serres, F. Ruffier, G.P. Masson and N. Franceschini (2008)

A bee in the corridor: centering and wall-following. In *proceedings of the second International Conference on Invertebrate Vision* (ICIV), (Lund, Sweden, August 1-8), poster n° 52.

N. Franceschini, F. Ruffier, and **J. Serres** (2008)

From insects to robots and back. In *proceedings of the second International Conference on Invertebrate Vision* (ICIV), (Lund, Sweden, August 1-8).

N. Franceschini, S. Viollet, F. Ruffier, and **J. Serres** (2008)

Neuromimetic robots inspired by insects' sensory-motor control systems.
In *proceedings of the 3rd International Conference "Smart Materials, Structures and Systems"* (CIMTEC), (Acireale, Sicily, Italy, June 8-13).

N. Franceschini, F. Ruffier, and **J. Serres** (2007)

Insects as pilots: optic flow regulation for vertical and horizontal guidance. In *proceedings of the International Symposium on Flying Insects and Robots* (FIR), (Ascona, Suisse, August 12-17), pp. 37-38.

G. Portelli, M. Ogier, F. Ruffier, **J. Serres**, and N. Franceschini (2007)

A bee in the corridor: side-slip control autopilot. In *proceedings of the International Symposium on Flying Insects and Robots* (FIR), (Ascona, Suisse, August 12-17), pp. 91-92.

N. Franceschini, F. Ruffier, and **J. Serres** (2007)

Optic flow based autopilot: From insects to rotorcraft and back. Comparative Biochemistry and Physiology - Part A: Molecular & Integrative Physiology Vol. 146, Issue 4, Supplement 1, *Abstracts of the Annual Main Meeting of the Society for Experimental Biology* (Glasgow, Scotland, 31st March - 4th April), pp. S133.

J. Serres, F. Ruffier, G.P. Masson and N. Franceschini (2007)

A bee in the corridor: centring or wall-following? *7th Meeting of the German Neuroscience Society - 31st Göttingen Neurobiology Conference* (Göttingen, Germany, March 29- April 1st), Abstract T14-8B.

F. Ruffier, **J. Serres**, G.P. Masson and N. Franceschini (2007)

Are bees equipped with a dual optic flow regulator? *7th Meeting of the German Neuroscience Society - 31st Göttingen Neurobiology Conference* (Göttingen, Germany, March 29- April 1st), Abstract T14-7B.

Conférences nationales

F. Ruffier, **J. Serres**, G. Portelli, and N. Franceschini (2009)

Boucles visuo-motrices bio-mimétiques pour le pilotage automatique des micro-aéronefs. Actes des 7ème Journées Nationales de la Recherche en Robotique (JNRR), (Neuvy-sur-Barangeon, France, Nov. 4-6), pp. 55-67.

G. Portelli, **J. Serres**, F. Ruffier, N. Franceschini (2008)

3D Navigation with an insect-inspired autopilot. *Actes de la deuxième Conférence de Neurosciences Computationnelles* (NEUROCOMP), (Marseille, France, Oct. 8-11).

J. Serres, D. Dray, F. Ruffier and N. Franceschini (2008)

Pilote automatique bio-inspiré basé sur la vision du mouvement. *Acte de la 6ème Manifestation des Jeunes Chercheurs en STIC* (MAJECSTIC), (Marseille, France, Oct. 29-30).

G. Portelli, **J. Serres**, F. Ruffier, N. Franceschini (2008)

Un pilote automatique inspiré des insectes pour la navigation 3D dans un tunnel.

Acte de la 4ème journée de l'Ecole Doctorale Sciences du Mouvement Humain (EDSMH), (Avignon,France, 23 Mai).

J. Serres, F. Ruffier and N. Franceschini (2007)

Guidage visuel d'un aéroglisseur miniature dans un corridor. *Journées Nationales de la Recherche en Robotique* (JNRR), (Obernai, France, Oct. 9-12).

J. Serres, F. Ruffier and N. Franceschini (2005)

Réguler le flux optique latéral pour naviguer dans un corridor. *Journées Nationales de la Recherche en Robotique* (JNRR), (Guidel, France, Oct. 5-7), pp. 289-290.

Table des abréviations

Abréviations	***Signification***
CMS	Composant à Montage de Surface
DEM	Détecteur Elémentaire de Mouvement
E_R	Entrée à droite des abeilles dans le corridor
E_C	Entrée au centre des abeilles dans le corridor
E_L	Entrée à gauche des abeilles dans le corridor
FPGA	*Field-Programmable Gate Array* (composant à cellules logiques programmables)
LiPo	Batteries Lithium-Polymère
LORA	*Lateral Optic flow Regulation Autopilot*
LORA I	pilote Automatique de Régulation du flux Optique Latéral, version 1 (Contrôle de cap)
LORA II	pilote Automatique de Régulation du flux Optique Latéral, version 2 (Contrôle conjoint d'avance et latéral avec une consigne commune de flux optique)
LORA III	pilote Automatique de Régulation du flux Optique Latéral, version 3 (Contrôle conjoint d'avance et latéral avec des consignes distinctes de flux optique)
(robot) OCTAVE	*Optic flow Control sysTem for Aerial VEhicles*
OFF	Front de contraste Blanc-Noir
ON	Front de contraste Noir-Blanc
MLI	Modulation de largeur d'impulsions
PD	Correcteur à action Proportionelle-Dérivée
PI	Correcteur à action Proportionelle-Intégrale
PID	Correcteur à action Proportionelle-Intégrale-Dérivée
PPM	*Pulse Position Modulation* (Modulation d'impulsions en position)
R_R	Nourricier des abeilles positionné à droite
R_C	Nourricier des abeilles positionné au centre
R_L	Nourricier des abeilles positionné à gauche
tpm	tours par minute
TTC	Temps avant impact (*time-to-contact*)
VT	Neurone accordé à une vitesse angulaire de l'abeille

Table des notations

Cinématique		
Notation	***Signification***	***Unité***
(x,y,z)	Position dans le repère absolu de l'agent	m
x	Abscisse ou distance parcourue	m
X	Abscisse d'un objet dans l'environnement	
y	Ordonnée ou position latérale	m
y_0	Ordonnée initiale	m
y_∞	Ordonnée en régime permanent	m
y_R	Ordonnée du mur de droite	m
y_L	Ordonnée du mur de gauche	m
D_R	Distance au mur de droite ($D_R=y-y_R$)	m
D_L	Distance au mur de gauche ($D_L=y_L-y$)	m
D_F	Distance frontale au mur	m
h	Hauteur sol	m
D	Largeur du corridor	m
α	Angle de fuselage du corridor	°
$\tau(\alpha)$	Constante de temps en boucle fermée du contrôle de vitesse	s
Ψ	Angle de lacet (i.e., autour de l'axe vertical)	°
φ	Position azimutale	°
i	Angle d'incidence de l'agent par rapport à un mur	°
V	Module du vecteur vitesse	m/s
V_x	Vitesse d'avance	m/s
$V_{x\infty}$	Vitesse d'avance en régime permanent	m/s
V_y	Vitesse latérale	m/s
V_z	Vitesse verticale	m/s
V_p	Vitesse des motifs tapissant un mur en mouvement	m/s
Dynamique		
m	Masse de l'agent	g ou kg
J	Moment d'inertie autour de l'axe vertical	$kg.m^2$
r	Bras de levier d'un propulseur arrière de l'aéroglisseur	cm
K_T	Gain Tension-Poussée des propulseurs	N/V
ζ_x	Coefficient de frottement visqueux suivant x	kg/s
ζ_y	Coefficient de frottement visqueux suivant y	kg/s
ζ_z	Coefficient de frottement visqueux suivant z	kg/s

ζ_ψ	Coefficient de frottement visqueux autour de l'axe vertical	kg.m^2/s
τ_x	Constante de temps de la dynamique d'avance	s
τ_y	Constante de temps de la dynamique latérale	s
τ_ψ	Constante de temps de la dynamique autour de l'axe vertical	s
Contrôle		
ε_{Side}	Erreur du contrôle latéral	V
ε_{Fwd}	Erreur du contrôle d'avance	V
$\omega_{setSide}$	Consigne de flux optique du régulateur de flux optique unilatéral	V
ω_{setFwd}	Consigne du régulateur de flux optique bilatéral	V
K_{DEM}	Gain du DEM	V/(°/s)
ω_{Rmeas}	Flux optique droit mesuré (sortie DEM)	V
ω_{Lmeas}	Flux optique gauche mesuré (sortie DEM)	V
ω_{Vmeas}	Flux optique ventral mesuré (sortie DEM)	V
ω_R	Flux optique droit généré par les mouvements de l'agent	°/s ou rad/s
ω_L	Flux optique gauche généré par les mouvements de l'agent	°/s ou rad/s
ω_V	Flux optique ventral généré par les mouvements de l'agent	°/s ou rad/s
ω_φ	Flux optique suivant la direction azimutale φ	°/s ou rad/s
p	Variable dans l'espace de Laplace	-
$G_y(p)$	Transmittance de la dynamique latérale	-
$C_y(p)$	Transmittance du correcteur de la dynamique latérale	-
$G_{Vx}(p)$	Transmittance de la dynamique d'avance	-
$C_{Vx}(p)$	Transmittance du correcteur de la dynamique d'avance	-
$G_\psi(p)$	Transmittance de la dynamique de vitesse de rotation en lacet	-
$C_\psi(p)$	Transmittance du correcteur de la dynamique en lacet	-
Optique		
$\Delta\varphi$	Angle inter-récepteur (ou inter-ommatidial)	°
$\Delta\rho$	Angle d'acceptance (largeur à mi-hauteur d'une gaussienne)	°
$\boldsymbol{m}$	Contraste optique	-
I	Intensité lumineuse (éclairement)	lux
λ	Période angulaire d'un modif tapissant une surface	°
Electronique		
U	Tension d'alimentation de l'électronique	V
τ	Constante de temps d'un circuit détecteur élémentaire de mouvement	ms

Table des matières

Remerciements.....3

Liste des publications pendant le projet de thèse.....5

Table des abréviations.....9

Table des notations.....10

Table des matières.....13

Chapitre I. Introduction

I.1. Qu'est-ce que la Biorobotique ?.....20

I.2. Situation du thème de recherche au laboratoire : vers la régulation du flux optique.....21

I.3. Le régulateur en Automatique.....22

I.4. Le contrôle de vitesse et l'évitement d'obstacles dans une architecture par interactions prioritaires de R. Brooks.....23

I.5. Typologie des micro-aéronefs.....25

I.6. Le flux optique dans l'évitement d'obstacles et le contrôle de vitesse.....27

I.7. Spécificité du projet de thèse.....32

Chapitre II. Structuration du flux optique en fonction de la nature du mouvement

Résumé.....34

II.1 Définition du flux optique.....35

II.2. Description du flux optique en fonction du mouvement.....36

II.2.1. Flux optique généré lors d'un mouvement quelconque.....36

II.2.2. Flux optique généré lors d'une translation pure.....38

II.2.3. Flux optique généré lors d'une rotation pure.....39

II.2.4. Analyse locale du flux optique.....39

II.3. Représentation plane du flux optique.....40

II.4. La perception du flux optique par l'oeil.....41

Conclusion.....43

Chapitre III. Démarches d'étude neurophysiologique et comportementale de l'abeille (*Apis mellifera*)

Résumé.....46

III.1. L'insecte ailé : un support d'étude de référence.....47

III.1.1. L'arbre phylogénique des insectes ailés.....47

III.1.2. Modalités sensorielles chez les insectes ailés.....49

III.1.3. La mouche : un modèle d'inspiration neurophysiologique.....50

III.1.4. L'abeille : un modèle d'inspiration comportementale.....51

III.1.5. Modalités de propulsion chez les insectes ailés.....52

III.2. Les aspects neurophysiologiques de l'abeille.....54

III.2.1. Son oeil composé.....54

III.2.2. Son système visuel rétinotopique.....57

III.2.3. Les neurones détecteurs de mouvement à large champ visuel.....59

III.2.3.1. Les neurones accordés à la vitesse angulaire (neurones VT).....60

III.2.3.2. Les neurones optomoteurs.....60

III.3. Les aspects comportementaux de l'abeille.....62

III.3.1. La réaction optomotrice.....62

III.3.2. La réaction de centrage.....63

III.3.3. Le contrôle de la vitesse.....65

III.3.4. L'atterrissage et le suivi de terrain.....67

Conclusion.....69

Chapitre IV. Le vol des abeilles par régulation du flux optique

Résumé.....72

IV.1. Contrôle du vol vertical : le régulateur de flux optique ventral.....73

IV.1.1. Décollage.....75

IV.1.2. Suivi de terrain....75
IV.1.3. Réaction au vent....75
IV.1.4. Vol au dessus d'une surface de type « eau dormante »....76
IV.1.5. Atterrissage....76

IV.2. Contrôle du vol horizontal : les régulateurs de flux optique latéraux....79
IV.2.1. Expérimentation....79
IV.2.2. Résultats....85
IV.2.2.1. Suivi de paroi en fonction des conditions initiales....85
IV.2.2.2. Vol en l'absence de flux optique latéral....87
IV.2.2.3. Relation entre la vitesse d'avance et la distance au mur en régime permanent....87
IV.2.2.4. Trajectoires en régime transitoire : décomposition en phases de vol....90
IV.2.3. Discussion....92
IV.2.3.1. Indices visuels : statiques ou dynamiques ?....93
IV.2.3.2. Equilibre des flux optiques latéraux ou régulation unilatérale ?....94
IV.2.3.3. Qu'en est-il de la stabilisation en lacet de l'abeille ?....94
IV.2.4. Elaboration du modèle de contrôle de vol horizontal....95
IV.2.4.1. Contrôle d'avance de l'abeille....95
IV.2.4.2. Contrôle latéral de l'abeille....97
IV.2.4.3. Point de fonctionnement des régulateurs en régime permanent....99

Conclusion....102

Chapitre V.
Modélisation et simulation de la boucle visuo-motrice LORA

Résumé....104
V.1. Simulation numérique du modèle....105
V.1.1. Simulation numérique d'environnements stationnaire et non-stationnaire....105
V.1.2. Organisation séquentielle de la simulation LORA....107
V.1.3. Simulation numérique d'une sortie photoréceptrice....111
V.1.4. Simulation numérique des traitements DEM....113
V.2. Modélisation de la boucle visuo-motrice LORA III....114
V.2.1. De la régulation du flux optique ventral à la régulation du flux optique latéral....114
V.2.2. Avantages/inconvénients de la boucle visuo-motrice LORA I....116

V.2.3. Avantages/inconvénients de la boucle visuo-motrice LORA II.....118
V.2.4. La boucle visuo-motrice LORA III.....119
V.2.4.1. Modèle dynamique de l'aéroglisseur totalement actionné.....119
V.2.4.2. Signaux d'erreur des deux régulateurs de flux optique latéral.....121
V.2.4.3. Synthèse des correcteurs d'avance et latéral.....121
V.2.4.4. Positionnement latéral automatique dans un corridor rectiligne.....123
V.2.4.5. Réaction automatique à une ouverture.....127
V.2.4.6. Réaction automatique à une perturbation en échelon de flux optique.....128
V.2.4.7. Décélération et accélération automatiques dans un corridor fuselé.....131
V.3. Simulation d'un modèle visuo-moteur d'abeille.....135
V.3.1. Simulation d'un suivi de paroi fixe.....136
V.3.2. Simulation d'un suivi de paroi mobile.....137
V.4. Intégrabilité de la boucle visuo-motrice LORA III sur FPGA.....139
V.4.1. Flot de conception sur cible FPGA.....139
V.4.2. Organisation de la carte LORA 140
V.4.3. Résultats de co-simulation matériel/logiciel.....142
V.4.3.1. Suivi automatique de paroi.....142
V.4.3.2. Réaction automatique à une ouverture.....143
V.4.3.3. Contrôle automatique de la vitesse dans un corridor fuselé.....144
Conclusion.....145

Chapitre VI. Le robot LORA : conception et réalisation

Résumé.....148
VI.1. Choix de la plate-forme robotisée : aéroglisseur totalement actionné.....149
VI.2. Le système visuel de LORA.....150
VI.2.1. L'optique de l'oeil composé élémentaire 4 facettes.....150
VI.2.2. Les angles inter-récepteurs Δφ.....151
VI.2.2.1. L'angle inter-récepteur Δφ pour les deux facettes à φ = ±90°.....151
VI.2.2.2. L'angle inter-récepteur Δφ pour les deux facettes à φ = ±45°.....152
VI.2.3. Les angles d'acceptance Δρ.....153
VI.2.4. Caractéristiques des lentilles et des photorécepteurs.....155
VI.2.5. Vérification expérimentale des caractéristiques optiques.....157

VI.2.6. Tableau récapitulatif des caractéristiques du système visuel de LORA III.....158

VI.3. Les capteurs de flux optique.....159

VI.3.1. Les étapes du traitement d'un DEM bio-inspiré.....159

VI.3.2. Améliorations apportées au DEM mixte.....162

VI.3.3. Modélisation des DEM.....165

VI.3.3.1. Présentation du modèle utilisé.....165

VI.3.3.2. Choix de la constante de flux optique ω_0.....165

VI.3.4. Validation expérimentale des DEM mixtes.....169

VI.4. Le banc d'essai en vol : données techniques.....171

VI.4.1. Le robot LORA III.....171

VI.4.1.1. La sustentation de LORA III 171

VI.4.1.2. Les propulseurs.....172

VI.4.1.3. La distribution de l'énergie.....173

VI.4.1.4. Les capteurs inertiels et angulaires.....173

VI.4.2. Le corridor expérimental.....175

VI.4.3. Câblage du banc de test.....176

VI.4.4. Le poste de commande.....177

VI.4.5. Stabilisation du cap de l'aéroglisseur.....179

VI.4.5.1. Identification de la dynamique en lacet.....179

VI.4.5.2. Boucle à verrouillage de cap.....180

Bilan de la réalisation.....182

Chapitre VII. Discussion

Résumé.....184

VII.1. Expérimentations : de l'établissement à la validation du modèle.....185

VII.1.1. Centrage dans un corridor étroit.....186

VII.1.2. Décentrage de l'abeille dans un corridor non-stationnaire.....187

VII.1.3. Décentrage de l'abeille dans un corridor présentant une absence de texture....188

VII.1.4. Suivi de paroi dans un corridor large.....189

VII.1.5. Contrôle de la vitesse d'avance dans des corridors fuselés ou non-stationnaires.... 190

VII.1.6. Réaction au vent.....193

VII.1.7. Recherches connexes.....194

VII.3. Plausibilité d'une boucle visuo-motrice LORA III à bord de l'abeille ?.....197

VII.2. Une boucle visuo-motrice LORA III dans les robots de demain ?.....198

Conclusion.....201

Références bibliographiques.....203

Chapitre I. Introduction

« Les espèces qui survivent ne sont pas les espèces les plus fortes, ni les plus intelligentes, mais celles qui s'adaptent le mieux aux changements. »

Charles Darwin [1809-1882], Naturaliste anglais

I.1. Qu'est-ce que la Biorobotique ?.....20
I.2. Situation du thème de recherche au laboratoire : vers la régulation du flux optique.....21
I.3. Le régulateur en Automatique.....22
I.4. Le contrôle de vitesse et l'évitement d'obstacles dans une architecture par interactions prioritaires de R. Brooks.....23
I.5. Typologie des micro-aéronefs.....25
I.6. Le flux optique dans l'évitement d'obstacles et le contrôle de vitesse.....27
I.7. Spécificité du projet de thèse.....32

Chapitre I. Introduction

Mon projet de thèse est conduit au sein de l'équipe Biorobotique dirigée par Nicolas Franceschini dont les travaux depuis une trentaine d'années, ont permis des avancées remarquables telles que :

- l'analyse par microélectrode chez la mouche du principe de fonctionnement d'un DEM,
- la réalisation et la miniaturisation de capteurs de flux optique bio-inspirés,
- la construction du premier robot mobile totalement autonome guidé par flux optique,
- la réalisation de nombreux démonstrateurs aériens à degrés de liberté restreints pour étudier certains principes de guidage par flux optique des micro-aéronefs naturels et artificiels.

C'est dans cette évolution permanente et avec un esprit d'équipe que mon projet a pour objectif : d'identifier, de modéliser, et de transférer le système de contrôle du vol de l'abeille vers les micro-aéronefs, avec le double objectif de valider ce que nous pensons avoir compris et de l'appliquer à des véhicules réels d'échelle beaucoup plus grande que l'abeille.

I.1. *Qu'est-ce que la Biorobotique ?*

La Biorobotique* rassemble les deux domaines scientifiques que sont la Biologie et la Robotique. La Robotique mobile étudie les intéractions entre les déplacements et l'intelligence d'un robot, dans le but de réaliser automatiquement une tâche de mobilité. La Biorobotique se distingue donc de la Robotique par le fait qu'elle cherche plus spécifiquement à modéliser les traitements sensori-moteurs des animaux. La modélisation de ces traitements permet de tisser des liens étroits entre perception et action chez l'homme et l'animal. La Biorobotique permet de faire « d'une pierre deux coups » : d'une part elle procure aux robots de nouvelles capacités de mobilité, d'autre part elle jette une lumière nouvelle sur les modèles biologiques. La validation des modèles peut se faire en soumettant le robot aux mêmes conditions expérimentales que les animaux. Les robots étant dotés de facultés sensorielles et intellectuelles minimales, cela permet de dresser un modèle minimaliste des ressources nécessaires à la réalisation d'une tâche par l'animal.
Plus généralement, la Biorobotique est la branche robotique de la Bionique qui s'intéresse à l'étude des systèmes biologiques pour le développement de technologies innovantes, susceptibles d'avoir des applications industrielles (e.g., revêtements autonettoyants basés sur la feuille de lotus, revêtements aérodynamiques inspirés de la peau de requin, le Velcro® inspiré du fruit de bardane).

* Dénommée également robotique bio-inspirée, robotique d'inspiration biologique, ou robotique biomimétique.

Le bioroboticien recherche donc dans la gigantesque « banque de données naturelles » des solutions à des problèmes réputés difficiles, comme la miniaturisation des systèmes embarqués qui imposent de sévères contraintes en termes de taille, masse, et énergie. La raison d'être du bioroboticien est d'identifier le principe et la réalisation des traitements sensori-moteurs, dont il sait qu'ils ont été largement optimisés pour une certaine niche écologique au cours de la phylogénèse (théorie de l'évolution de Charles Darwin, 1859). Une fois compris, ces traitements peuvent ensuite être retranscrits en utilisant un support technologique alternatif, comme l'électronique, pour reproduire le système sensori-moteur d'un animal.

I.2. *Situation du thème de recherche au laboratoire : vers la régulation du flux optique*

Les travaux de recherche de l'équipe ont évolué de l'étude optique, neuroanatomique, et électrophysiologique du système visuel de la mouche vers la conception en 1986 du premier capteur opto-électronique bio-inspiré (Franceschini et al., 1986 ; Blanès, 1986). La disponibilité de la technologie des composants à montage de surface (CMS) au milieu des années 1980 a permis de miniaturiser ce capteur et de l'incorporer à un système de guidage dans un robot mobile totalement autonome (Fig. I.2).

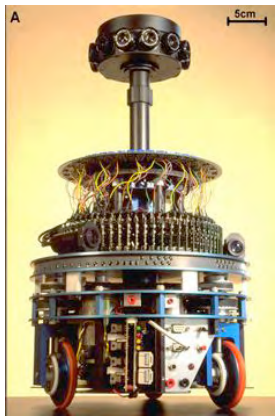

Fig. I.2. Le *robot-mouche* avec son oeil composé (visible à mi-hauteur) chargé de l'évitement d'obstacles et son oeil dorsal détecteur de cible (Franceschini et al., 1991).

En 1991 sortait du laboratoire le *robot-mouche*, équipé d'un oeil panoramique composé de 118 pixels reliés à 116 capteurs bio-inspirés (Pichon, Blanès et Franceschini, 1989 ; Pichon, 1991 ; Blanès 1991 ; Franceschini, Pichon et Blanes, 1992). D'une masse de 11 kg, ce robot mobile se déplace de manière totalement autonome à une vitesse constante et relativement élevée (50 cm/s) à travers une forêt d'obstacles – ce qui aujourd'hui encore constitue une prouesse à la fois scientifique et technologique. Les recherches se sont poursuivies en dotant le *robot-mouche* d'un contrôle de

vitesse qui le faisait automatiquement accélérer lorsque l'environnement était moins encombré (Martin et Franceschini, 1994 ; Martin 1995). Il faut souligner que le *robot-mouche* connaissait à tout instant sa propre vitesse par le biais d'un tachymétre accouplé à ses roues (Franceschini, Pichon et Blanes, 1992 ; Martin et Franceschini, 1994). La nécessité pour un robot de connaître sa vitesse d'avance pour se guider est une hypothèse forte qui perdura jusqu'en 1999 au laboratoire (Netter et Franceschini, 1999, 2002 ; Netter, 2000), comme elle perdure encore dans de nombreux laboratoires du monde. Dès 1999, des simulations ont montré qu'il était possible pour un agent de naviguer dans les airs et même d'atterrir automatiquement sans connaître sa propre vitesse (Netter et Franceschini, 1999). Le principe évoqué faisait appel à la mesure directe du flux optique. Il fut implémenté en 2002 sur un premier hélicoptère captif FANIA que l'on voyait sauter les obstacles jonchant le sol (Netter, 2000 ; Netter et Franceschini, 2002). Une formalisation du concept de *régulation du flux optique* fut faite en 2004 (Ruffier et Franceschini, 2004 ; Ruffier, 2004) et mise en oeuvre à bord d'un nouvel hélicoptère captif, OCTAVE, qui se montrait capable de suivre un relief pentu malgré diverses perturbations aérodynamiques telles que les couplages aéro-mécaniques, l'effet de sol, et le vent ; toujours sans mesurer aucunement ni sa vitesse ni son altitude (Ruffier et Franceschini, 2004, 2005, 2008 ; Ruffier, 2004).

I.3. *Le régulateur en Automatique*

Le mot *régulateur* dont il sera largement question ici sous la forme d'un « *régulateur de flux optique* » est utilisé dans le sens strict de l'Automatique. Un régulateur est un processus incorporant une rétroaction destinée à maintenir une *grandeur physique* constante et égale à une valeur désirée appelée *consigne*. Un processus de régulation peut être naturel ou artificiel. Une régulation naturelle bien connue est celle de la température du corps, régulée à 37,5°C par l'hypothalamus. Ce dernier commande la transpiration et la vasodilatation lorsque la température corporelle est plus grande que la consigne de température, ou au contraire la vasoconstriction et des contractions musculaires lorsque la température corporelle est plus faible que la consigne de température. Les variations de température sont donc des *perturbations* que le régulateur s'efforce de lisser en produisant les commandes les plus appropriées. Un des plus vieux exemples de régulateur industriel est le « régulateur à boules » pour lequel James Watt [1736-1819] déposa un brevet en 1788 (Fig. I.3). Ce régulateur était destiné à maintenir constante la vitesse de rotation (en rad/s) d'une machine à vapeur indépendamment de la production de vapeur (i.e, l'énergie disponible) et des sollicitations mécaniques (i.e., couple de charge). Le régulateur centrifuge fait appel à une véritable rétroaction incorporant un correcteur à action proportionnelle. Le débattement angulaire des boules étant proportionnel à la vitesse de rotation, tout écart du palonnier de sa position de consigne est une

image de l'erreur de vitesse de rotation, erreur qui se verra compensée par une ouverture plus grande ou plus faible du clapet d'admission de vapeur (Fig. I.3). De par sa conception, un *régulateur* incorpore donc un capteur, un comparateur, une consigne, et un correcteur[1] dans une boucle de rétroaction[2].

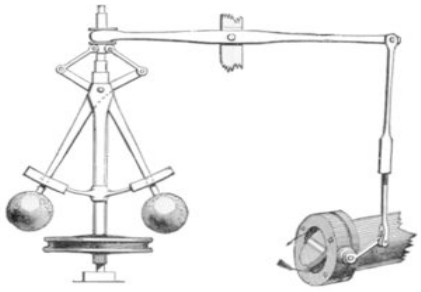

Fig. I.3. Régulateur centrifuge à boules, inventé par James Watt en 1788.

Nous développerons au cours de cette thèse le concept de *régulateur de flux optique*. Le flux optique étant une grandeur homogène à une vitesse angulaire (s'exprimant lui aussi en rad/s) (voir Chapitre **II**), un régulateur de flux optique est un régulateur de vitesse angulaire. Il sera destiné à maintenir constant le flux optique (exprimé en rad/s) d'un agent mobile (naturel ou artificiel) indépendamment des obstacles présents dans son environnement immédiat (i.e, distance aux obstacles) et des sollicitations mécaniques (i.e., vents, turbulences, gravité). La difficulté majeure d'un capteur de flux optique est qu'il est non-émissif et sans contact avec l'environnement pour mesurer une vitesse angulaire.

I.4. *Le contrôle de vitesse et l'évitement d'obstacles dans une architecture par interactions prioritaires de R. Brooks*

Initialement imaginés pour réaliser des tâches industrielles répétitives à la fin des années 1960, les robots ont été conçus sous la forme de modules fonctionnels cascadés en série (Fig. I.4.(a)). Un module de supervision assurait le transfert des informations entre les modules. Une telle architecture série peut se décomposer sous la forme de cinq modules fonctionnels :

1) percevoir l'environnement au moyen de capteurs,

2) modéliser l'environnement à partir des données capteurs,

3) planifier les tâches pour atteindre un objectif pré-programmé,

1 Appelé aussi contrôleur.

2 Le correcteur lui-même est parfois appelé « régulateur », ce que nous considérons comme un usage usurpé (que nous ne suivons pas ici). En d'autres termes, le correcteur est bien un constituant du régulateur, et le régulateur désigne l'ensemble de la boucle.

4) exécuter les tâches planifiées une à une,

5) commander les actionneurs du robot.

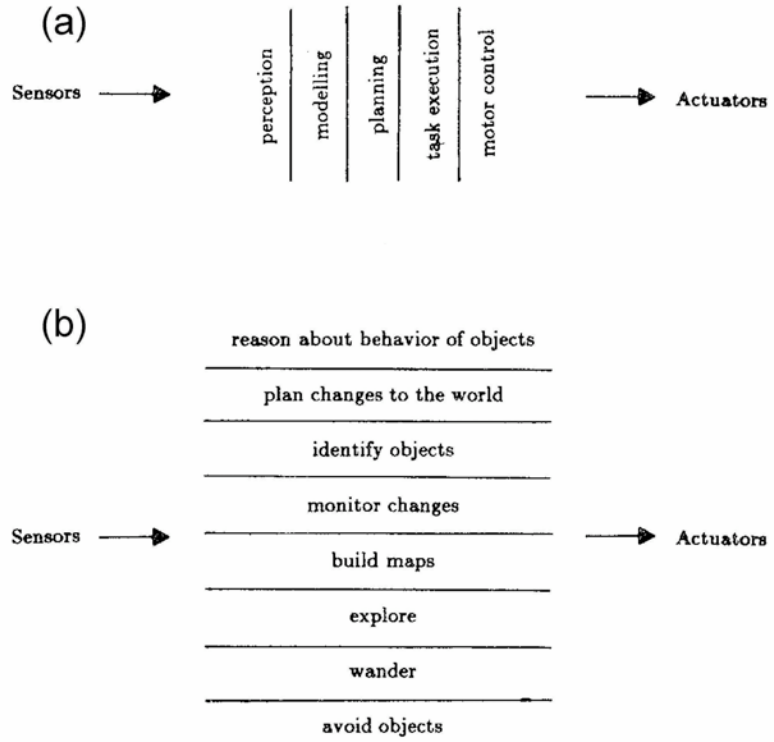

Fig. I.4. (a) Architecture décrite sous la forme de modules fonctionnels (architecture série).
(b) Architecture par interactions prioritaires décrite sous la forme de tâches comportementales (architecture parallèle). (Brooks, 1986)

Une architecture série permet d'optimiser une trajectoire, un coût énergétique, ou encore un temps de parcours. Si l'on conçoit qu'une architecture série puisse être intéressante pour la réalisation de tâches répétitives en milieu industriel, elle présente de nombreux inconvénients lorsqu'elle s'applique à des robots mobiles :

1) de nombreux capteurs sont nécessaires pour percevoir finement l'environnement;

2) la modélisation de l'environnement requiert d'importantes ressources calculatoires pour obtenir la précision escomptée, ayant pour effets un allongement des temps de calculs et une augmentation de la consommation énergétique;

3) la planification nécessite des algorithmes performants, notamment pour gérer des informations conflictuelles;

4) l'exécution du plan d'action s'opère de façon séquentielle, ce qui nécessite, dès lors qu'une tâche n'est pas réalisée, de remettre en cause le plan d'action en cours d'exécution et de réinitialiser le processus pour générer un nouveau plan d'action. Cette situation peut se présenter lorsque le robot évolue dans un environnement non-stationnaire, ce qui peut le contraindre à ralentir sa progression;

5) Seuls les modules d'entrée et de sortie sont en contact avec l'environnement. Tout dysfonctionnement d'un module d'une architecture série conduit irrémédiablement le robot à son immobilisation.
En conclusion, l'architecture série se révèle peu compatible avec les contraintes d'autonomie énergétique, de rapidité, de déplacement en environnement non-stationnaire, et de miniaturisation.

Au milieu des années 1980, Rodney Brooks a développé l'architecture par interactions prioritaires, dite « de subsomption », à l'Institut de Technologie du Massachusetts (MIT) (Brooks, 1986, 1991). Cette architecture (Fig. I.4.(b)) décompose une problématique robotique sous forme de tâches parallèles plutôt que de modules fonctionnels organisés en série. Les tâches sont ensuite organisées par ordre de priorité stricte pour éviter tout conflit. Ainsi, toutes les tâches sont reliées des entrées vers les sorties du robot (architecture parallèle), ce qui supprime l'utilité d'un superviseur. Même si l'une des tâches présente un dysfonctionnement, le robot continuera de fonctionner. Par ailleurs, une telle hiérarchie facilite l'ajout de tâches de forte priorité (dite de « bas niveau »), ou de faible priorité (dite de « haut niveau »), sans pour autant modifier l'existant. Un robot doté d'une telle architecture devient extrêmement réactif sans pour autant que son comportement soit optimisé vis-à-vis de son objectif à atteindre.
Dans la conception de R. Brooks, le travail de thèse proposé ici se consacre aux tâches de plus « bas niveau » d'un robot, que sont le contrôle de vitesse et l'évitement d'obstacles par flux optique.

I.5. *Typologie des micro-aéronefs*

Nous décrivons dans cette partie quelques-unes des plate-formes aériennes qui ont pu être utilisées pour la robotisation de micro-aéronefs volant librement. Un micro-aéronef (ou microdrone) peut être défini comme un engin volant autonome, d'envergure inférieure à 15 cm, et de masse inférieure à 100 g, dont l'autonomie de vol serait d'au moins 15 minutes. Face à de telles contraintes, encore peu réalisables aujourd'hui, de nombreux laboratoires développent actuellement des plate-formes aériennes originales (mais de taille en général beaucoup plus grande) pour explorer les possibilités de robotisation des micro-aéronefs, sachant que les connaissances acquises sur les aéronefs grandeur nature (ou sur les drones) seront difficilement appliquables à ces engins ultra-miniaturisés.
Les quatre plate-formes robotisées décrites sur la Fig. I.5.A permettent de s'affranchir des roues (ou des chenilles) de la robotique mobile conventionnelle. Les robots mobiles sont généralement des plate-formes *non-holonomes*.
Peu d'équipes ont travaillé sur des aéroglisseurs miniatures autonomes, on peut toutefois citer le CALTECH, qui développe actuellement un aéroglisseur *sous-actionné* miniature (Fig. I.5.A(a). Ce

robot a toutefois été construit dans le but d'étudier la coordination multi-véhicule (Arguiar et al., 2003; Jin et al., 2004). De plus, celui-ci n'est pas doté d'un système de vision. Une équipe japonaise a développé des algorithmes de contrôle non-linéaires pour la stabilisation de trajectoire d'un aéroglisseur *sous-actionné* miniature (Seguchi et Ohtsuka, 2003). D'autres travaux développent des algorithmes de contrôle pour la stabilisation de trajectoire d'aéroglisseurs *sous-actionnés* grandeur nature (Fantoni et Lozano, 2002).

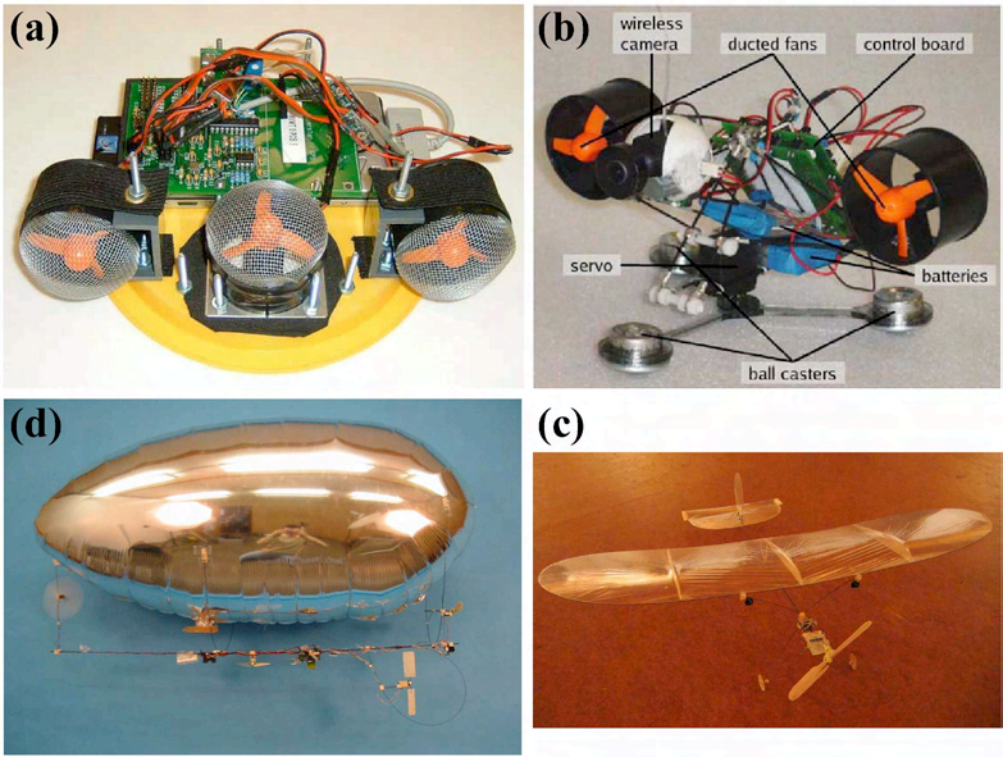

Fig. I.5.A. Diverses plate-formes robotisées sous-actionnées.

(a) Aéroglisseur sous-actionné développé par le CALTECH (projet MVWT-II). D'une masse de 750 g et de diamètre 20 cm, il vole jusqu'à une vitesse de 2,5 m/s (Jin et al., 2004).

(b) « L'araignée d'eau » (*Strider*) développée par l'université de Barcelone. D'une longeur de 16 cm, elle peut se déplacer sur trois billes jusqu'à 3 m/s.

(c) Ballon dirigeable construit à l'EPFL. D'une masse de 180 g, il peut voler jusqu'à 1 m/s (Zufferey, 2005).

(d) Avion miniature construit à l'EPFL. D'une masse de 30 g, il peut voler jusqu'à 2,5 m/s (Zufferey et Floreano, 2006).

L'université de Barcelone développe actuellement une « araignée d'eau » artificielle (*Strider*, Fig. I.5.A(b)) qui sera doté d'un système visuel inspiré de la vision du criquet (Bermudiez i Badia et Verschure, 2007). Le robot est en contact avec le sol au moyen de trois billes, ce qui le rend *holonome* dans le plan. Toutefois, il est seulement équipé de deux propulseurs arrière, comme l'aéroglisseur MTWT-II (Fig. I.5.A(a)), ce qui le rend également *sous-actionné*.

L'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Laboratoire LIS de l'EPFL) a développé une série de plate-formes robotisées (Zufferey et Floreano, 2005, 2006) utilisant la vision du mouvement pour

éviter les obstacles : un robot mobile *non-holonome* à roue (*Khepera*), un dirigeable (Fig. I.5.A(d)) et un avion (Fig. I.5.A(c)) miniatures *sous-actionnés*.

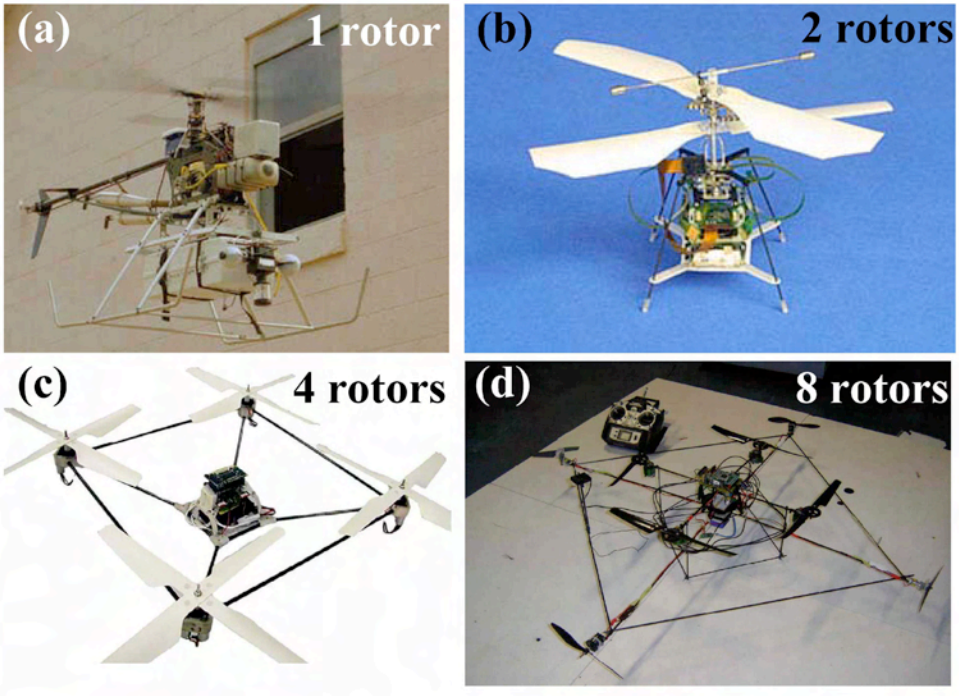

Fig. I.5.B. Aéronefs robotisés à voilures tournantes.

(a) Hélicoptère conventionnel (Hrabar et al., 2004, 2005).

(b) Micro hélicoptère coaxial développé par la compagnie japonaise EPSON (http://www.epson.co.jp/). Ce *Micro Flying Robot* (μFR) ne pèse que 12,5 g et peut se déplacer jusqu'à 0,15 m/s. Les rotors sont motorisés par des micromoteurs ultrasoniques.

(c) Hélicoptère quadrirotor (configuration en croix dite « X4 ») (Guenard et al., 2008). D'une masse de 550 g et d'une envergure de 50 cm, il peut se déplacer jusqu'à 1 m/s.

(d) Aéronef totalement actionné par 8 rotors (Romero et al., 2007).

Les aéronefs à voilures tournantes (Fig. I.5.B) sont généralement des véhicules aériens *sous-actionnés* : seuls quatre des six degrés de liberté de ces véhicules aériens (Fig. I.5.B(a-c)) sont commandables (l'amplitude de la poussée vectorielle et les trois couples). Une exception est l'aéronef à huit rotors (Fig. I.5.B(d)) développé par l'Université Technologique de Compiègne (HEUDIASYC UTC), qui est *totalement actionné* (Romero et al., 2007).

De nombreux projets développent actuellement des micro-hélicoptères coaxiaux à voilure contra-rotative (e.g., Fig. I.5.B(b)) : le projet MICOR (Bohorquez et al., 2003 ; Pires and Bohorquez, 2006), le projet muFly (Bouabdallah et al., 2006), ainsi que des quadrirotors (Castillo et al., 2005 ; un état de l'art en est donné par Bouabdallah, 2007 ; Hoffmann et al., 2007 ; Guenard et al., 2008 ; Guerrero-Castellanos et al., 2008).

I.6. *Le flux optique dans l'évitement d'obstacles et le contrôle de vitesse*

Durant les années 1980, la mise au point d'algorithmes robustes par des méthodes différentielles de calcul du flux optique à partir de séquences d'images (e.g., méthode de Lucas et Kanade (1981), et méthode Horn et Schunck (1981)) ou la mise au point de capteurs de flux optique dédiés (Blanes, 1986 ; Franceschini et al., 1986) ont favorisé le développement de robots mobiles guidés par la vision du mouvement. Contrairement aux sonars, radars, ou LIDAR* habituellement utilisés en robotique mobile, la vision du mouvement utilise des capteurs *non-émissifs*, ce qui les rend particulièrement intéressants pour leur utilisation à bord de micro-aéronefs, dont l'énergie embarquée est terriblement limitée.

Nous nous limitons ici à l'état de l'art des stratégies de guidage par flux optique pour l'évitement d'obstacles et le contrôle de vitesse. La navigation par flux optique fait partie de ce que l'on appelle la navigation sans carte (*mapless navigation*) ou navigation de proximité (*local navigation*), car elle permet à un robot d'accomplir des tâches d'évitement d'obstacles sans avoir recours à une représentation interne de l'environnement (Rev. biorobotique: Frantz et Mallot, 2000 ; Rev. robotique : DeSouza et Kak, 2002).

Le premier robot du genre doté d'une navigation par flux optique fut le *robot-mouche* (Pichon, Blanès et Franceschini, 1989 ; Pichon, 1991 ; Blanès 1991 ; Franceschini, Pichon et Blanes, 1992). Ce robot (Fig. I.2.) se déplaçait à une vitesse constante (50 cm/s) tout en mesurant le flux optique. A la fin d'une translation élémentaire à vitesse constante, le robot s'arrêtait puis se dirigeait dans la direction où la distance aux obstacles étaient la plus grande, tout en maintenant sa consigne de but (se diriger vers une source lumineuse). Les distances étaient évaluées en calculant le quotient vitesse/flux optique. Parallèlement à ces travaux, il a été montré que les abeilles utilisaient le flux optique latéral pour se centrer le long d'un corridor étroit (Kirchner et Srinivasan, 1989 ; Srinivasan et al., 1991). Pour expliquer la *réaction de centrage* de l'abeille (« centering response » en anglais), les auteurs ont émis l'hypothèse d'*équilibrage des flux optiques latéraux* (Kirchner et Srinivasan, 1989 ; Srinivasan et al., 1991).

La stratégie d'*équilibrage des flux optiques latéraux* fut rapidement appliquée en robotique. Dès 1992, Coombs et Roberts (1992) l'ont mise en oeuvre sur un robot mobile autonome, dénommé *bee-bot*. *Une paire de caméras* (champ de vue de 130°) était montée à ±30° de part et d'autre de

* LIDAR : acronyme signifiant « *Light Detection and Ranging* », un LIDAR est un télémètre basé sur un laser à balayage.

l'axe longitudinal du robot. Chaque caméra permettait de mesurer le flux optique latéral (droit ω_R ou gauche ω_L), la variation de cap du robot $\Delta\Psi$ était ensuite contrôlée par la différence des flux optiques latéraux (Eq. I.6.A).

$$\Delta\Psi = K_P \cdot (|\omega_L| - |\omega_R|) \qquad \text{Equation I.6.A}$$

Quelles que soient la vitesse V du robot ($V_{bee\text{-}bot}$ = 0,1 m/s) et la largeur locale D du corridor, la variation de cap $\Delta\Psi$ du robot devient alors proportionnelle (K_P : gain du correcteur proportionnel) à la variation de distance $\Delta D = D_R - D_L$ du robot par rapport à la ligne médiane du corridor (Eq. I.6.B).

$$\Delta\Psi \approx 4 \cdot K_P \cdot V \cdot \frac{\Delta D}{D^2} \qquad \text{Equation I.6.B}$$

Duchon et Warren (1994) critiquèrent la stratégie d'*équilibre des flux optiques latéraux* pour son incapacité à éviter les obstacles frontaux. Pour surmonter cet inconvénient, ils proposèrent de placer *une* caméra frontale, puis de diviser son champ de vue (60°) en deux parties latérales pour calculer les flux optiques droit et gauche. Le champ visuel frontal permettait également de mesurer *l'expansion de l'image* (i.e., la *divergence* du flux optique) pour évaluer le *temps-avant-impact* TTC[1] (Ancona et Poggio, 1993 ; Murray et al., 1995). Lorsque ce dernier était trop faible, le robot s'arrêtait et tourne de 90° en direction du TTC le plus élevé des deux parties latérales. La progression du robot était relativement lente (4 cm/s) à cause des temps de calcul du flux optique relativement long par une méthode différentielle.

Parallèlement, Santos-Victor et ses collaborateurs (1993 ; 1995) reprirent l'idée des *deux* caméras placées de façon divergente vers l'avant (cf. Coombs et Roberts, 1992) en dotant leur robot mobile, dénommé *robee*, de nouveaux comportements. Le robot se déplaçait également à une vitesse relativement faible (8 cm/s). *Robee* pilotait sa vitesse d'avance en maintenant le flux optique moyen *bilatéral* égal à une consigne donnée par une table de correspondance en forme de sigmoïde. Une telle table de correspondance permet de limiter naturellement la vitesse du robot. Pour gérer la présence d'ouvertures latérales, *robee* détectait l'annulation de l'un des deux flux optiques latéraux et changeait de stratégie. La statégie de suivi de paroi avait pour but de *maintenir le flux optique unilatéralement* tout en faisant avancer le robot à vitesse constante. Le robot opérait alors un *suivi de paroi* à une distance « pré-définie » (définie comme le quotient vitesse/flux optique).

D'autres robots furent construits avec quelques variantes et intégrèrent de nouveaux comportements par une architecture de subsomption (voir **I.4.**).

La stratégie d'*équilibrage des flux optiques latéraux* fut mise en oeuvre à bord de nombreux robots mobiles terrestres (Coombs et Roberts, 1992 ; Duchon et Warren, 1994 ; Santos-Victor et al., 1993,

1 TTC : *time-to-contract* en anglais

1995 ; Weber et al., 1997 ; Dev et al., 1997 ; Baratoff et al., 2000 ; Carelli et al., 2002 ; Argyros et al., 2004 ; Hrabar et al., 2005 ; Kahlouche et Achour, 2007 ; Humbert et al., 2007), ou aériens (dirigeable : Iida, 2001 ; aéroglisseur simulé : Humbert et al., 2005 ; hélicoptère simulé : Muratet et al., 2005 ; hélicoptère réel ; Hrabar et al., 2005 ; drone à voilure fixe : Griffiths et al., 2006) circulant dans des corridors ou des canyons (naturels ou urbains). Des travaux visant à optimiser cette loi de contrôle ont récemment démontré que les réactions du robot étaient optimales pour une paire de caméras orientées à ±45° de part et d'autre de l'axe longitudinal du robot (Hrabar et Sukatme, 2006).

La stratégie d'*équilibrage des flux optiques latéraux* permet à un robot de naviguer le long de la ligne médiane d'un corridor, qui est en soi une position d'*équilibre instable* car résultant de l'évitement simultané des murs droit et gauche. En présence d'une ouverture latérale, le robot engouffrera tout naturellement dans l'ouverture (si $\Delta D \rightarrow +\infty$, alors $\Delta \Psi \rightarrow +\infty$ dans Eq. I.6.B). De simples correcteurs proportionnels (Eq. I.6.B) furent utilisés pour piloter le cap du robot (Coombs et Roberts, 1992; Duchon et Warren, 1994; Weber et al., 1997; Muratet et al., 2005...), ou bien encore des correcteurs proportionnels-dérivés (PD) pour stabiliser le robot en présence d'obstacles latéraux (Santos-Victor et al., 1995). Par contre, l'introduction d'une action intégrale (I) dans le correcteur de la boucle d'*équilibrage des flux optiques latéraux* la déstabilise (Santos-Victor et al., 1995).

La stratégie de *maintien d'un flux optique unilatéral couplée à d'une vitesse d'avance constante* fut également testée sur de nombreux robots mobiles dans des arênes ou des corridors présentant soudainement une ouverture latérale (Santos-Victor et al., 1995 ; Weber et al., 1997 ; Dev et al., 1997 ; Zufferey et Floreano, 2005). Pour stabiliser cette tâche de *suivi de paroi*, seuls des correcteurs PD ont été utilisés (Santos-Victor, 1995; Weber et al., 1997; Zufferey et Floreano, 2005) du fait qu'une dynamique latérale pilotée par le couple de lacet est de classe 2 (i.e., deux intégrations dans la chaîne directe). Le maintien du flux optique *unilatéral* fut appliqué sur des robots mobiles dont les vitesses d'avance « pré-réglées » étaient relativement faibles (8 cm/s chez Santos-Victor et al., 1995 ; 12 cm/s chez Weber et al., 1997 ; 10 cm/s chez Zufferey et Floreano, 2005). De plus, malgré ces faibles vitesses d'avance, le choix d'un *pilotage de cap* pour effectuer un *suivi de par* générait des trajectoires plus ou moins *oscillantes* (Fig. I.6.).

Le *contrôle de la vitesse d'avance*, basé sur *le maintien du flux optique bilatéral*, fut testé sur de nombreux robots mobiles (Santos-Victor et al., 1995 ; Weber et al., 1997 ; Srinivasan et al., 1999 ; Baratoff et al., 2000 ; Argyros et al., 2004) dans des corridors rectilignes et fuselés.

Des stratégies d'*évitement d'obstacles frontaux* basées sur l'*expansion de l'image* (pour estimer le TTC) furent testées sur de nombreux robots mobiles (Duchon et Warren, 1994 ; Baratoff et al., 2000 ; Kahlouche et Achour, 2006), un hélicoptère simulé (Muratet et al., 2005), des avions miniatures (Green et al., 2004 ; Zufferey et Floreano, 2005, 2006), et un dirigeable miniature (Bermudez i Badia et al., 2007).

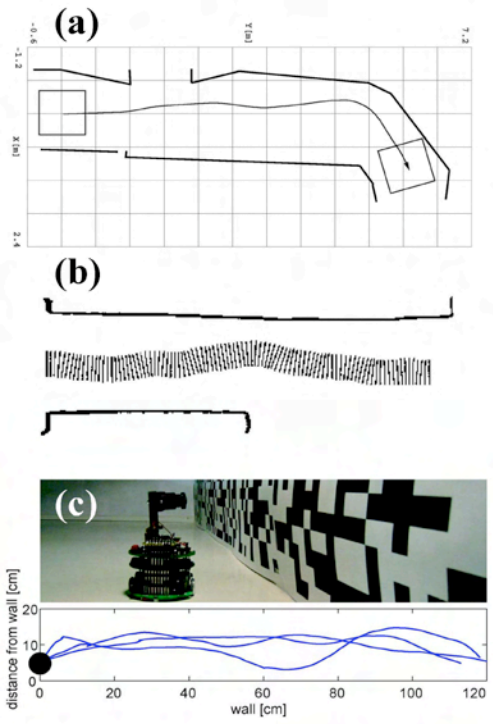

Fig. I.6. Comportements de suivi de paroi obtenus en robotique mobile en utilisant la stratégie de « maintien du flux optique unilatéral couplée à une vitesse d'avance constante ».
(a) Réaction à une ouverture latérale de type porte (d'après Santos-Victor et al., 1995).
(b) Réaction à une large ouverture (d'après Weber et al., 1997).
(c) Suivi de paroi d'un robot *Khepera* dans une arêne (d'après Zufferey et Floreano, 2005).

Enfin, l'équipe américaine de Humbert (Univerté du Maryland) développe actuellement une théorie dite de « *Convergence Visuo-motrice Bio-inspirée* » (*Bio-inspired Visuomotor Convergence*) (Humbert et al., 2005 ; Humbert, 2006). Cette théorie repose sur le développement en série de Fourier du flux optique perçu par un capteur circulaire plan échantillonnant la totalité du champ visuel horizontal. Il se trouve que certains des coefficients de cette série de Fourier dépendent, par exemple, de la position latérale ou de la vitesse du robot. Cela permet ensuite de construire un observateur d'état du système. Cette théorie fut récemment appliquée sur un robot mobile équipé d'un capteur circulaire (pas d'échantillonnage angulaire constant = 9°) pouvant se déplacer jusqu'à 21 cm/s (Humbert et al., 2007). Ce robot est alors capable de se centrer dans un corridor d'une largeur ~1 m présentant un coude à 45° à mi-chemin (Humbert et al., 2007).

I.7. *Spécificité du projet de thèse*

Ce travail de thèse résulte de quatre étapes distinctes :

1) Reprendre l'ensemble des données comportementales faisant référence à la vision du mouvement pour le guidage des insectes ailés (Chapitre **III**).

2) Concevoir un protocole expérimental permettant de clarifier si le comportement de *centrage* de l'abeille (*Apis mellifera*) est général ou s'il laisse place, dans certains cas, à d'autres comportements (Chapitre **IV**).

3) Imaginer un système de contrôle explicite rendant compte de tous les comportements observés chez l'abeille dans des corridors (rectilignes stationnaires, non-stationnaires, et fuselés) : *centrage*, *décentrage*, *suivi de paroi*, et *contrôle de vitesse*. Cette modélisation a débouché sur un *schéma explicite de contrôle*, dénommé LORA pour *Lateral Optic flow Regulation Autopilot* (pilote Automatique de Régulation du flux Optique Latéral) (Chapitre **V**) qui décrit avec précision comment l'abeille pourrait ajuster ses commandes motrices directement à partir du flux optique. Le pilote automatique LORA III est capable de faire générer à un robot aérien simulé des comportements tels que le *centrage* (dans un corridor rectiligne stationnaire), le *décentrage* (dans un corridor rectiligne non-stationnaire), le *suivi de paroi* (dans un large corridor), le *contrôle de vitesse* (dans un corridor fuselé), et de le faire réagir de façon appropriée à toute ouverture jonchant un mur, et cela dans des conditions expérimentales similaires à celles observées chez l'abeille (Chapitre **V**). L'originalité du schéma fonctionnel proposé est qu'il ne fait appel à aucune régulation de vitesse et aucune régulation de distance, et ne requiert par conséquent ni capteur de vitesse et ni capteur de distance.

4) Robotiser un aéroglisseur miniature destiné à être guidé par le pilote automatique LORA III (Chapitre **VI**).

Chapitre II.
Structuration du flux optique en fonction de la nature du mouvement

« The environment seen-at-this-moment does not constitute the environment that is seen, neither does the environment seen-from-this-point. »

« L'environnement vu-à-ce-moment ne constitue pas l'environnement qui est vu, pas plus que ne le fait l'environnement-vu-de-ce-point »

James Jerome Gibson [1904-1979], Psychologue américain

Résumé.....34

II.1 Définition du flux optique.....35

II.2. Description du flux optique en fonction du mouvement.....36

II.2.1. Flux optique généré lors d'un mouvement quelconque.....36

II.2.2. Flux optique généré lors d'une translation pure.....38

II.2.3. Flux optique généré lors d'une rotation pure.....39

II.2.4. Analyse locale du flux optique.....39

II.3. Représentation plane du flux optique.....40

II.4. La perception du flux optique par l'oeil.....41

Conclusion.....43

Résumé

Le flux optique généré par un agent mobile en translation est un champ vectoriel de vitesses angulaires qui dépend simultanément de sa distance et de sa vitesse relative par rapport aux objets composant l'environnement. Cette double dépendance confère au flux optique de translation un intérêt particulier, tant pour l'évitement d'obstacles que pour le contrôle de vitesse. Nous développerons dans ce chapitre les aspects formels mathématiques du flux optique pour en comprendre sa structuration en fonction de la nature du mouvement. Nous montrons ici l'intérêt du flux optique de translation par rapport au flux optique de rotation, toujours dans la démarche de comprendre comment ce flux optique pourrait être exploité aussi bien par les systèmes biologiques que par les systèmes robotiques dans leurs tâches quotidiennes.

Chapitre II.
Structuration du flux optique en fonction de la nature du mouvement

II.1 *Définition du flux optique*

La particularité première des animaux est qu'ils sont dotés d'un système locomoteur pour réaliser bon nombre de tâches indispensables à leur survie, telles que la chasse à haute vitesse d'un moustique par la libellule, ou encore la poursuite de la reine par les faux bourdons. L'interaction entre l'animal, sa proie, ses congénères et plus simplement les obstacles, s'opère sous guidage visuel. Les systèmes de guidage visuel sont extrêmement variés comme ceux utilisant *la parallaxe du mouvement* qui permet de percevoir l'environnement en relief (les vertébrés : von Helmholtz, 1867; les invertébrés : Exner, 1891). D'autres font appel à *la vision du mouvement* qui renvoie des informations sur la structuration 3D de l'environnement et les mouvements propres de l'animal (Gibson 1950, 1958). Ce système de guidage visuel évalue *la vitesse angulaire* d'objets texturés composant l'environnement projeté sur la rétine à travers l'oeil de l'animal (Gibson 1950, 1958). Cette vitesse angulaire est perçue comme un défilement optique ou *flux optique* (traduit de l'anglais « optic flow »). Ce flux optique est un *champ de vecteurs de vitesses angulaires* qui est généralement très complexe (Fig. II.1.A,B) puisqu'il résulte des mouvements relatifs de l'agent (homme, animal ou robot) par rapport aux objets (stationnaires ou mobiles) composant l'environnement, et de la structuration en 3D de l'environnement.

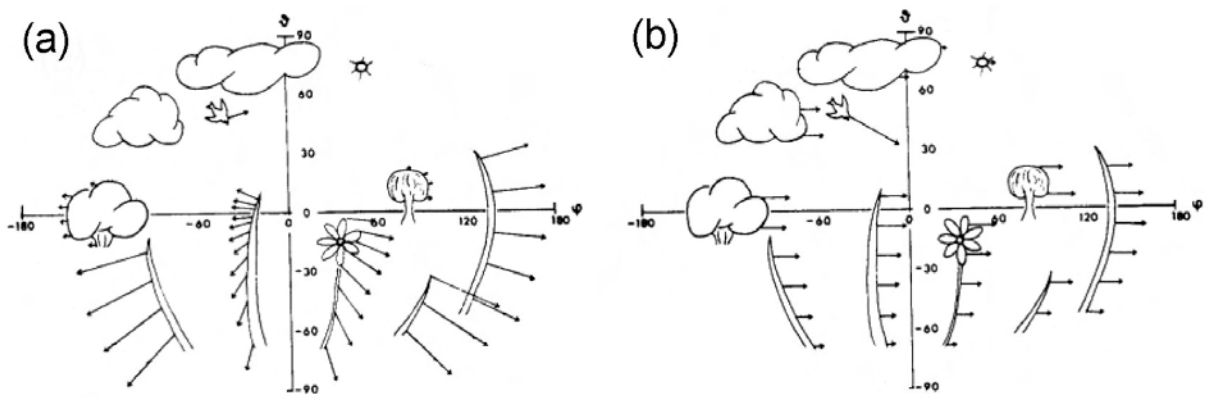

Fig. II.1.A. Structure qualitative du flux optique selon la nature du mouvement. (d'après Buchner, 1984)

(a) Lorsqu'un agent se déplace en *translation* vers le centre O, les objets proches comme la fleur ou les brins d'herbes génèrent un fort flux optique (vecteur vitesse angulaire) contrairement aux arbres lointains. Les nuages et le soleil étant quasiment à l'infini génèrent un flux optique nul.

(b) Lorsqu'un agent effectue une rotation autour de son axe vertical, au contraire, tous les éléments du paysage défilent à la même vitesse angulaire pour une élévation donnée. Remarquez l'oiseau, objet non-stationnaire vis-à-vis de l'agent, qui génère un flux optique combiné entre la rotation de l'agent et sa translation.

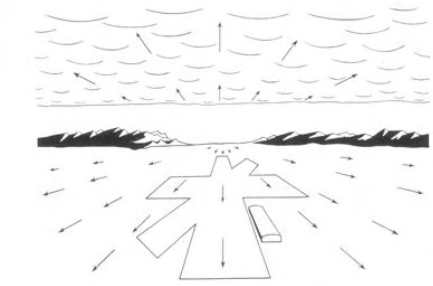

Fig. II.1.B. Champ de flux optique généré par le mouvement de translation d'un avion à l'atterrissage. Chaque vecteur représente le sens et le module de la vitesse angulaire de divers points d'espace de l'environnement. Au centre de l'image, la vitesse angulaire est nulle : c'est le foyer d'expansion ou pôle du flux optique (d'après Gibson, 1950).

II.2. *Description du flux optique en fonction du mouvement*

Le vecteur flux optique $\vec{\omega}$ est défini à partir d'une structure de champ vectoriel dont les caractéristiques dépendent de la nature du mouvement (Koenderink et van Doorn, 1987). Dans un espace tridimensionnel, on comptabilise six degrés de liberté : trois degrés de liberté en translation et trois degrés de liberté en rotation suivant les trois directions orthogonales de l'espace. Chaque mouvement donne naissance à un champ vectoriel de flux optique qui lui est propre. Par superposition, lorsque le mouvement est complexe, le champ vectoriel résultant est la sommation vectorielle de chacune des composantes des mouvements de translation et de rotation.

Nous décrirons les propriétés de champs vectoriels relatifs à un mouvement quelconque (**II.2.1.**), puis à des mouvements dans le plan pour une translation pure (**II.2.2.**) ou pour une rotation pure dans le plan (**II.2.3.**).

II.2.1. *Flux optique généré lors d'un mouvement quelconque*

De façon pragmatique, on attribue un repère local R_L à l'agent mobile situé au point O (Fig. II.2.1.) car le flux optique dépend directement des mouvements propres de l'environnement par rapport à l'agent mobile. Un point particulier de l'environnement est représenté par le point P, et on s'intéresse au mouvement du point P par rapport au point O. Cette description *égocentrique* (par rapport à l'agent au point O) est plus pertinente qu'une description *géocentrique* (par rapport à un repère absolu R_A lié au point P).

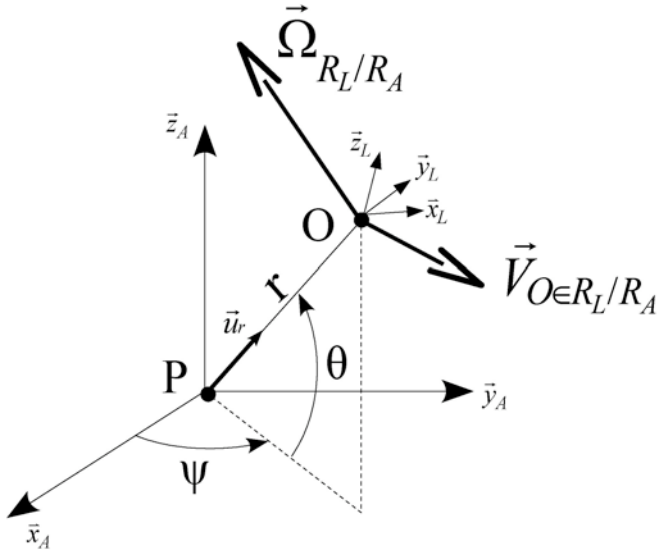

Fig. II.2.1. Paramétrage d'espace : R_A=(P, $\vec{x}_A$, $\vec{y}_A$, $\vec{z}_A$) est le repère absolu de l'environnement et R_L=(O, $\vec{x}_L$, $\vec{y}_L$, $\vec{z}_L$) est le repère local lié à l'agent mobile. $\vec{V}_{O\in R_L/R_A}$ est la vitesse de translation du point O appartenant au repère mobile R_L par rapport au repère absolu R_A. $\vec{\Omega}_{R_L/R_A}$ est la vitesse de rotation du repère mobile R_L par rapport au repère fixe R_A. $r=\|\overrightarrow{OP}\|$ est la distance entre les points O et P, ψ l'angle d'azimut et θ l'angle d'élévation.

Le vecteur flux optique résultant $\vec{\omega}$ s'écrit comme la somme (Eq. II.2.1.A) du flux optique lié aux mouvements de translation $\overrightarrow{\omega_T}$ (Eq. II.2.1.B) et du flux optique lié aux mouvements de rotation $\overrightarrow{\omega_R}$ (Eq. II.2.1.C).

$$\vec{\omega}=\overrightarrow{\omega_T}+\overrightarrow{\omega_R} \qquad \text{Equation II.2.1.A}$$

$$\overrightarrow{\omega_T}(r,\psi,\theta)=\frac{\overrightarrow{OP}\wedge\vec{V}_{P\in R_A/R_L}}{\|\overrightarrow{OP}\|^2} \qquad \text{Equation II.2.1.B}$$

$$\overrightarrow{\omega_R}(\psi,\theta)=\frac{\overrightarrow{OP}\wedge\vec{\Omega}_{R_A/R_L}}{\|\overrightarrow{OP}\|} \qquad \text{Equation II.2.1.C}$$

Certains auteurs utilisent la cartographie mesurée du champ de vecteurs de flux optique pour reconstruire la structure 3D de l'environnement (le vecteur $\overrightarrow{OP}$) et les vecteurs de translation $\vec{V}_{P\in R_A/R_L}$ et de rotation $\vec{\Omega}_{R_A/R_L}$ à partir des Eqs. II.2.1.B-C (Koenderink, 1986 ; Koenderink et van Doorn, 1987 ; Nelson et Aloimonos, 1989). Toutefois, ces méthodes nécessitent un échantillonnage spatial du flux optique suivant les 4π stéradians, des algorithmes complexes de reconstruction exigeant des temps de calculs relativement longs et une quantité d'énergie importante. Ceci provient du fait qu'à partir des mesures de la seule cartographie du flux optique $\vec{\omega}$, on cherche à reconstruire un ensemble de vecteurs positions (structure 3D de l'environnement) et les vecteurs vitesse et

rotation associés. Ce type de problème inverse est « mal conditionné » ou « mal posé », ce qui nécessite de faire un jeu d'hypothèses *a priori* (par exemple sur le caractère stationnaire de l'environnement) avant toute inversion (Koenderink, 1986). Ce dernier point est illustré par un exemple d'analyse locale du champ de flux optique (**II.2.4.**).

II.2.2. *Flux optique généré lors d'une translation pure*

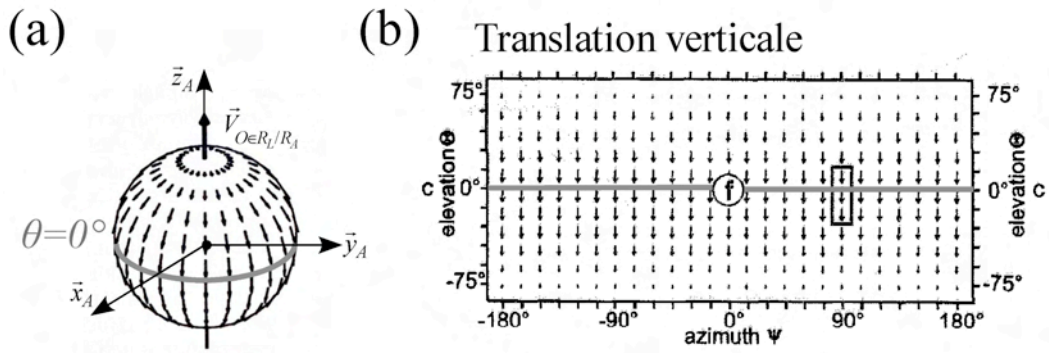

Fig. II.2.2. (a) Champ de vecteurs de flux optique généré à distance *r* constante dans le repère local de l'agent lors d'un mouvement de translation pure suivant $\vec{z}_A$.
(b) La surface de la sphère est développée dans le plan de Mercator (ψ,θ) pour mettre en évidence la carte du champ de vecteurs relative à une translation pure. Le flux optique de translation est maximum pour θ = 0°. (D'après Krapp et Hengstenberg, 1996)

Si on considère, par exemple, une *translation verticale* pure suivant le vecteur $\vec{V}_{O\in R_L/R_A}=-\vec{V}_{P\in R_A/R_L}$ (porté par $\vec{z}_A$ sur la Fig. II.2.2.(a)), on met en évidence un axe particulier suivant lequel le flux optique est nul. Cet axe s'appelle l'axe des foyers (ou pôles) du flux optique. Sur le plan de Mercator (azimut = ψ, élévation = θ) Fig. II.2.2.(b), le point en (ψ = 0°, θ = 90°) s'appelle le foyer d'expansion (FOE) du flux optique, alors que point opposé en (ψ = 0°, θ = -90°) s'appelle le foyer de contraction (FOC) du flux optique. Une propriété remarquable de ce flux optique de translation est qu'il est maximum sur le cercle représentant tous les points d'élévation θ = 0° (Fig. II.2.2.(b)). Pour maximiser la détection de flux optique de translation, il faut donc le mesurer orthogonalement au sens de déplacement de l'agent.

$$\|\vec{\omega_T}(r,\theta)\|=\frac{V_{P\in R_A/R_L}\cdot\cos\theta}{r} \qquad \text{Equation II.2.2}$$

L'équation II.2.2 (calculée à partir de l'Eq. II.2.1.B) montre que le flux optique de translation est fonction du quotient du module de la vitesse $\|\vec{V}_{P\in R_A/R_L}\|$ sur la distance $r=\|\overrightarrow{OP}\|$. Ce flux optique dépend donc de la distance aux obstacles et de la vitesse relative des obstacles par rapport à l'agent. Nous montrerons par la suite que sa mesure à bord d'un agent autonome permet de réaliser des

tâches particulièrement importantes d'évitement d'obstacles et de contrôle de vitesse.

II.2.3. *Flux optique généré lors d'une rotation pure*

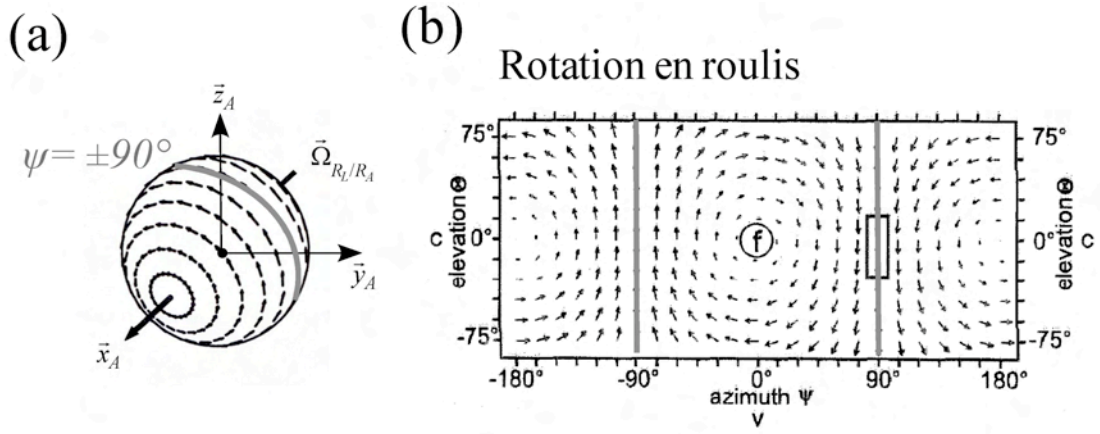

Fig. II.2.3. (a) Champ de vecteurs de flux optique généré à distance *r* constante dans le repère local de l'agent lors d'un mouvement de rotation en roulis suivant $\vec{x}_A$.

(b) La surface de la sphère est développée dans le plan de Mercator (ψ,θ) pour mettre en évidence la carte du champ de vecteurs relative à une rotation pure en roulis. Le flux optique de rotation est maximum lorsque $\psi = \pm 90°$.

(D'après Krapp et Hengstenberg, 1996)

Pour une rotation en roulis de l'agent $\vec{\Omega}_{R_A/R_L}$ ($P \in$ surface de rayon *r*), le flux optique de rotation (Fig. II.2.3.(a)) est nul suivant l'axe de roulis. Cet axe passe par les points (ψ=0°, θ=0°) et (ψ=180°, θ=0°) dans le plan de Mercator (Fig. II.2.3.(b)). L'Eq. II.2.3 (calculée à partir de l'Eq. II.2.1.C) montre que le flux optique de rotation est indépendant de la distance aux objets (distance *r*). C'est pourquoi, une mesure du flux optique de rotation ne permet pas de réaliser des tâches d'évitement d'obstacles. Bien au contraire, il conviendra de s'en affranchir pour détecter seulement le flux optique de translation.

$$\|\vec{\omega}_R(\psi,\theta)\| = \Omega_{R_A/R_L} \cdot \sqrt{(1-\cos^2\psi \cdot \cos^2\theta)} \qquad \text{Equation II.2.3}$$

II.2.4. *Analyse locale du flux optique*

Lorsqu'on analyse les cartes de vecteurs relatifs à deux mouvements bien distincts : translation verticale (Fig. II.2.4.(a)) et rotation en roulis (Fig. II.2.4.(b)), on constate que *localement* ces deux champs peuvent être identiques (voir le zoom sur la Fig II.2.4.). En cherchant alors à reconstruire le mouvement dont cette carte de flux optique est issue, on se heurte à l'ambiguïté dans la détermination de la nature du mouvement : translation ou rotation ? Il convient donc d'analyser la

carte du flux optique sur un large champ du plan de Mercator plutôt que localement. Il faut alors mettre en oeuvre des méthodes de fusion ou d'intégration à large champ du flux optique pour lever l'indétermination du mouvement dont un flux optique donné est issu. Par cette simple analyse mathématique, nous cherchons à montrer une certaine similitude neurophysiologique avec la sensibilité au flux optique des neurones à large champ présent dans le troisième ganglion optique de la mouche (la *lobula* plate). On sait en effet que ces neurones à large champ répondent spécifiquement à des mouvements de rotation ou de translation et qu'ils réalisent une intégration spatiale judicieuse du flux optique, les rendant capables de discriminer tous les types de mouvement (Chapitre **III**).

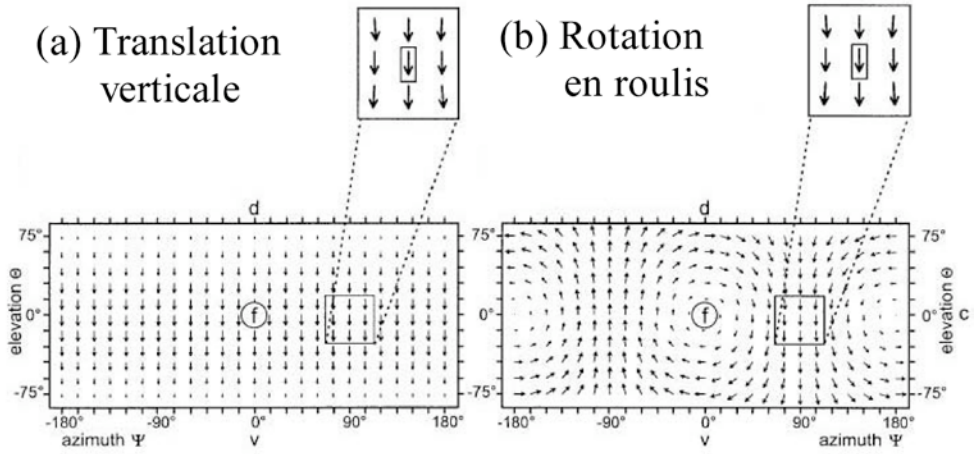

Fig. II.2.4. (a) Plan de Mercator du champ de vecteurs de flux optique d'un agent se déplaçant en translation verticale suivant $\vec{z}_A$.

(b) Plan de Mercator du champ de vecteurs de flux optique d'un agent produisant un roulis autour de $\vec{x}_A$.

(D'après Krapp et Hengstenberg, 1998)

II.3. *Représentation plane du flux optique*

Le flux optique $\boldsymbol{\omega}$ est homogène à une vitesse angulaire (rad.s^{-1} ou °.s^{-1}). C'est donc une grandeur physique de nature cinématique. Considérons un point P (Fig. II.3.) en mouvement de translation à une vitesse $\vec{V}_{P\in R_A/R_L}$ par rapport à un point O:

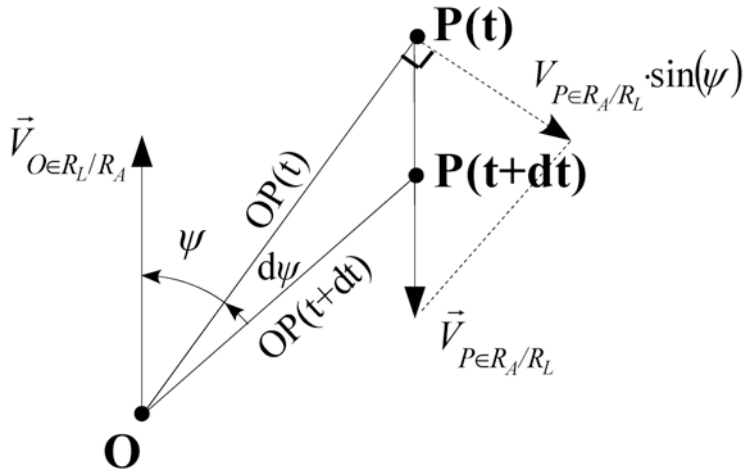

Fig. II.3. Flux optique de translation généré par le point P par rapport au point O dans le plan. Lorsque le point P se translate suivant le vecteur vitesse $\vec{V}_{P\in R_A/R_L}$, il génère une vitesse angulaire $\omega=d\Psi/dt$ par rapport à O.

Le point O est le centre instantané de rotation du point P, on peut alors calculer la vitesse angulaire $\omega_T=\frac{d\psi}{dt}$, sachant que $\frac{\sin d\psi}{V_{P\in R_A/R_L}\cdot dt}=\frac{\sin(\psi+d\psi)}{OP(t)}$ en appliquant la règle des trois sinus dans le triangle OP(t)P(t+dt). Puis, en effectuant un développement limité au premier ordre, le flux optique de translation s'écrit :

$$\omega_T(r,\psi)=\frac{d\psi}{dt}=\frac{V_{P\in R_A/R_L}\cdot\sin\psi}{r} \qquad \text{Equation II.3}$$

Le flux optique de translation s'écrit alors simplement sous la forme de l'Eq. II.3 (Whiteside et Samuel, 1970) avec comme paramètres :

- $\|\vec{V}_{P\in R_A/R_L}\|=V_{P\in R_A/R_L}$: le module de la vitesse de translation du point P rattaché à l'environnement par rapport au point O rattaché à l'agent.

- $r=OP$: la distance entre le point P de l'environnement et le point O de l'agent.

- ψ : l'angle relatif d'azimut défini entre la direction de visée du point P $\overrightarrow{OP}(t)$ et la direction de déplacement $\vec{V}_{P\in R_A/R_L}$.

II.4. *La perception du flux optique par l'oeil*

Le flux optique ω (Fig. II.4.(a)) est défini comme étant la vitesse angulaire de défilement de l'image projetée sur la rétine. Dans le plan focal, cette vitesse angulaire balaye la rétine de P'(t) à P'(t+dt) suivant une rangée de photorécepteurs de telle sorte à produire une vitesse linéaire de glissement $V_{P'}$ dépendante de la distance focale f de la lentille de l'œil camérulaire ou composé (Fig. II.4.(b)). La translation du point P'(t) sur la rétine, image d'un point de l'espace P(t), dépend directement du flux optique (Eq. II.4).

$$V_{P'} = -\frac{f}{OP} \cdot V_{P \in R_A/R_L} \cdot \sin\psi \qquad \text{Equation II.4}$$

La distance focale f (f_{humain} = 20 mm et Φ_{oeil} = 25 mm, f_{insect} = 50 µm et $\Phi_{facette}$ = 25 µm) est largement inférieure aux distances OP des obstacles couramment rencontrés dont les distances varient de quelques dizaines de centimètres à quelques mètres (OP_{min} = 25 cm = *punctum proximum* et $OP_{max} = \infty$ = *punctum remotum* pour l'oeil humain). La focale opère donc une réduction d'échelle importante (f/OP) entre la vitesse linéaire V_P du point P dans l'espace et la vitesse linéaire $V_{P'}$ de glissement de l'image sur la rétine, qui se trouve ainsi fortement réduite. Cela stimule alors deux photorécepteurs adjacents avec un retard temporel accru (voir Chapitres **III** et **IV**). Or, il semble plus facile pour un système nerveux ou électronique de mesurer des retards temporels lents plutôt que rapides.

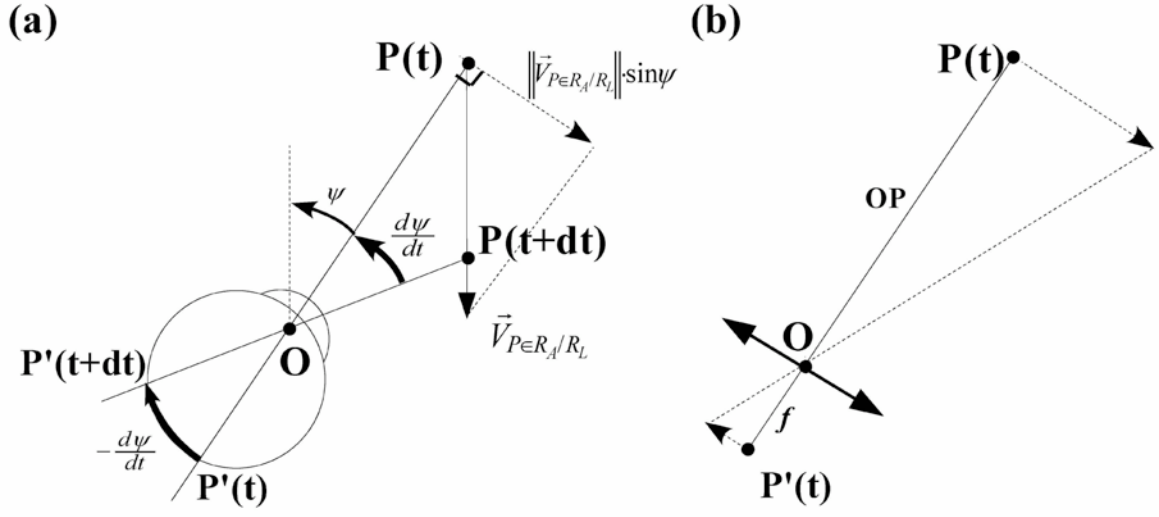

Fig. II.4. Illustration de la perception du flux optique par un œil camérulaire.

(a) Le point P est animé d'un mouvement de translation par rapport au point nodal de l'œil O. Le point P' sur la rétine de l'œil, image du point P, balaye celle-ci avec une vitesse de rotation apparente $\omega = -d\psi/dt$. Ce balayage couvre dans le plan azimutal une barrette linéaire de photorécepteurs de la rétine.

(b) Le point nodal O de l'oeil représente le centre de la lentille convergente du système optique de focalisation. La focale f opère un changement de vitesse linéaire pour qu'elle soit dans la plage de mesure des capteurs de flux optique en aval des photorécepteurs de la rétine.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit comment la nature même du mouvement d'un agent contribue à structurer le flux optique. Privilégier des mouvements de translation permet de générer un flux optique qui dépend à la fois de la distance et de la vitesse relative aux objets, contrairement aux perspectives offertes par le flux optique de rotation, qui reste indépendant de la distance. Ce simple constat mathématique permet de comprendre pourquoi les insectes volants semblent privilégier les mouvements de translation lors de leur déplacement (Chapitre **III**), ce qui suggère également que les insectes sont capables de discriminer les mouvements de translation des mouvements de rotation. Nous avons évoqué brièvement comment un insecte ailé peut faire, grâce à des neurones à large champ, sensibles au mouvement. Pour l'heure, les insectes nous montrent, par leurs prouesses comportementales, qu'ils savent mieux inverser les équations du flux optique que nos meilleurs mathématiciens.

Chapitre III. Démarches d'étude neurophysiologique et comportementale de l'abeille (*Apis mellifera*)

« Si l'abeille venait à disparaître, l'homme n'aurait plus que quelques années à vivre.
Les abeilles sont les sentinelles du monde. »

Albert Einstein [1879-1955], prix Nobel de Physique 1921

Résumé ***46***

III.1. L'insecte ailé : un support d'étude de référence ***47***

III.1.1. L'arbre phylogénique des insectes ailés ***47***

III.1.2. Modalités sensorielles chez les insectes ailés ***49***

III.1.3. La mouche : un modèle d'inspiration neurophysiologique ***50***

III.1.4. L'abeille : un modèle d'inspiration comportementale ***51***

III.1.5. Modalités de propulsion chez les insectes ailés ***52***

III.2. Les aspects neurophysiologiques de l'abeille ***54***

III.2.1. Son oeil composé ***54***

III.2.2. Son système visuel rétinotopique ***57***

III.2.3. Les neurones détecteurs de mouvement à large champ visuel ***59***

III.2.3.1. Les neurones accordés à la vitesse angulaire (neurones VT) ***60***

III.2.3.2. Les neurones optomoteurs ***60***

III.3. Les aspects comportementaux de l'abeille ***62***

III.3.1. La réaction optomotrice ***62***

III.3.2. La réaction de centrage ***63***

III.3.3. Le contrôle de la vitesse ***65***

III.3.4. L'atterrissage et le suivi de terrain ***67***

Conclusion ***69***

Chapitre III. Démarches d'étude neurophysiologique et comportementale de l'abeille (*Apis mellifera*)

III.1. *L'insecte ailé : un support d'étude de référence*

Quel homme muni d'une tapette à mouches n'a jamais été mis en échec par un misérable insecte volant ? Les insectes ailés sont des modèles biologiques atypiques pour l'étude des liens entre perception et action. Contrairement aux aéronefs artificiels construits depuis un siècle, les insectes ailés contrôlent leur navigation de façon totalement autonome depuis plus d'un million de siècles, au cours desquels leur système nerveux a été largement éprouvé et perfectionné.

III.1.1. *L'arbre phylogénique des insectes ailés*

Les libellules appartiennent à l'ordre des Odonates beaucoup plus ancien que celui des Diptères (qui inclut la mouche et le moustique) et celui des Hyménoptères (qui inclut les insectes sociaux comme l'abeille, la fourmi, ou la guêpe, Fig. III.1.1.(a) et (b)). Sur le plan morphologique, les Hyménoptères ont la particularité de posséder deux paires d'ailes couplées mécaniquement l'une à l'autre, les ailes antérieures étant plus larges que les postérieures. L'aile postérieure est reliée à l'aile antérieure par 23 crochets, les rendant ainsi solidaires l'une de l'autre. Les deux paires d'ailes battent donc en phase, formant une voilure battante biplane. Les Diptères sont phylogéniquement plus modernes que les Hyménoptères (Fig. III.1.1.(b)). Ils incluent les différentes espèces de mouches (e.g., la Drosophile sur la Fig. III.1.1.(c)) et les moustiques. Ils possèdent une seule paire d'ailes, la seconde s'étant transformée par phylogenèse en balanciers. Ces balanciers ont la particularité de battre en opposition de phase avec la seule paire d'ailes existante. Chez les Hyménoptères, les ailes sont insérées sur le deuxième et le troisième segment thoracique. Chez les Diptères, la paire d'ailes du troisième segment est remplacée par une paire de balanciers. Cette différence se fait sous le contrôle d'un gène appelé *Ultrabithorax*. La mutation de ce gène chez la Drosophile (Fig. III.1.1.(c)) aboutit à un diptère possédant deux paires d'ailes (Fig. III.1.1.(d)).

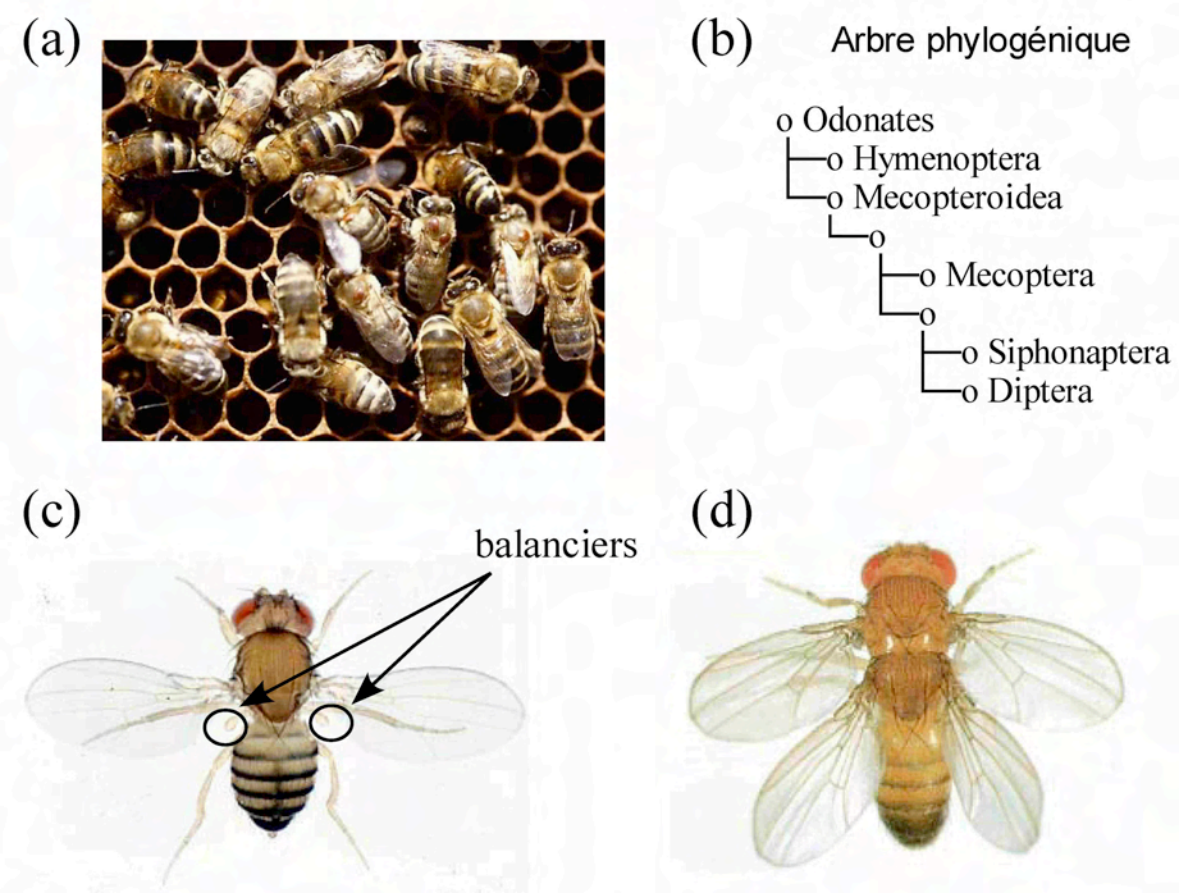

Fig. III.1.1. (a) Abeille domestique *Apis Mellifera* de l'ordre des Hyménoptères.

(b) Arbre phylogénique situant les Diptères par rapport aux Hyménoptères.

(c) Drosophile naturelle avec une paire d'ailes et une paire de balanciers.

(d) Activation du gène *Ultrabithorax* donnant naissance à une drosophile mutante dont la paire de balanciers s'est transformée en paire d'ailes (Ghysen et al., 1985).

Les Diptères apparaissent donc plus évolués sur le plan phylogénique que les Hyménoptères. De façon générale, les Diptères sont plus manoeuvrables et ont des performances dynamiques accrues (Tab. III.1.1.) par rapport aux Hyménoptères car ils ont développé une modalité sensorielle inertielle performante via l'organe des *balanciers* (Fig. III.1.1.(c)). Une telle modalité sensorielle n'a pas encore été identifiée chez les Hyménoptères.

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

Tab. III.1.1. Comparatif des dynamiques de la mouche bleue: *Calliphora Vicina* (Schiltra et van Hateren, 1999) par rapport à l'abeille *Apis Mellifera* (données reconstruites à partir la Fig. 6 dans Srinivasan et Lehrer, 1988).

III.1.2. *Modalités sensorielles chez les insectes ailés*

En plus des yeux composés dont il sera question au III.2.1., les insectes font appel à divers organes sensoriels pour se piloter dans les airs :

(i) les antennes sont sensibles à la vitesse de l'insecte par rapport à l'air (Saager et Gewecke, 1985, 1989 ; Dudley, 2000) et à de multiples molécules odorantes. Mais des travaux récents (Sane et al., 2007) viennent élargir leur rôle sensoriel à la modalité inertielle. Sane et ses collaborateurs (2007) ont récemment montré que les antennes du papillon de nuit (*M. sexta*) vibrent et sont sensibles à la force d'inertie de Coriolis. Elles joueraient ainsi la même fonction sensorielle que celle des *balanciers* chez les Diptères. En effet, les antennes du papillon de nuit vibrent à la même fréquence (fréquence de résonance à 27 Hz) que celle du battement d'ailes (entre 20 et 30 Hz), et les neurones mécano-récepteurs à la base des antennes répondent linéairement à la fréquence de stimulation (Sane et al., 2007). Par ailleurs, les axones issus de ces neurones se projettent directement dans le second ganglion cérébroïde (le *deutocerebrum*) de l'insecte.
Les antennes sont également sensibles à la gravité, faculté qu'elles mettent à profit lors de leur locomotion au sol. En revanche, les abeilles volant librement ne seraient pas sensibles à la gravité. « *Les observations faites par les spécialistes de la mission* (NASA Space mission en avril 1984) *concernant la construction* (des rayons d'une ruche), *les activités de vol et de nettoyage indiquent un comportement normal des abeilles* » (Vandenberg et al., 1985, page 381). Le vol des abeilles en apesanteur est normal, une abeille volant librement ne disposerait donc pas d'un inclinomètre à bord de son cockpit. Toutefois, les spécialistes de la mission ajoute : « *les axes des cellules construites en apesanteur n'ont pas tous été orientés vers le bas* ». Nous savons par ailleurs que la gravité joue un rôle dans la construction de la ruche parce qu'elle indique la verticalité à la colonie. La gravité joue également le rôle de cap de référence lors de la danse de l'abeille. Qu'il s'agisse de construction ou de communication, les abeilles réalisent ces deux tâches alors qu'elles sont en contact avec le sol. Les abeilles en contact avec le sol seraient sensibles à la gravité grâce à leurs antennes qui joueraient alors le rôle d'inclinomètre (Horn, 1975 ; Horn et Kessler, 1975). Les antennes auraient ainsi deux modes de fonctionnement : un mode oscillant en vol, un mode continu au sol.

(ii) les cils sont des mécano-récepteurs recouvrant les insectes de la tête aux ailes. Il a également été montré que les cils situés entre la tête et le corps de la mouche jouaient le rôle de capteur de position angulaire proprioceptif (angles relatifs tête-corps) (organe prosternal : Preuss et Hengstenberg, 1992).

(iii) les ocelles sont trois petits yeux formant un triangle au sommet de la tête de l'insecte. L'ensemble de leurs fonctions n'est pas encore clairement défini, toutefois elles sont impliquées dans la phototaxie et la stabilisation du vol de l'insecte (la libellule : Stange, 1981 ; le criquet : Taylor, 1981 ; la mouche : Wehrhahn, 1984 ; l'abeille : Kasberger, 1990). Des travaux chez la libellule ont montré que les ocelles jouent le rôle de *détecteurs d'horizon* lorsque celui-ci est visible. Mais de nombreux insectes sont capables de voler aussi bien dans une forêt dense ou à l'intérieur de bâtiments.

(iv) les balanciers, présents seulement chez les Diptères, sont sensibles à la vitesse de rotation du corps de l'insecte suivant les trois axes de rotation. Les balanciers (Fig. III.1.1.(c)) battent en opposition de phase avec les ailes, et sont sensibles à la force d'inertie de Coriolis. Ce sont de véritables *gyromètres* trois axes. Des expériences comportementales ont révélé que la vitesse de rotation (roulis) était mieux estimée visuellement que de façon inertielle pour des vitesses inférieures à 50 °/s, mais que l'information inertielle devenait prépondérante à partir de 300 °/s et jusqu'à 1800 °/s (limite expérimentale) (Hengstenberg, 1988 ; Sherman et Dickinson, 2003). La vitesse de rotation de l'insecte peut donc être acquise par diverses modalités sensorielles selon que la modalité est un caractère passe-bas (la vision du mouvement) ou un caractère passe-haut (les balanciers).

(v) Les deux yeux composés dote l'insecte d'un système visuel *achromatique* pour la vision du mouvement, d'un système visuel *trichromatique* pour la vision des couleurs (voir **III.2.1.**), et d'un système de détection de la *lumière polarisée* permettant à l'insecte de garder son cap par rapport au Soleil (voir aussi **III.2.1.**).

III.1.3. *La mouche : un modèle d'inspiration neurophysiologique*

La mouche domestique (*Musca domestica*) est le modèle biologique qui a été le plus étudié au laboratoire. Les motivations de cet engouement sont les suivantes (Franceschini, 1999) :

- Un oeil de mouche ne dénombre que 24.000 photorécepteurs, alors que celui d'un oeil humain en dénombre 126 millions (dont 6 millions de cônes situés essentiellement dans la fovea et 120 millions de bâtonnets dans la rétine périphérique). Une rétine de mouche possède donc 5250 fois moins de photorécepteurs que celle de l'homme. Il est donc plus facile de comprendre comment se forme une image ordonnée sur une rétine de mouche.

- Le système nerveux de la mouche compte un million fois moins de neurones que celui d'un homme (~10^6 neurones chez la mouche à comparer aux ~10^{12} chez l'homme). Comprendre le fonctionnement d'un système nerveux d'un million de neurones est déjà en soi un défi.

- La mouche présente l'avantage d'avoir des photorécepteurs bien individualisés offrant la possibilité de les stimuler individuellement (Franceschini, 1975).

- La forte variabilité anatomique des vertébrés, comme l'homme, nécessite de projeter l'anatomie du sujet sur un modèle de référence pour étudier la localisation cérébrale des fonctions cognitives humaines (par exemple, l'espace stéréotaxique de Talairach pour le cerveau humain, e.g., Pinel et al. 2007). Les invertébrés, en revanche, offrent une anatomie plus constante, un atout majeur pour cartographier de façon exhaustive les ganglions optiques et leurs neurones (pour la mouche voir Strausfeld, 1976, 1989). Chez la mouche, on compte 65 neurones détecteurs de mouvement à large champ regroupés au niveau du dernier ganglion optique (la *lobula plate*). Les connaissances sur un même neurone peuvent ainsi s'accumuler au cours du temps.

- Une mouche cache derrière sa verrière multi facettes des boucles visuo-motrices contrôlant en particulier la locomotion aérienne. Des études comportementales quantitatives (e.g., la *réaction optomotrice*, voir **III.3.1.**) peuvent ainsi être mises en relation avec des caractéristiques de son système visuel.

III.1.4. *L'abeille : un modèle d'inspiration comportementale*

L'abeille domestique est un insecte fortement impliqué dans les activités humaines. Elle est domestiquée depuis l'antiquité (le pharaon Touthmonis III fit de l'abeille le symbole de la basse Egypte) et est responsable de la pollinisation des cultures. Au milieu du XX^{ième} siècle, l'éthologue autrichien Karl von Frisch, prix Nobel de Physiologie/Médecine 1973, est récompensé pour ses travaux sur le *langage* de l'abeille, qui communique à ses congénères la position d'une source de nectar par une *danse frétillante*.

Sur le plan comportemental, la particularité première des abeilles que nous exploitons est la *constance florale*. Une butineuse exploite une source de nectar tant que celle-ci est rentable. On peut ainsi apprendre à une abeille à venir récolter en un endroit bien défini une *source artificielle de nectar* à base d'eau sucrée. L'abeille viendra tant que cette source sera présente et recrutera des

congénères dans la ruche. On crée ainsi des liaisons aériennes régulières entre la ruche et le nectar qui vont permettre d'enregistrer des trajectoires de manière reproductible pour tenter de décrypter les boucles visuo-motrices qui en sont à l'origine.

Sur le plan neurophysiologique, chaque ommatidie[1] de l'abeille présente la particularité de posséder un rhabdomère fusionné commun à toutes les cellules photoréceptrices (Gribakin, 1975), ce qui représente une différence majeure avec le système visuel de la mouche. Cette configuration optique ne permet pas de stimuler individuellement chacun des photorécepteurs d'une ommatidie. De plus, le complexe lobulaire de l'abeille (dernier ganglion optique) n'est pas scindé en deux ganglions (la *lobula* et la *lobula plate*) comme celui de la mouche. Les neurones détecteurs de mouvement à large champ de l'abeille ne sont donc pas aussi bien regroupés dans un même ganglion optique que celui de la mouche. C'est pourquoi la littérature est beaucoup moins riche sur l'étude des neurones détecteurs de mouvement à large champ de l'abeille que ceux de la mouche.

III.1.5. *Modalité de propulsion chez les insectes ailés*

Les abeilles se déplacent au moyen de leurs deux paires d'ailes. Elles peuvent agir aussi bien sur l'amplitude que sur la direction de la force de poussée vectorielle. L'amplitude de la poussée vectorielle dépend à la fois de la fréquence et de l'amplitude du plan de battement d'ailes. Altshculer et ses collaborateurs (2005) ont observé des abeilles en vol stationnaire dans l'air (21% O_2, 79% N_2) et dans l'héliox (21% O_2, 79% He) pour étudier l'amplitude du plan de battement d'ailes sur la portance (l'héliox étant trois fois moins dense que l'air). Les auteurs ont constaté que pour maintenir son vol stationnaire, l'abeille augmentait l'*amplitude* de ses battements d'ailes (de 91° à 132°) tout en conservant la même *fréquence* de battement (230 Hz). L'amplitude de la poussée vectorielle de l'abeille est donc commandée par l'amplitude du plan de battement d'ailes.

La direction de la poussée vectorielle s'opère par un basculement du plan de battement d'ailes en tangage et en roulis (Collett et Land, 1974 ; Land et Collet, 1975 ; Blondeau, 1981 ; Ellington, 1984 ; Zeil et al., 2008), à la façon d'un hélicoptère. Ellington rapporte : « *accelerations in lateral directions were accompanied by roll of the stroke plane* » (Ellington, 1984, page 52). Srinivasan rapporte également : « *the response is not one of yaw; rather, it is one in which the flying insect shifts its position in the tunnel laterally* » (Srinivasan et al., 1991, page 531). Récemment, J. Zeil de l'Université Nationale Australienne (ANU, Camberra) a filmé des Hyménoptères (guêpes). Les enregistrements confirment la manoeuvre en roulis de l'insecte pour effectuer une translation latérale (Zeil et al., 2008).

1 « oeil élémentaire » de l'oeil composé, une ommaditie contient un petit lot de photorécepteurs. Elle est coiffée d'une lentille convergente : « la facette ».

Pour étudier le basculement en tangage de l'animal, Esch et ses collègues ont fixé des abeilles en vol dans une soufflerie (Esch et al., 1975). La présence d'un vent de face et d'un sol motorisé tapissé de contraste, « fait croire » à l'insecte qu'il vole au dessus d'un terrain. Les résultats de cette étude ont montré qu'il existait une covariance positive entre la force de sustentation et l'angle de basculement en tangage du corps de l'animal (Fig. I.5.(a)), et une covariance négative entre la vitesse de vol (et donc la force propulsive) avec ce même angle (Fig. I.5.(b)). La vitesse de l'abeille est nulle pour un angle de basculement en tangage du corps de +40° et atteint 5 m/s pour un angle de -35° (pour une fréquence de battement d'ailes relativement constante à 177 Hz). Des observations similaires liant l'angle de tangage et l'orientation de la force de poussée vectorielle ont été faites chez la mouche (Vogel, 1967 ; Götz, 1968 ; David, 1978 ; Götz et Wandel, 1984 ; Zanker, 1985 ; Dickinson et Götz, 1996, voir aussi Fig. IV.1.B(b) page 74).

Les insectes ailés, et en particulier l'abeille, seraient ainsi capables de se mouvoir suivant leurs trois degrés de liberté en translation par un basculement en tangage et roulis de leur poussée vectorielle. Il serait également possible que certaines mouches capables de vol stationnaire, comme le syrphe ou l'éristale, soient *totalement actionnés*, ce qui leur permettrait de commander leurs translations indépendamment de leurs rotations.

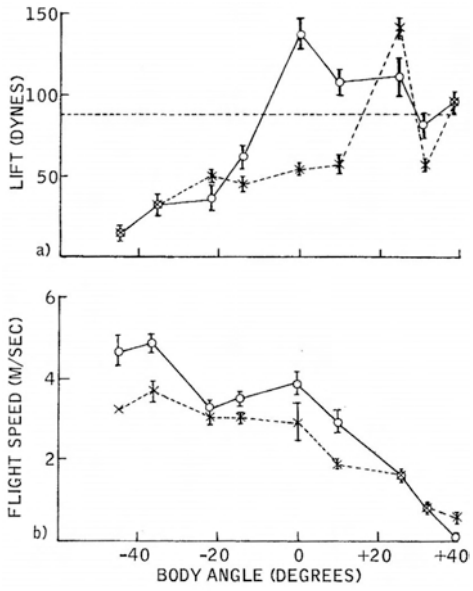

Fig. I.5. (a) Force de sustentation en fonction de l'angle de basculement en tangage du corps de l'animal en position de vol (cercles) et en position de non vol (croix). La ligne horizontale en pointillés indique le niveau de portance pour lequel l'insecte tient en l'air en vol libre.
(b) Vitesse de vol en fonction de l'angle de basculement en tangage du corps de l'animal. Même marqueurs qu'en (a). (d'après Esch et al., 1975)

III.2. *Les aspects neurophysiologiques de l'abeille*

III.2.1. *Son oeil composé*

L'abeille ouvrière (toujours femelle, Fig. III.1.1.(a)) possède de part et d'autre de sa tête deux yeux composés (Fig. III.2.1.A) qui comptent 4500 ommatidies (van Praagh et al., 1980). Le mâle (appelé faux bourdon) possède un plus grand nombre d'ommatidies (7500). Cela lui confère une meilleure acuité visuelle qui lui permet de répérer plus facilement la reine[1] pour l'accouplement en vol. Chaque ommatidie possède sa propre lentille[2]. Chaque ommatidie voit donc dans une direction qui lui est propre et échantillonne ainsi l'environnement. Toute ommatidie représente un pixel de l'image. Le pas angulaire d'échantillonnage est caractérisé par l'angle $\Delta\varphi$ (dit angle inter-ommatidial) entre deux ommadities adjacentes (Fig. III.2.1.A). Cet échantillonnage est à pas variable : $\Delta\varphi$=3,5° dans les régions latérales de l'oeil composé et $\Delta\varphi$=1,9° dans les régions frontales (Seidl, 1982), ce qui permet d'améliorer l'acuité visuelle. Le faible diamètre des lentilles (~18µm,

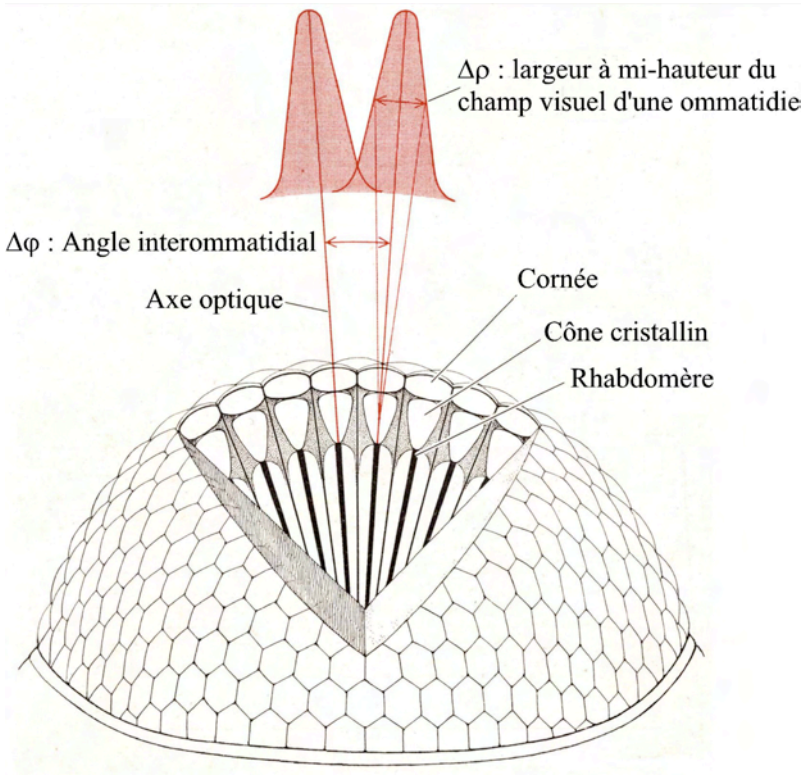

Fig. III.2.1.A. Un oeil composé est formé par la juxtaposition de petits yeux élémentaires, les ommadities. L'agencement des ommatidies est caractérisé par l'angle inter-ommatidial $\Delta\varphi$, qui varie d'une région à l'autre de l'oeil. Il est plus fin dans les régions frontales (~1°) que dans les régions latérales ou ventrales (~2° à ~4°). La directivité d'un photorécepteur est caractérisée par une gaussienne de largeur à mi-hauteur $\Delta\rho$ du même ordre de grandeur que $\Delta\varphi$. (D'après Horridge, 1977)

1 La reine ne possède que 3500 ommatidies par oeil.
2 ou facette.

van Praagh et al., 1980) génère un phénomère de diffraction qui est à l'origine d'une directivité angulaire photoréceptrice de type gaussien (Götz, 1964 ; Hardie, 1985). La directivité gaussienne est habituellement caractérisée par sa largeur à mi-hauteur $\Delta\rho$ (Fig. III.2.1.A), appelée également « angle d'acceptance ». Dans les régions frontales de l'abeille, l'angle d'acceptance est égal à $\Delta\rho=2,6°$ (Laughlin et Horridge, 1971 ; Eheim et Wehner, 1972 ; Labhart, 1980), puis celui-ci suit les variations de l'angle inter-ommatidial $\Delta\varphi$, réalisant ainsi un filtrage spatial passe-bas adapté à l'acuité visuelle.

L'abeille possède une vision *chromatique* (von Frisch, 1914) et une vision *achromatique* (canal vert) servant en particulier à la détection du mouvement. L'oeil composé de l'abeille est doté de trois classes de cellules photoréceptrices avec un maximum de sensibilité dans l'ultraviolet (UV, λ_{max}= 344 nm), dans le bleu (B, 436 nm), et dans le vert (G, 544 nm) (Menzel and Backhaus, 1991). Chaque facette coiffe une ommatidie contenant neuf cellules photoréceptrices R1-9 (Waterman, 1981 ; Menzel et Backhaus, 1991) : six G (R2, R3, R4, R6, R7 et R8), les deux autres (R1 et R5) pouvant être UV ou B, et R9 serait plutôt UV (Menzel et Snyder, 1974 ; Wakakuwa et al., 2005). L'abeille ne perçoit donc pas le rouge, qui lui apparaît noir. Chaque ommatidie présente la particularité de posséder un rhabdome fusionné commun à toutes les cellules photoréceptrices (Gribakin, 1975). Les photorécepteurs G sont les entrées des neurones détecteurs de mouvement (Kaiser and Liske, 1974; Franceschini, 1975 ; Hausen and Egelhaaf, 1989). Il a été récemment mis

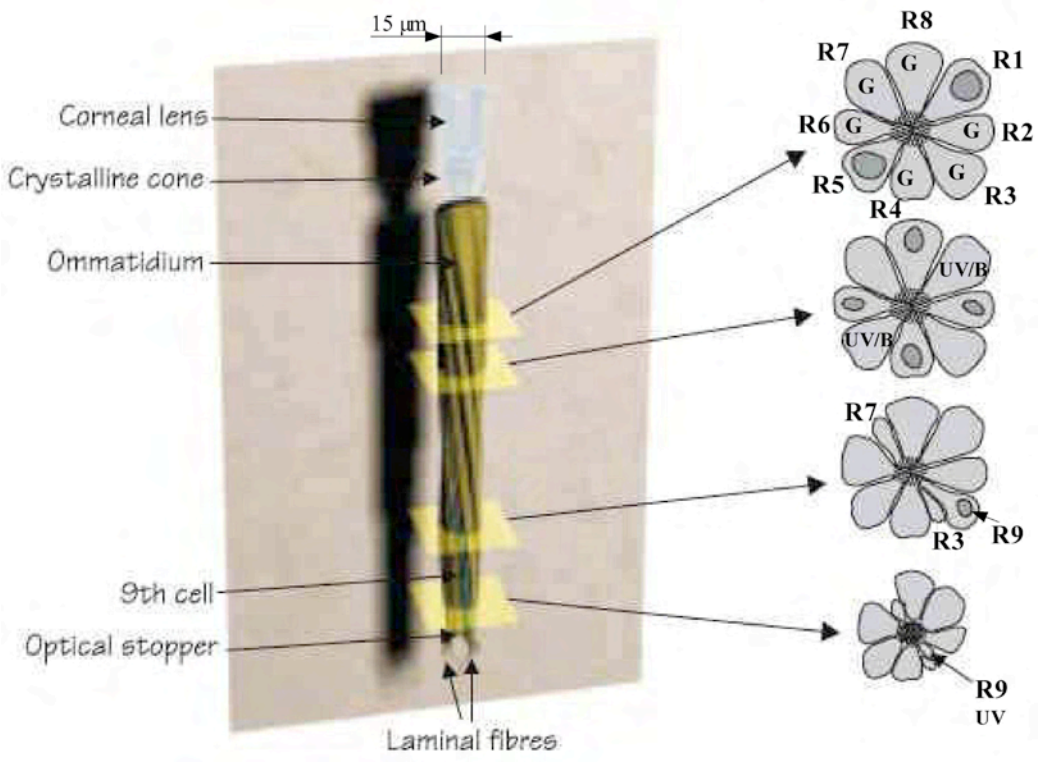

Fig. III.2.1.B. Modèle 3D d'un rhabdome d'abeille. Les photorécepteurs R2 à R4 et R6 à R8 sont verts (G), R1 et R5 peuvent être sensibles, soit à l'ultraviolet (UV), soit au bleu (B), R9 serait plutôt UV. (adapté de Collins, 1998)

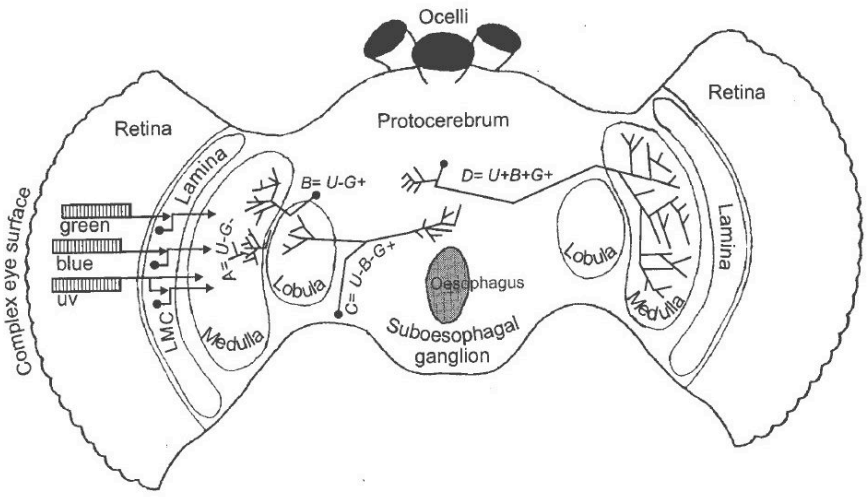

Fig. III.2.2.A. Coupe frontale du cerveau d'une abeille montrant les différents canaux visuels. Chaque ommatidie contient trois types de photorécepteurs : vert, bleu, et ultraviolet. Tous les types de photorécepteurs sont connectés à la lamina puis se projettent dans la medulla. L'arbre dendritique des neurones présents dans la medulla se projette à nouveau dans la lobula, puis se projette dans le protocerebrum. L'information visuelle est traitée en parallèle et de façon rétinotopique à travers trois ganglions optiques montés en série. (Chittka et Wells, 2004)

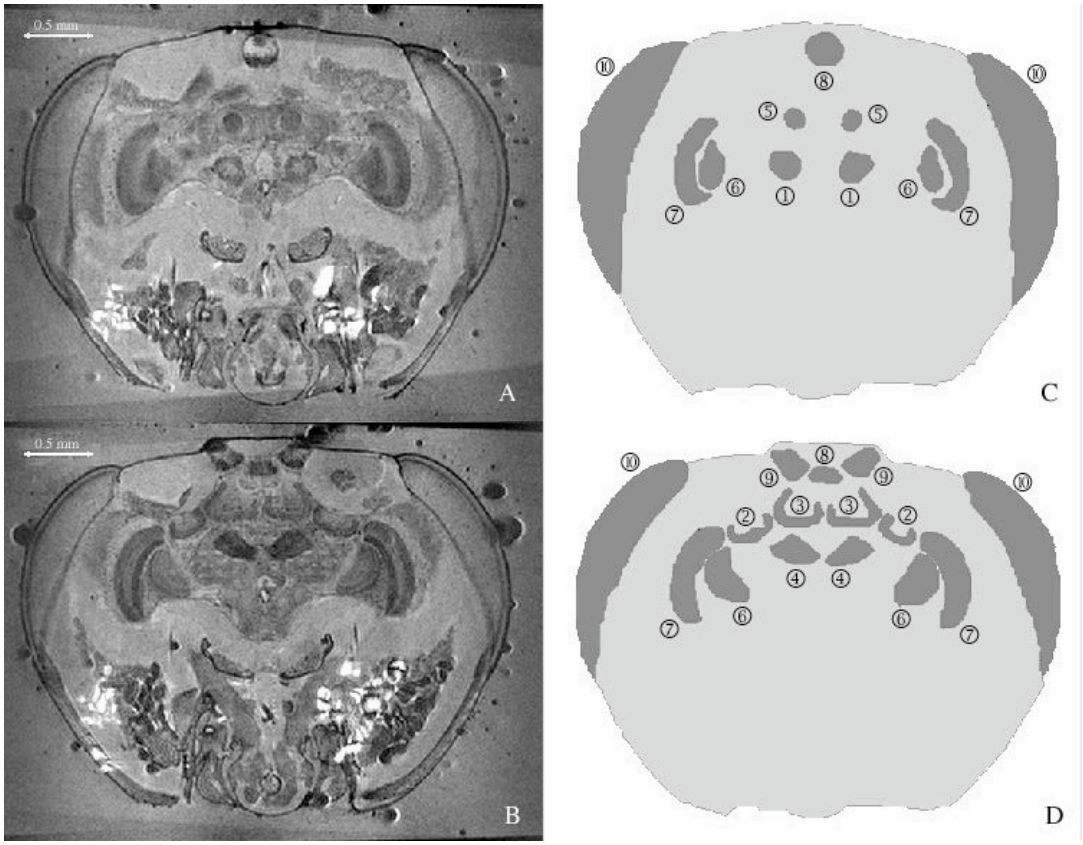

Fig. III.2.2.B. (A) et (B) radiographies IRM (Echo de Spin en pondération T_1) du cerveau de l'abeille (*Apis Mellifera*) réalisées sur un imageur Bruker AMX500 de 11,75 Teslas (gradient 0,66 T/m), diamètre du tunnel 8 mm, antenne de tête (diamètre 4 mm, longeur 5,5 mm). (C) et (D) structures visibles du cerveau: lobe antennaire (1) , calice latéral (2) et médian (3), pedoncule et lobe β (4), lobe α (5), lobula (6), medulla (7), ocelles médianes (8) et latéraux (9), les yeux composés (10). (Haddad et al., 2004)

en évidence l'existence d'une régionalisation de la nature des photorécepteurs R1 et R5 : les ommatidies de type I (un UV/ un B), de type II (deux UV), de type III (deux B) (Wakakuwa et al., 2005). L'hétérogénéité spectrale des ommadities ayant été à l'origine observée chez la mouche (Hardie et al., 1979 ; Franceschini, 1984, 1985 ; Hardie, 1985) et ce n'est que 20 ans plus tard qu'elle a été mise en évidence chez des insectes à rhabdome fusionné (le papillon : Quiu et al., 2002 ; le bourdon : Spaethe et Briscoe, 2005 ; l'abeille : Wakakuwa et al., 2005). Les ommatidies de type III sont plus fréquentes dans la région fronto-ventrale de l'oeil qui pourrait ainsi faciliter la localisation des fleurs (Wakakuwa et al., 2005). On constate qu'il est difficile de représenter, pour un insecte donné, un « rhabdome type » du système visuel. Sur la Fig. III.2.1.B, les cellules photoréceptrices ont été classifiées selon leur sensibilité spectrale (Gribakin, 1975 ; Menzel et Blakers, 1976 ; Wakakuwa et al., 2005).

On sait que lors de la danse de l'abeille, celle-ci communique à ses congénères le cap d'une source abondante de nectar *par rapport à la direction du Soleil*. L'abeille est donc un insecte, non pas *géoréférencé* comme les engins construits par l'homme (ou les oiseaux migrateurs utilisant le magnétisme terrestre), mais plutôt *hélioréférencé*. Si l'on sait depuis longtemps (von Frisch) que les abeilles sont capables de retrouver la direction du Soleil en analysant la polarisation du ciel, ce n'est que récemment qu'on a pu comprendre comment elles font. Certains photorécepteurs placés sur le pourtour des yeux composés sont sensibles à la lumière polarisée et génèrent une information relative de cap par rapport au plan méridien contenant le Soleil (Wehner et Strasser, 1985 ; Wehner et Rossel, 1985 ; Labhardt, 1980, 1988). Les abeilles butineuses ne travaillent que par temps ensoleillé, mais un nuage peut subvenir, pouvant leur cacher le Soleil, sans pour autant perturber le motif de polarisation du ciel sur la voûte celeste.

III.2.2. *Son système visuel rétinotopique*

Le système visuel de l'abeille conserve une image *électrique* ordonnée de l'image projetée sur la rétine à travers les trois ganglions optiques le composant ; le système visuel de l'abeille est dit *rétinotopique*. Une facette (ou pixel) de la rétine capte des photons dans une direction d'espace privilégiée. La détection du mouvement s'opère par des traitements en parallèle de l'information visuelle à travers trois ganglions optiques organisés en série (Figs. III.2.2.A et III.2.2.B). Chaque ganglion optique réalise un traitement qui lui est propre :

- la *lamina* héberge des neurones de second ordre qui suppriment le fond lumineux de l'image (Etape de filtrage passe-haut temporel du traitement DEM) mais aussi qui stabilisent l'amplitude des variations de luminance liée au défilement de l'image (Etape de contrôle

automatique de gain du traitement DEM).

- La *medulla*, anatomiquement plus complexe, demeure encore peu connue (chez la mouche : elle comporte ~50 neurones par colonne, donc par pixel). Elle participe à la vision du mouvement par la présence de neurones détecteurs élémentaires de mouvement (chez la mouche : Douglass et Strausfeld, 1996) mais également à la vision des couleurs car certaines cellules photoréceptrices y font directement synapse, court-circuitant la *lamina*. La *medulla* serait également le siège de la séparation des voies de détection des transitions noir-blanc, appelées « ON », et blanc-noir, appelées « OFF » qui a été mise en évidence de manière indirecte (Franceschini et al., 1989).

- La *lobula* est caractérisée par la présence de fins neurones colonnaires à petit champ récepteur mais aussi par des neurones à large champ récepteur. La réponse de ces derniers dépend à la fois, du sens, et de la vitesse angulaire de défilement de l'image sur la rétine. La *lobula* est le dernier ganglion optique et est connectée aux ganglions cephaliques centraux (*protocerebrum*, *deutocerebrum*, *tritocerebrum*). Une partie des neurones de la lobula est connectée à des neurones descendants qui traversent le cou de l'animal pour activer les circuits moteurs du thorax.

III.2.3. *Les neurones détecteurs de mouvement à large champ visuel*

Contrairement à la mouche où les neurones détecteurs de mouvement à large champ sont bien localisés dans la *lobula plate,* ceux de l'abeille sont distribués dans la *lobula*. Par commodité, les électrophysiologistes ont préféré enregistrer la réponse des neurones présents dans la chaîne nerveuse descendante de l'abeille, qui est en lien direct avec la *lobula*. Ils y ont identifié plusieurs neurones descendants à large champ sensibles à des mouvements privilégiés (Ibbotson and Goodman, 1990 ; Ibbotson, 1991) : par exemple, le neurone $DNVI_1$ sensible à un mouvement de rotation en lacet, les neurones $DNIV_2$ et $DNIV_4$ sensibles à un mouvement de rotation en roulis, le neurone $DNII_2$ sensible à un mouvement de rotation en tangage ; les neurones VT sont sensibles à des mouvements de translation (Ibbotson, 2001). Deux exemples de réponse de tels neurones à large champ, chez la mouche, sont montrés à la Fig. III.2.3.

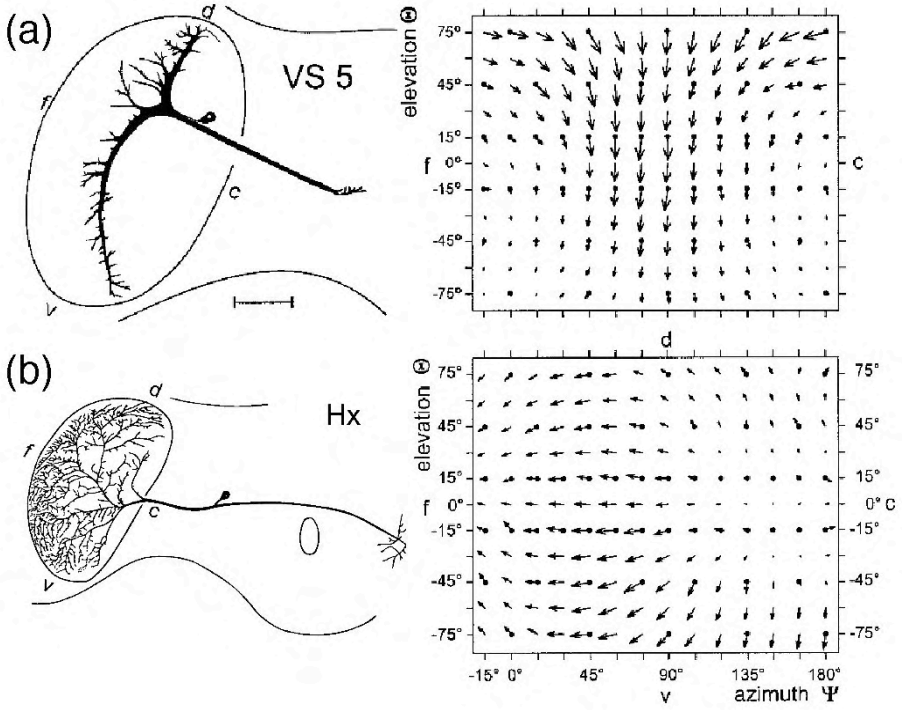

Fig. III.2.3. Réponse au mouvement de deux neurones à large champ, VS5 et Hx, dans la *lobula plate* d'une mouche bleue *Calliphora erythrocephala*. (Krapp et Hengstenberg, 1998)

(a) Le neurone VS5 à large champ répond de façon privilégiée à un mouvement de rotation en roulis. Sa sensibilité au mouvement (exprimé ici dans le plan de Mercator représentant le champ visuel) ressemble en tous points à celle obtenue à la Fig. II.2.3.

(b) Le neurone Hx à large champ répond de façon privilégiée à un mouvement de translation horizontale de droite à gauche. Sa sensibilité horizontale dans le plan de Mercator est analogue à un mouvement de translation horizontale (voir Fig. II.2.2. relative à un mouvement de translation verticale).

III.2.3.1. *Les neurones accordés à la vitesse angulaire (neurones VT)*

Récemment, Ibbotson (2001) a découvert dans la corde nerveuse descendante de l'abeille des neurones sensibles à des mouvements de translation, dénommés *neurones à vitesse angulaire accordée* (*Velocity-Tuned neurons* ou *VT cells*) pour les distinguer des neurones optomoteurs. La réponse au mouvement des neurones VT a été testée pour des vitesses angulaires entre 40 °/s et 1000°/s en utilisant quatre mires périodiques dont les motifs avaient une période de 11° à 76° et un constraste optique ***m*** = 0,8. La particularité de ces neurones est qu'ils répondent de façon monotone croissante en fonction de la vitesse angulaire. Par ailleurs, la période angulaire de la stimulation visuelle n'affecte pas la forme de la réponse des neurones VT (Ibbotson, 2001), ce qui la diffère remarquablement des neurones optomoteurs (voir **III.2.3.2.**).

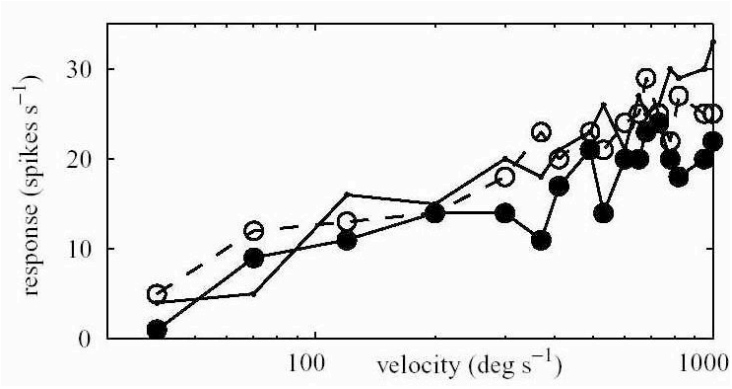

Fig. III.2.3.1. Réponse monotone d'un neurone VT en fonction de la vitesse angulaire sur environ deux décades de flux optique (de 40 °/s à 1000 °/s) et pour deux mires de périodes angulaires différentes (38° et 76°), ce qui montre également que le flux optique mesuré par l'animal est indépendant de la fréquence spaciale du stimulus visuel.
(D'après Ibbotson, 2001)

III.2.3.2. *Les neurones optomoteurs*

Les neurones *optomoteurs* sont sensibles à des mouvements de *rotation* et seraient donc impliqués dans la stabilisation en *attitude* du vol de l'abeille (voir la *réaction optomotrice* **III.3.1.**). On les stimule par exemple au moyen d'une mire périodique tapissant la paroi interne d'un cylindre en rotation. Ces neurones présentent la particularité d'être sensibles à la *fréquence temporelle* du stimulus visuel (chez la mouche: Hausen, 1984 ; Krapp, 2000 ; chez l'abeille : Ibbotson and Goodman, 1990 ; Ibbotson, 1991). Cette fréquence temporelle est définie comme le quotient de la vitesse angulaire de la mire par la période angulaire du motif en créneaux. Ces neurones sont dits *optomoteurs* parce que leur réponse en fonction de la fréquence temporelle concorde avec celle de la réaction comportementale de l'insecte (chez l'abeille : Kunze, 1961 ; chez la mouche : Göetz, 1964 ; Reichardt, 1969 ; Buchner, 1984 ; chez le criquet : Spork et Preiss, 1993).

La réponse des neurones optomoteurs en fonction de la fréquence temporelle est de type filtre *passe-bande* avec une bande passante à -3dB de [2 Hz ; 20 Hz], avec un pic à 10 Hz chez l'abeille et le criquet (Ibbotson and Goodman, 1990 ; Ibbotson, 1991 ; Spork et Preiss, 1993), et de [0,1 Hz ; 10 Hz] avec un pic à 4 Hz chez la mouche (Hausen, 1984).

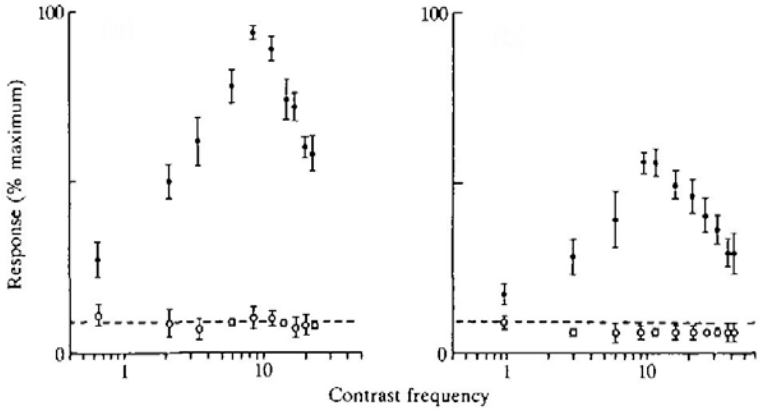

Fig. III.2.3.2. Réponse fréquentielle du neurone $DNVI_1$ (rotation en lacet) pour une mire de période angulaire de 36° (gauche) et de 19° (droite). Les points noirs représentent la direction privilégiée du neurone, les cercles la direction nulle. (d'après Ibbotson et Goodman, 1990)

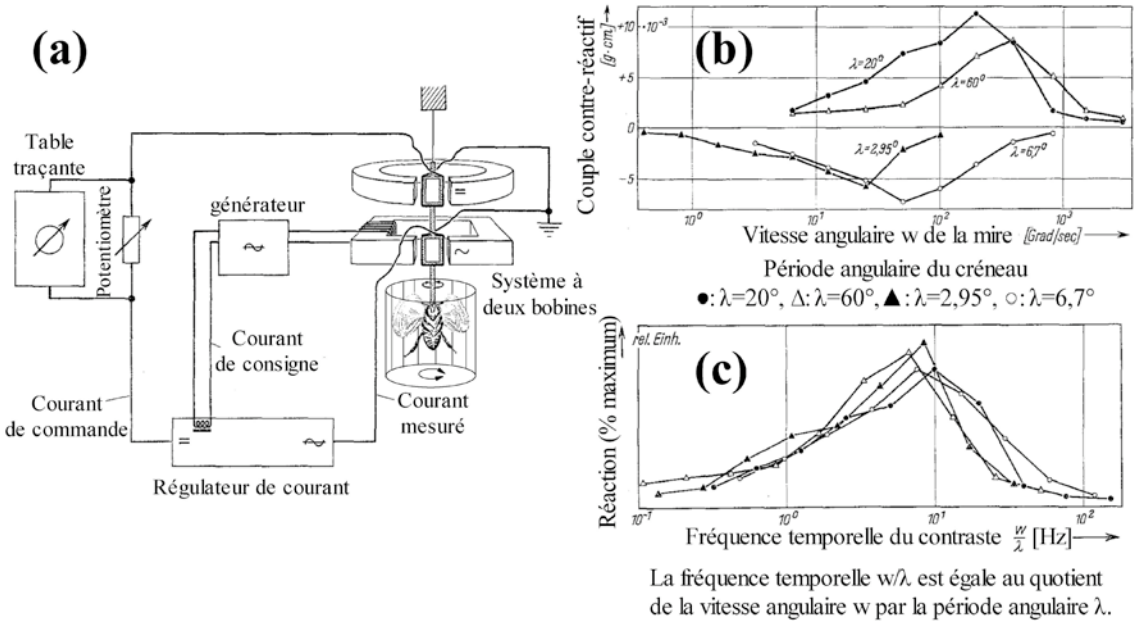

Fig. III.3.1. Réaction optomotrice de l'abeille en lacet (d'après Kunze, 1961).

(a) Compensateur de couple : l'abeille est fixée par le thorax à un couple-mètre et est placée dans un tambour tapissé de bandes verticales. Le tambour est motorisé et sa vitesse de rotation peut varier sur 3 décades (~1°/s à ~1000°/s). Le compensateur de couple permet de tester la réaction optomotrice de l'insecte en boucle ouverte ou fermée.

(b) Couple contre-réactif en lacet de l'insecte mesuré sur 3 décades de vitesse de rotation w avec 4 périodes angulaires λ. Pour les faibles valeurs λ = 2,95° et λ = 6,7°, l'insecte tourne en sens inverse de la stimulation, ceci étant lié à la faiblesse de l'échantillonnage angulaire de son système visuel limité à $2x\Delta\varphi \approx 7{,}2°$. Toute mire de période angulaire inférieure à ce seuil entraîne un phénomène de recouvrement angulaire.

(c) Le tracé de l'amplitude relative du couple contre-réactif en fonction de la fréquence temporelle (w/λ) révèle un pic de sensibilité entre 8 Hz et 10 Hz.

III.3. *Les aspects comportementaux de l'abeille*

III.3.1. *La réaction optomotrice*

La *réaction optomotrice* est un réflexe de stabilisation de l'orientation en lacet (i.e., autour de l'axe vertical du corps de l'insecte). Elle témoigne sans doute du fait que l'insecte tend à rejeter tout mouvement intempestif de rotation de l'image rétinienne. C'est l'un des mécanismes visuo-moteurs qui permet aux insectes volants de privilégier les mouvements de translation. Si un insecte, volant rectilignement, est soufflé vers la gauche par une bourrasque de vent (ou des turbulences), le foyer d'expansion de l'image perçue se décalera vers la droite. L'insecte compense alors ce décalage en commandant un couple de lacet contre-réactif qui le ramènera rectilignement. Depuis une cinquantaine d'années, la *réaction optomotrice* en lacet a fait l'objet de nombreuses études quantitatives, en particulier par l'équipe Reichardt de l'institut Max Planck à Tübingen (sur 1'abeille : Kunze, 1961 ; sur la mouche : Göetz, 1964 ; Reichardt, 1969 ; Buchner, 1984 ; sur le criquet : Spork et Preiss, 1993). L'insecte est centré dans un tambour tournant tapissé d'une texture contrastée (par exemple, une mire périodique à bandes verticales) et suspendu à l'axe d'un compensateur de couple ultra-sensible (Fig. III.3.1.(a)). La position angulaire du tambour est asservie au couple produit par l'insecte (~0,5 µN.m). En boucle fermée, l'asservissement commande au tambour un couple antagoniste à celui produit par l'insecte (Fig. III.3.1.(b)). Expérimentalement, on observe que l'insecte « stabilise » son environnement visuel, et ce, même si un biais est exercé sur la commande du tambour. Dans le repère propre à l'insecte, celui-ci rejette donc tout mouvement de rotation de l'environnement, comme s'il voulait *stabiliser visuellement son attitude*. La *réaction optomotrice* en lacet de l'abeille dépend de la fréquence temporelle des constrastes. Cette réaction est maximale pour les fréquences se situant entre 8 Hz et 10 Hz (Kunze, 1961, Fig. III.3.1.(c)). Trente ans après l'étude comportementale de Kunze (1961), les travaux de Ibbotson et Goodman (1990) ont permis d'identifier des neurones dits *optomoteurs* impliqués dans la *réaction optomotrice* car ils répondent de la même façon que la caractéristique Fig. III.3.1.(c) avec un pic de sensibilité à 10 Hz (Ibbotson et Goodman , 1990; Ibbotson, 1991). Bien que les *réactions optomotrices* en roulis et en tangage de l'abeille n'aient jamais été caractérisées, un comportement semblable a été observé en roulis et en tangage chez la mouche (Srinivasan, 1977).

Les études comportementales permettent donc de révéler l'existence des boucles visuo-motrices susceptibles d'être identifiées lors d'études électrophysiologiques. L'exemple de la *réaction optomotrice* est particulièrement illustratif de l'intérêt d'une démarche mixte, comportementale, électrophysiologique, et neuro-anatomique.

III.3.2. *La réaction de centrage*

A partir d'une simple observation : « *une abeille volant à travers une ouverture étroite a tendance à se centrer par rapport aux deux côtés de l'ouverture* », une équipe australienne de la *Research School of Biological Sciences* (*Australian National University* ANU, *Canberra*) dirigée par M.V. Srinivasan a émis l'hypothèse, à la fin des années 1980, que l'abeille réalisait une telle manoeuvre en équilibrant tout simplement les flux optiques droit et gauche perçus par ses deux yeux.

Entre 1989 et 1991, cette équipe publia deux articles présentant les résultats de plusieurs expériences comportementales conçues pour vérifier cette hypothèse (Kirchner et Srinivasan, 1989, Srinivasan et al., 1991). Les auteurs observèrent qu'en vol libre, une abeille traversant un couloir étroit rectiligne (largeur 12 cm, Fig. III.3.2.A), dont les murs étaient recouverts de différentes mires ou textures contrastées, se centrait le long du corridor (Fig. III.3.2.B). Mieux encore, la mise en translation de l'un des deux murs en sens contraire du vol de l'abeille (augmentant ainsi le flux optique généré par ce mur en mouvement) faisait s'écarter l'abeille du mur en mouvement, comme si elle se décentrait pour équilibrer encore les flux optiques latéraux. Inversement, lorsque les motifs étaient mis en mouvement dans le même sens que le vol de l'abeille (réduisant ainsi le flux optique généré par le mur en mouvement), l'abeille se rapprochait du mur en mouvement et se décentrait comme si elle cherchait encore à équilibrer les flux optiques latéraux (Fig. 3.2.B). Les chercheurs australiens en ont conclu qu'une abeille naviguant à l'intérieur d'un couloir évitait toute collision latérale en équilibrant les flux optiques droit et gauche.

Une équipe allemande de Tübingen, en désaccord avec cette hypothèse, proposa que cette *réaction*

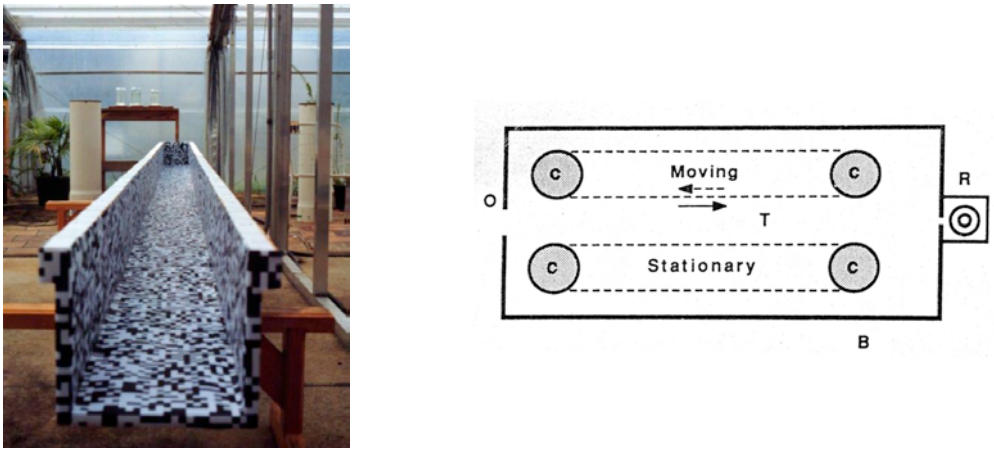

Fig. III.3.2.A. **Gauche** : chambre de vol de l'équipe Australienne dirigée par Srinivasan. La chambre est tempérée à 23°C, ce qui permet d'étudier les abeilles tout au long de l'année. Sur la photo, le tunnel fait 3,40 m de long, 22 cm de large, et 20 cm de hauteur. Les murs et le sol sont recouverts d'un motif 2D noir-et-blanc aléatoire.

Droite : vue de dessus schématique du tunnel utilisé pour les expériences qu'ils ont conduites entre 1989 et 1991. Le tunnel était alors relativement court et étroit (longeur : 40 cm, largeur : 12 cm, hauteur : 20 cm) et seule une longueur de 26 cm était filmée par la caméra placée au dessus (à 25 i/s, intervalle entre les images 40 ms).

de centrage pouvait s'interpréter entièrement en terme de *réaction optomotrice* (voir **III.3.2.**). *La réaction de centrage* serait le fruit d'une compétition entre deux *réactions optomotrices* droite et gauche, selon le modèle *d'équilibre optomoteur* (Götz, 1975; Egelhaaf and Borst, 1992).

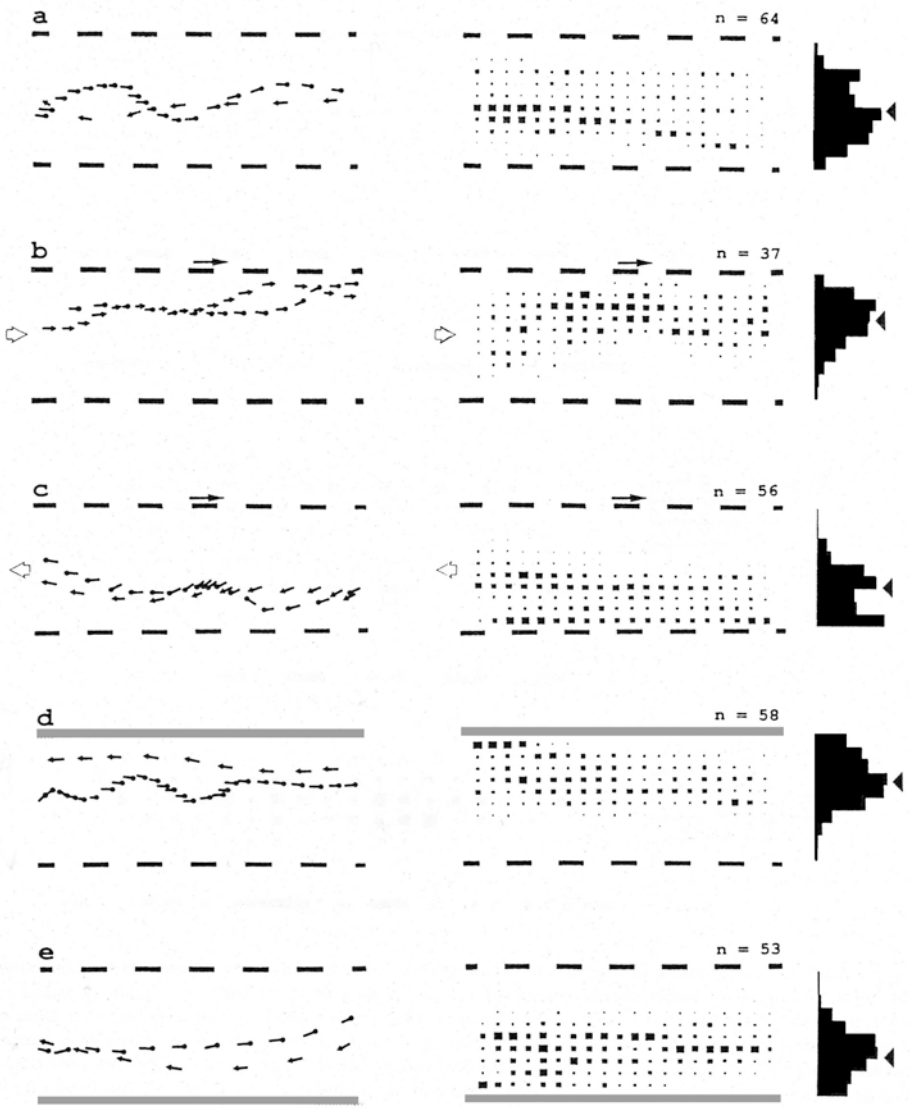

Fig. III.3.2.B. Réaction de centrage de l'abeille, la flèche blanche indique le sens de déplacement des abeilles.
(D'après Srinivasan et al., 1991)

(a) Trajectoire d'abeilles dans un corridor étroit stationnaire (12 cm de large). L'abeille se centre entre les deux murs.

(b) Les motifs du mur (côté droit de l'abeille) se déplacent dans le sens de vol de l'abeille à 20 cm/s. L'abeille tend à se rapprocher de la paroi mobile.

(c) Les motifs du mur (côté droit de l'abeille) se déplacent à contre-sens du vol de l'abeille à 20 cm/s : l'abeille tend à s'éloigner de la paroi mobile.

(d) et (e) Lorsque l'une des deux parois est remplacée par une texture grise homogène ($\boldsymbol{m}$<0,05), l'abeille semble se rapprocher du mur gris et stabiliser son vol. Elle adopte donc un comportement de décentrage. Les auteurs indiquent que l'abeille vole à une vitesse moyenne de 38 cm/s dans ce corridor de 12 cm de large et se situe ici à ~8 cm de la paroi contrastée (donc percevant un flux optique unilatéral d'environ 270°/s, alors que celui-ci était de 360 °/s en (a)). Les auteurs expliqueraient cette observation par le fait que l'abeille mesurerait un flux optique de façon dégradée en présence d'un faible contraste optique, ce qui conduirait l'abeille à se décentrer pour équilibrer ses flux optiques latéraux.

Pour vérifier que la *réaction de centrage* était bien basée sur un mécanisme visuo-moteur autre que celui de la *réaction optomotrice*, l'équipe australienne construisit alors un nouveau couloir expérimental rectiligne (longueur : 60 cm, largeur : 15.5 cm, hauteur : 30 cm) dont les parois présentaient à mi-chemin des ouvertures de 21 cm de diamètre (Srinivasan et al., 1993). L'une servant à générer un stimulus visuel en forme de damier (côté 2 cm, flashé à 50 Hz ou 100 Hz) au moyen d'un moniteur CRT (fréquence de balayage : 400 Hz), l'autre simplement débouchant. Les résultats montrèrent que la position latérale de l'abeille dans le couloir était indépendante de la fréquence temporelle du stimulus visuel, même en présence d'un mouvement apparent entrelacé droit et gauche d'un damier noir et blanc (i.e., flux optique latéral non-directionnel). Preuve était faite de l'existence de deux mécansimes visuo-moteurs distincts, tous deux basés sur la vision du mouvement : une *réaction de centrage* arbitrée par un mécanisme de vision du mouvement non-directionnel (ne réagissant qu'à l'amplitude du flux optique), et une *réaction optomotrice* arbitrée par un mécanisme de vision du mouvement directionnel (réagissant à l'amplitude et au sens du flux optique) (Srinivasan et al., 1993).

III.3.3. *Le contrôle de la vitesse*

Lorsqu'une abeille traverse un corridor rectiligne, sa vitesse d'avance reste constante et indépendante de la fréquence spatiale des motifs sur les murs (Srinivasan et al., 1996, Fig. 3).
Lorsqu'une abeille traverse un tunnel fuselé (Fig. III.3.3.A,B), elle ralentit dans la partie convergeante puis, une fois passé le point de constriction, elle accélère dans la partie divergeante (Srinivasan et al., 1996). Ces résultats ont montré que la vitesse d'avance de l'abeille était proportionnelle à la largeur locale du corridor (Fig. III.3.3.C). Là où le corridor est deux fois plus large, l'abeille vole deux fois plus rapidement (Fig. III.3.3.C). Srinivasan et ses collaborateurs ont alors suggéré que l'abeille contrôlait sa vitesse d'avance en maintenant constante la vitesse angulaire de l'image des murs (Srinivasan et al., 1996), laissant un flou sur la nature du signal de contre-réaction de la boucle visuo-motrice de contrôle de vitesse. La pente (~1,5 s^{-1}) de la droite de régression (en pointillés sur la Fig. III.3.3.C) a été calculée par rapport à la largeur locale $D(x)$ du corridor : $D(x) = \tan(\alpha) \cdot x + D_0$ avec x la position longitudinale ($x = 0$ au point de constriction), α l'angle de fuselage ($\alpha = -15°$ pour $x < 0$, et $\alpha = +15°$ pour $x > 0$), $D_0 = 0{,}38$ m la largeur à l'entrée et à la sortie du corridor. Les auteurs ont donc calculé un flux optique purement latéral (orthogonal à l'axe longitudinal du couloir) maintenu constant de ~320 °/s. De plus, du fait que l'abeille se centre dans un couloir étroit (voir *réaction de centrage* au **III.3.2.**), les flux optiques latéraux droit et gauche valent ~320 °/s.
Récemment, Baird et al. (2005) ont étudié le système de contrôle de vitesse de l'abeille dans un

corridor dont les dimensions étaient similaires à celui Fig. III.3.2.A.(gauche), et dont les deux murs étaient motorisés sur toute leur longueur. Les résultats de cette étude montrent que l'abeille ajuste sa vitesse d'avance en maintenant constante la vitesse angulaire de l'image d'un mur entre 215 °/s et 320 °/s (Baird et al. 2005). Les expériences révèlent également que les variations de vitesse sont robustes aux changements de fréquence spatiale et de contraste optique des textures murales. Cela suggère que les détecteurs de mouvement de l'abeille sont capables de mesurer le flux optique latéral indépendamment des textures présentes sur les murs (l'abeille : Ibbotson, 2001; la mouche : O'Caroll et al. 2006).

Une conclusion similaire sur le contrôle de la vitesse avait déjà été dressée par David (1982). Cet auteur avait plaçé une mouche (*Drosophile*) dans un tunnel cylindrique tournant à axe horizontal, équipé d'une soufflerie. La mouche volait face au vent, attirée par une plume d'odeur de fermentation de banane. Le cylindre portait un motif hélicoïdal générant un mouvement axial (l'effet « *barber pole* »). Les résultats obtenus montrèrent que la mouche ajustait sa vitesse de vol en maintenant constante la vitesse angulaire du motif hélicoïdal (David, 1982).

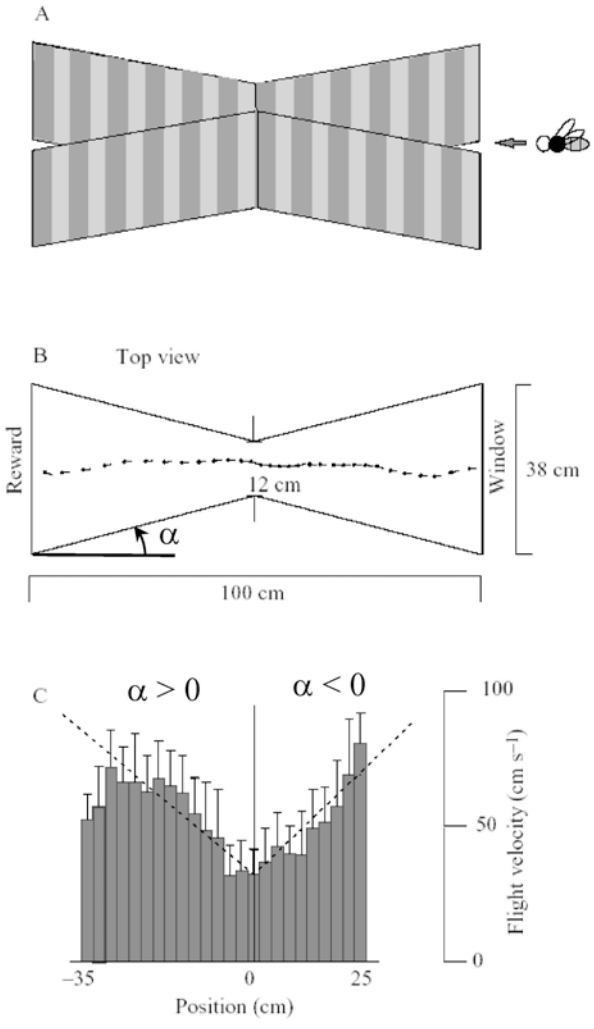

Fig. III.3.3. Variation de vitesse d'une abeille dans un corridor fuselé. (d'après Srinivasan et al., 1996).

(a) Les murs du tunnel fuselé sont couverts de bandes verticales noires et blanches de période spatiale 6 cm. L'angle de fuselage du tunnel est $\alpha = 14{,}5°$.

(b) Trajectoire d'une abeille enregistrée à 25 images/s (résolution temporelle : 40ms).

(c) La ligne en pointillés représente le profil théorique de vitesse que les abeilles devraient suivre si elles maintenaient constante la vitesse angulaire de l'image des murs (qui, selon les auteurs serait de 320 °/s pour chacun des deux yeux). La vitesse est représentée sous forme de moyenne et écart-type par regroupement spatial de 2,5 cm (18 trajectoires).

III.3.4. *L'atterrissage et le suivi de terrain*

Srinivasan et ses collaborateurs ont enregistré, à la fin des années 1990, des trajectoires d'atterrissage d'abeilles, dont les résultats préliminaires furent publiés sous la forme de deux exemples de trajectoires (Srinivasan et al., 1996). Ces résultats montrèrent que lors d'un atterrissage, l'abeille maintenait sa vitesse d'avance et sa hauteur sol proportionnelles l'une à l'autre, et que par conséquent le flux optique ventral (quotient des deux grandeurs précédentes) était maintenu constant (Fig. III.3.4.A). En 2000, ils élargissèrent cette étude et analysèrent 26 atterrissages d'un groupe de six abeilles et montrèrent que l'abeille maintenait un flux optique ventral constant et égal à 500°/s ± 268°/s, et un angle de descente constant de -28°±14° pendant la phase d'atterrissage (Srinivasan et al., 2000, page 173). Une observation similaire sur le maintien du flux optique ventral fut faite pendant un vol de croisière lors de virevoltes (Fig. III.3.4.B). Srinivasan et ses collègues proposèrent alors une « modélisation » de cette stratégie d'atterrissage sous la forme des deux pré-requis ci-dessous :

(i) Maintenir un angle de descente constant
(sans préciser comment cet angle serait mesuré par l'animal).

(ii) Réguler le flux optique ventral en ajustant la vitesse sol
(sans préciser comment cette vitesse serait mesurée par l'animal).

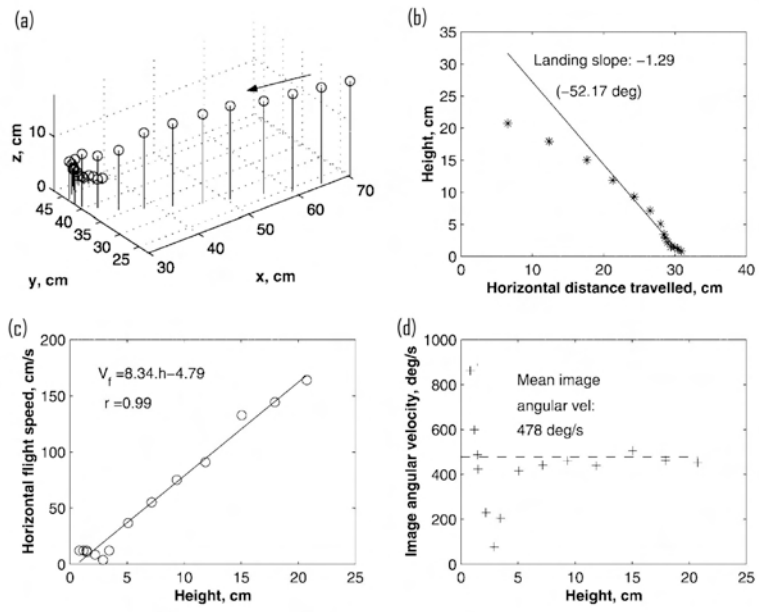

Fig. III.3.4.A. (a) Reconstruction 3D de la trajectoire d'atterrissage d'une abeille à partir de l'enregistrement simultané, par une même caméra, de l'abeille et de son ombre portée au sol. (b) Trajectoire 2D d'une abeille lors d'une phase d'atterrissage. (c) Vitesse d'avance en fonction de la hauteur sol : la vitesse d'avance est proportionnelle à la hauteur sol (r = 0,99). La pente de la droite de régression correspond par définition au flux optique ventral.
(d) Le flux optique ventral est maintenu constant à 478°/s pour une hauteur supérieure à 5 cm.
(b-d) correspondent à un même atterrissage (Srinivasan et al., 2000).

Dix ans auparavant, Zhang et ses collaborateurs (1990) avaient enregistré des abeilles se posant sur une cible non-stationnaire. Ils avaient observé que les abeilles (groupes de 3-4 abeilles) atterrissaient avec un angle de descente constant (-36°) vers la cible en mouvement mais n'avaient

proposé aucune modélisation (Zhang et al., 1990, page 382).

La stratégie d'atterrisage proposée par Srinivasan et al. (2000) s'est révélée difficile à mettre en oeuvre sur des systèmes robotisés autonomes. Les auteurs l'ont implémentée en *boucle ouverte* sur un bras robotisé dénué de dynamique (Srinivasan et al., 2000), puis sur des avions miniatures (Chahl et Srinivasan, 2004 ; Green et al., 2004). Les résultats furent peu probants, la réponse étant sensiblement la même en boucle fermée qu'en en boucle ouverte.

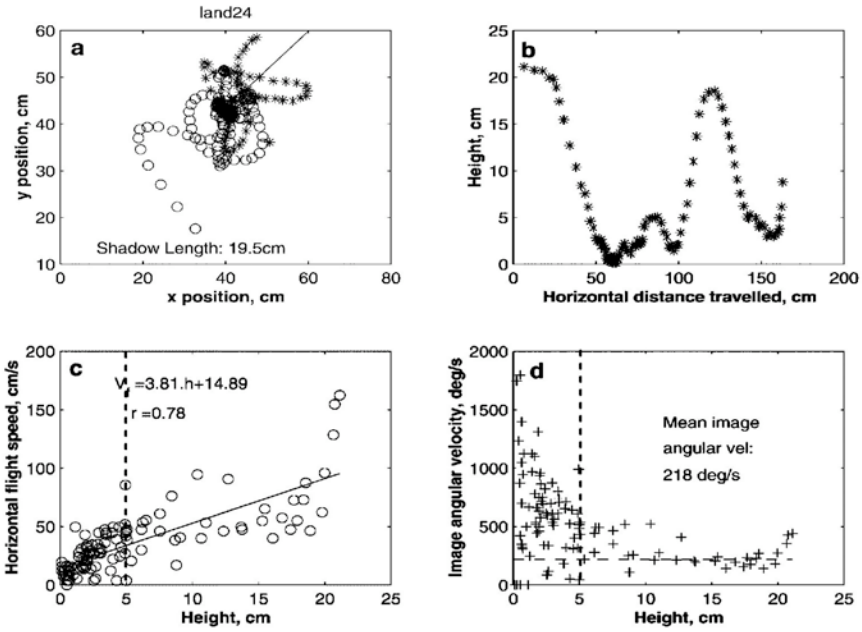

Fig. III.3.4.B. Exemple d'un vol de croisière et de virevoltes d'une abeille. (d'après Srinivasan et al., 2000)

(a) Trajectoire filmée dans le plan horizontal (x,y).

(b) Trajectoire de l'abeille dans le plan vertical (x,z) faisant apparaître les virevoltes.

(c) Vitesse d'avance en fonction de la hauteur sol (r = 0,78).

(d) Flux optique ventral en fonction de la hauteur sol. Malgré les brusques variations de vitesse et de hauteur, l'abeille semble maintenir constant son flux optique ventral, au moins pour les hauteurs sol supérieures à 5 cm.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit succinctement les modalités sensorielles et propulsives de l'abeille (voir **III.1.**). Le système visuel de l'abeille traite en parallèle plusieurs types de vision : vision des couleurs, vision de la lumière polarisée, reconnaissance de forme, et vision du mouvement (voir **III.2.1.** et **III.2.2.**). Le dernier ganglion optique (la *lobula*) est largement dédié à la vision du mouvement et héberge, en particulier, les neurones détecteurs de mouvement à large champ visuel (voir **III.2.3.**). Nous avons ensuite dressé un état de l'art des comportements observés chez l'abeille, basés sur la vision du mouvement (voir **III.3.**). Certains sont dédiés à la stabilisation en attitude de l'insecte (*réaction optomotrice*, **III.3.1.**), d'autres à l'évitement d'obstacle latéral (*réaction de centrage*, **III.3.2.**) et au contrôle de vitesse (**III.3.3.**), ou bien encore à l'atterrissage et au suivi de terrain (**III.3.4.**). En fait, chaque comportement va nécessiter une boucle visuo-motrice dédiée, chacune d'entre elles étant en charge d'un degré de liberté particulier de l'animal. C'est la combinaison de ces boucles visuo-motrices (la liste est ici non exhaustive) qui rend l'insecte manoeuvrable et capable de naviguer dans un environnement *a priori* inconnu.

Le chapitre suivant apporte un éclairage nouveau sur les boucles visuo-motrices dédiées à l'évitement d'obstacle latéral et le contrôle de vitesse chez l'abeille. Pour cela, nous avons élaboré un nouveau protocole expérimental basé sur un corridor dont la largeur est environ 10 fois plus grande que celui construit par l'équipe australienne (voir **III.3.2.**). Nos observations montrent que l'abeille n'adopte pas systématiquement une *réaction de centrage* dans un large corridor, mais qu'elle est tout aussi bien capable d'adopter un *comportement de suivi de paroi*. Ce résultat en rupture flagrante avec la littérature, et nous a conduit à remettre en cause l'*hypothèse d'équilibrage des flux optiques latéraux* au profit de l'hypothèse de *régulation du flux optique unilatéral*. Plus qu'une hypothèse, nous la formulerons sous la forme d'un *schéma de contrôle explicite* montrant les liens de cause à effet entre la perception du flux optique et les actions motrices engendrées.

Chapitre IV. Le vol des abeilles par régulation du flux optique

« Le bonheur pour une abeille ou un dauphin est d'exister,
pour l'homme, de le savoir et de s'en émerveiller. »

Jacques-Yves Cousteau [1910-1997], Océanographe et Explorateur français

Résumé.....72

IV.1. Contrôle du vol vertical : le régulateur de flux optique ventral.....73

IV.1.1. Décollage.....75

IV.1.2. Suivi de terrain.....75

IV.1.3. Réaction au vent.....75

IV.1.4. Vol au dessus d'une surface de type « eau dormante ».....76

IV.1.5. Atterrissage.....76

IV.2. Contrôle du vol horizontal : les régulateurs de flux optique latéraux.....79

IV.2.1. Expérimentation.....79

IV.2.2. Résultats.....85

IV.2.2.1. Suivi de paroi en fonction des conditions initiales.....85

IV.2.2.2. Vol en l'absence de flux optique latéral.....87

IV.2.2.3. Relation entre la vitesse d'avance et la distance au mur en régime permanent.....87

IV.2.2.4. Trajectoires en régime transitoire : décomposition en phases de vol.....90

IV.2.3. Discussion.....92

IV.2.3.1. Indices visuels : statiques ou dynamiques ?.....92

IV.2.3.2. Equilibre des flux optiques latéraux ou régulation unilatérale ?.....93

IV.2.3.3. Qu'en est-il de la stabilisation en lacet de l'abeille ?.....94

IV.2.4. Elaboration du modèle de contrôle de vol horizontal.....95

IV.2.4.1. Contrôle d'avance de l'abeille.....95

IV.2.4.2. Contrôle latéral de l'abeille.....97

IV.2.4.3. Point de fonctionnement des régulateurs en régime permanent.....99

Conclusion.....102

Résumé

Nous avons étudié les mécanismes visuo-moteurs impliqués dans le contrôle de vitesse et l'évitement d'obstacles latéraux chez l'abeille (Apis mellifera) en entraînant l'insecte à voler dans un large corridor (~1m). Nous avons observé que les abeilles pouvaient, selon la position de l'entrée et du nourricier dans le corridor, voler plutôt le long d'un mur que suivant la ligne médiane. L'analyse image par image des trajectoires d'abeille montre que la vitesse d'avance de l'insecte et sa distance à l'un des murs sont proportionnelles l'une à l'autre. Cette observation suggère que l'abeille maintient le flux optique généré par l'un des deux murs constant pendant son vol. Cette idée concorde avec le comportement observé lorsqu'on enlève une partie d'un mur, offrant ainsi aux abeilles un flux optique négligeable par rapport à ce même côté. Ainsi, les comportements observés ne sont pas toujours explicables par l'hypothèse d'équilibrage des flux optiques latéraux (voir ***III.3.2.****) à laquelle bon nombre de roboticiens se sont référés pour la conception de robots mobiles à guidage visuel. Le comportement de suivi de paroi observé ici et des réflexions sur la vitesse de l'abeille dans des corridors de largeurs diverses nous ont conduit à l'idée qu'il exixtait deux bouclages visuo-moteurs entrelacés que nous appellons « régulateur dual de flux optique latéral ». Ce système requiert des neurones détecteurs de mouvement, qui sont de véritables capteurs de flux optique. Le schéma de contrôle liant la perception du flux optique aux actions engendrées est relativement simple et puissant car il peut, à lui seul, induire chez un insecte toutes sortes de comportements : réaction de centrage, suivi de paroi, contrôle de vitesse. Surtout, ce « pilote automatique » contrôle les mouvements d'avance et latéraux de l'insecte, sans qu'il ait à mesurer de façon explicite ni sa vitesse ni sa distance aux obstacles. Un tel principe est tout aussi intéressant pour la conception de véhicules aériens autonomes miniatures, qui devront se contenter de ressources calculatoires limitées, à la manière du cerveau de l'abeille, qui ne comporte qu'un million de neurones environ.*

Chapitre IV. Le vol des abeilles par régulation du flux optique

IV.1. *Contrôle du vol vertical : le régulateur de flux optique ventral*

Selon la *théorie optomotrice* de Kennedy, les insectes volants possèderaient une *vitesse rétinienne préférée* par rapport au sol (Kennedy, 1939, 1951), ce qui leur permettrait de réagir au vent de façon appropriée. Cette théorie intuitive a laissé toutefois dans son sillage une idée confuse des boucles visuo-motrices responsables de cette prouesse comportementale et de nombreuses autres prouesses observées depuis (Steiner, 1953 ; Heran et Lindauer, 1963 ; Bräuninger, 1964 ; Williams, 1965). Le travail de thèse de Franck Ruffier a permis de modéliser ces comportements sous la forme d'un même et unique schéma de contrôle, montrant le lien entre les paramètres de vol, les capteurs nécessaires, et les dynamiques de l'agent (Ruffier, 2004).

Le principe invoqué est beaucoup plus explicite que la modélisation initialement proposée par Srinivasan et al. (2000) (voir **III.3.4.**). Il est basé sur un *régulateur* de flux optique ventral* ajustant la force de sustentation. Un tel principe est, d'autre part, biologiquement plausible puisqu'il ne requiert qu'un capteur de flux optique (ou DEM, Fig. IV.1.A) et une covariance des forces de sustentation et de poussée, tous deux présents chez les insectes ailés. Ce schéma (Fig. IV.1.B), dénommé OCTAVE (pour *Optical flow Control sysTem for Aerial VEhicles*) est si explicite qu'il a pu être implémenté tel quel à bord d'un mini-hélicoptère robotisé du même nom (Ruffier et Franceschini, 2005).

Nous basant sur un corpus de données expérimentales obtenues chez les insectes depuis 70 ans, nous avons testé l'hypothèse selon laquelle les insectes ailés pourraient être équipés d'un *régulateur de flux optique ventral*, en comparant les comportements d'insectes et ceux du robot OCTAVE dans des conditions expérimentales similaires. Nous avons montré que le schéma de contrôle OCTAVE (Fig. IV.1.B) était à même d'expliquer une série de comportements visuo-moteurs enigmatiques décrits depuis plusieurs décénnies chez de nombreuses espèces d'insectes ailés (mouches, criquets, abeilles, mites, moustiques, bousiers, et papillons), comportements qui, au premier abord, paraissaient déconnectés les uns des autres (Franceschini et al., 2007).

Les travaux effectués jusqu'à ce jour laissent apparaître cinq situations fondamentales qui mettent en évidence l'utilisation d'un régulateur de flux optique ventral : le décollage, le suivi de terrain, la réaction au vent, le vol au dessus d'une surface de type « eau dormante », l'atterrissage.

* Voir partie I.3. pour la définition d'un *régulateur*.

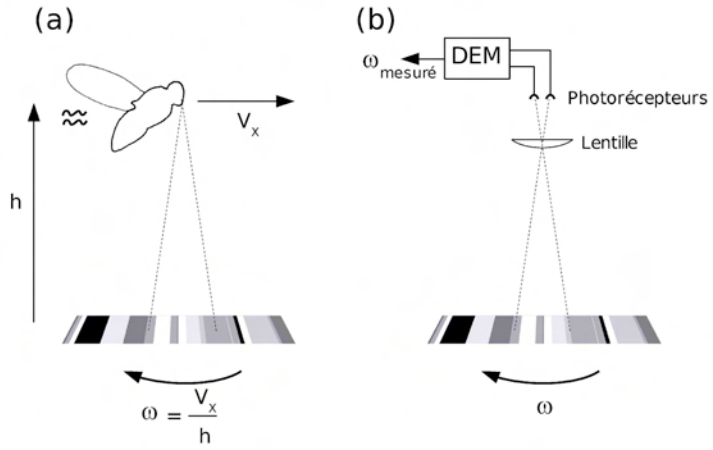

Fig. IV.1.A . (a) Le flux optique ventral perçu par un animal volant à une vitesse sol V_x et une hauteur sol h est la vitesse angulaire ω à laquelle défile le sol texturé à l'aplomb et qui semble se déplacer en sens inverse. Par définition ω (exprimé en rad/s ou °/s) est le quotient de vitesse sol par la hauteur sol.

(b) Le capteur de flux optique minimaliste utilisé à bord du robot OCTAVE comprend une micro-lentille et deux photorécepteurs connectés à un détecteur élémentaire de mouvement (DEM) inspiré de la mouche. La sortie ω_{mes} du capteur de flux optique servira de signal de contre-réaction sur la Fig. IV.1.B.

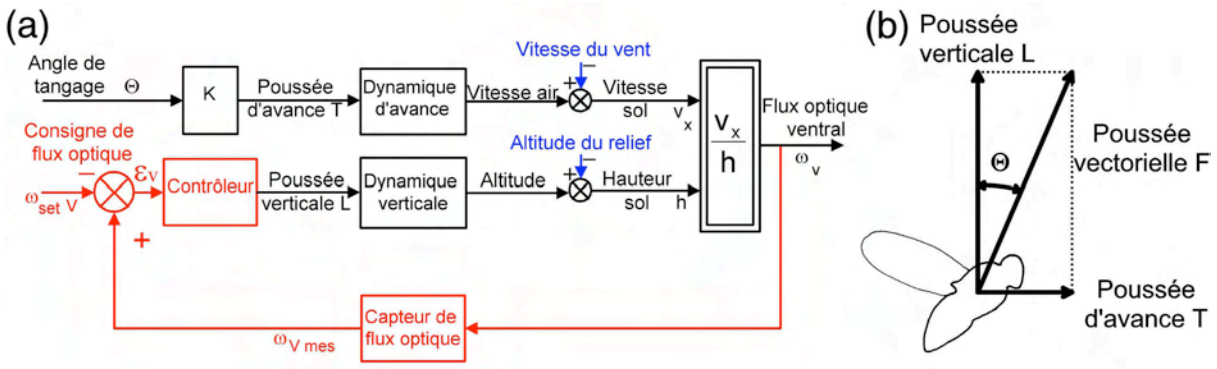

Fig. IV.1.B. Diagramme fonctionnel du régulateur de flux optique ventral commandant la poussée verticale. (d'après Franceschini et al., 2007)

(a) La vitesse sol V_x est commandée en boucle ouverte par voie désignée en noir, *via* l'angle de tangage Θ de l'amplitude de la poussée vectorielle (voir (b)), donnant naissance à une force propulsive (notée **T**). Le flux optique ventral ω est commandé en boucle fermée par la boucle rouge, *via* la poussée verticale (notée **L**). La mesure du flux optique ventral ω_{Vmes} est comparée à une consigne de flux optique ω_{setV}. Le signal d'erreur ($\varepsilon_V = \omega_{Vmes} - \omega_{setV}$) délivré par le comparateur pilote un contrôleur ajustant la force verticale **L**, donc la hauteur sol h, *via* la dynamique d'élévation. Deux types de perturbation peuvent affecter la régulation du flux optique ventral : (i) l'altitude du relief, qui se retranche de l'altitude de vol pour donner la hauteur sol h, (ii) la vitesse du vent, qui se retranche par vent de face (ou s'additionne par vent arrière) de la vitesse par rapport à l'air pour donner la vitesse sol V_x.

(b) Comme la mouche (Götz, 1968 ; Vogel, 1967 ; David, 1978 ; Götz et Wandel, 1984 ; Zanker, 1985 ; Dickinson et Götz, 1996), l'abeille (Esch et al., 1975), le mini-hélicoptère OCTAVE augmente sa vitesse en basculant sa pousée vectorielle **F** vers l'avant d'un angle Θ. La poussée vectorielle **F** peut se décomposer en une poussée verticale **L** et une force propulsive **T**. Toutefois, pour les faibles angles de tangage, les forces **T** et **L** sont découplées, la force **L** demeurant relativement constante. Chez la mouche, on sait que l'orientation de la poussée vectorielle est différente de l'orientation du corps, les deux directions formant un angle constant (Götz, 1968 ; Vogel, 1967 ; David, 1978 ; Götz et Wandel, 1984).

IV.1.1. *Décollage*

Tout agent naturel ou artificiel équipé d'un régulateur de flux optique ventral (Fig. IV.1.B.(a)) est contraint à s'élever dans les airs (Fig. IV.1.C, partie gauche) dès lors que sa vitesse d'avance augmente, par exemple par un basculement arrière de son angle de tangage (Fig. IV.1.B.(b), voir aussi **III.4.**). La boucle visuo-motrice OCTAVE maintient le flux optique ventral $\omega=V_x/h$ (Fig. IV.1.A) en agissant sur la composante verticale de la force de portance. Lors d'un décollage, la vitesse V_x augmente, OCTAVE augmente alors la hauteur sol h proportionnellement à la vitesse d'avance V_x, et le coefficient de proportionnalité qui les lie est la consigne de flux optique ventral ω_{setV} (Fig. IV.1.B), jouant ici le rôle de *vitesse rétinienne préférée* (Kennedy, 1951).

IV.1.2. *Suivi de terrain*

La première perturbation pouvant affecter la régulation du flux optique ventral est l'altitude du relief qui vient se retrancher de l'altitude de vol pour donner la hauteur sol h (flèche bleue sur la Fig. IV.1.B). On a pu observer que les insectes ailés franchissaient les obstacles en les survolant de façon rasante plutôt qu'en les contournant (le bousier : Steiner, 1953 ; le papillon : Williams, 1965), ce qui pourtant leur aurait permis de réduire leur consommation d'énergie. Ceci montre que le comportement de suivi de terrain résulte plutôt d'un réflexe visuo-moteur que d'une planification. En effet, dès lors que la vitesse d'avance de l'agent est constante, le régulateur de flux optique permet de maintenir une hauteur sol constante, quelles que soient les variations du relief suivi (Fig. IV.1.C, partie centrale).

IV.1.3. *Réaction au vent*

On a observé également que les insectes ailés réduisaient curieusement leur hauteur sol par vent de face et l'augmentaient par vent arrière (le criquet migrateur : Kennedy, 1951 ; le bousier : Steiner, 1953 ; l'abeille : Bräuninger, 1964 ; le papillon : Williams, 1965). D'autres insectes sont contraints d'atterrir par fort vent de face (le moustique : Kennedy, 1939). Le vent est la seconde perturbation pouvant affecter le régulateur de flux optique ventral (flèche bleue sur la Fig. IV.1.B). Un vent de face réduit la vitesse sol d'un agent, alors qu'un vent arrière l'augmente. Le régulateur révise alors automatiquement à la baisse ou à la hausse la hauteur sol proportionnellement à la vitesse sol de l'agent pour maintenir un flux optique ventral constant, comme cela a été observé sur le robot OCTAVE (Ruffier et Franceschini, 2005, Fig. 13).

IV.1.4. *Vol au dessus d'une surface de type « eau dormante »*

Dans une étude, il a été rapporté que les abeilles perdaient de l'altitude jusqu'à se noyer en tentant de traverser un étang dont la surface était si calme qu'elle ressemblait à un miroir (Heran et Lindauer, 1963). L'absence de ride sur l'eau met hors service le capteur de flux optique ventral de l'abeille (Fig. IV.1.A.(a)), et le régulateur attire alors irrémédiablement l'insecte vers le bas. En effet, si la sortie du capteur de flux optique est nulle $\omega_{Vmes} = 0$ sur le schéma de contrôle (Fig. IV.1.B), alors l'erreur de commande ε devient importante et négative entraînant une diminution de h (perte d'altitude).

IV.1.5. *Atterrissage*

Des enregistrements vidéo d'abeilles atterrissant sur une surface plane ont révélé qu'elles atterrissaient à pente constante (Zhang et al., 1990 ; Srinivasan et al., 1996, 2000). Un comportement semblable est observé sur le robot OCTAVE, qui se voit contraint d'atterrir (sous contrôle visuel) lorsqu'on redresse son angle de tangage (Fig. IV.1.C, partie droite). Ces deux observations comportementales s'expliquent par le fait que dans les deux cas la dynamique d'avance des agents peut être décrite par une équation différentielle du premier ordre (Franceschini et al., 2007). En effet, la réponse libre d'un système du premier ordre en forme d'exponentielle décroissante va contraindre également la hauteur sol à décroître pareillement de façon exponentielle en fonction du temps (avec la même constante de temps) puisque le régulateur de flux optique maintient à chaque instant la hauteur sol proportionnelle à la vitesse d'avance. Mais alors, le quotient vitesse de descente sur vitesse d'avance reste constant durant l'approche finale, ce qui signifie que l'atterrissage se produit à pente constante tant pour l'abeille que pour le robot OCTAVE (Fig. IV.1.C, partie droite approche finale).

Ce modèle de régulation du flux optique *ventral* commandant la poussée verticale (Franceschini et al., 2007) et celui suggérant la commande de la force propulsive (Srinivasan et al., 2000) peuvent être réconciliés si nous ajoutons à notre modèle l'hypothèse d'un second régulateur de flux optique commandant la force propulsive par régulation du flux optique *latéral* (Serres et al., 2006a, 2008). Des expériences sur des mouches volant au point fixe (Götz, 1968 ; Götz et Buchner, 1978) ou librement (David, 1979, 1982, 1985), sur des criquets attachés (Spork et Preiss, 1993), sur des papillons attachés (Preiss, 1987), et sur des abeilles (Srinivasan et al., 1996, Baird et al., 2005, 2006, détails au **III.3.3.**) ont largement montré que le flux optique *latéral* affecte la force propulsive

d'un insecte, et par conséquent sa vitesse d'avance. Cela impliquerait que l'oeil composé (panoramique) de l'insecte soit régionalisé en régions *ventrale* et *latérale*. D'autres exemples de régionalisation sont connus chez l'insecte (Wehner et Strasser, 1985 ; Wehner et Rossel, 1985 ; Labhardt, 1980, 1988).

La partie suivante **IV.2.** vise à compléter un certain nombre de résultats comportementaux obtenus chez l'abeille (voir **III.3.2.** et **III.3.3.**) pour mettre en évidence la présence, non pas d'un *seul* régulateur de flux optique latéral, mais de *deux* régulateurs de flux optique latéral complémentaires, appelé *régulateur dual de flux optique latéral*.

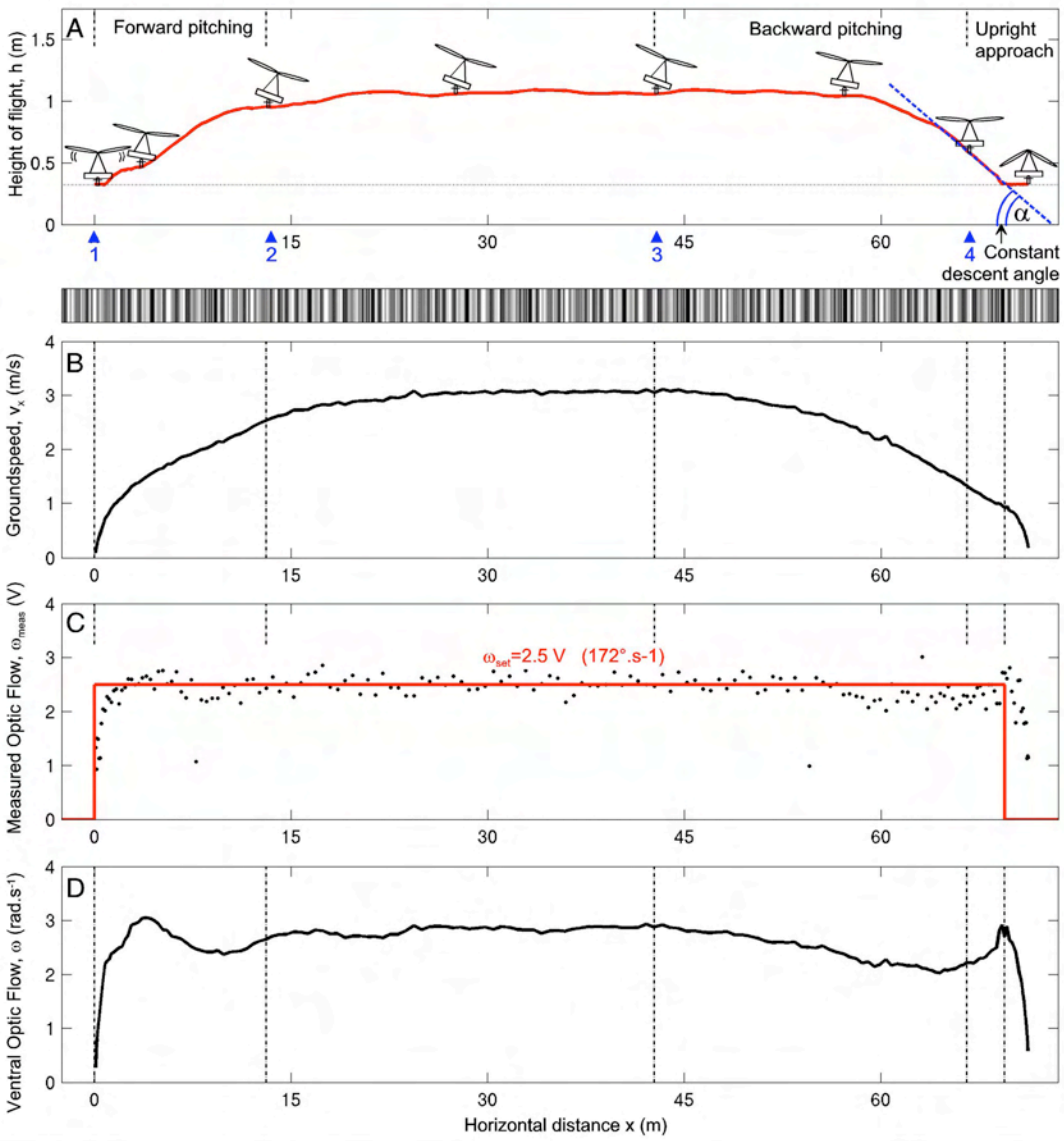

Fig. IV.1.C. Vol effectué par le robot OCTAVE équipé d'un régulateur de flux optique ventral décrit sur la Fig. IV.1.B. (d'après Franceschini et al., 2007)

(a) Entre les flèches bleues 1 et 2 : une rampe de basculement en tangage de $\Delta\Theta$ = +10° (vers l'avant) fait augmenter la vitesse d'avance jusqu'à 3 m/s, entraînant automatiquement un décollage du robot qui atteint une hauteur de 1 m, imposé par la consigne de flux optique (ω_{set} =3 rad/s, i.e., 172°/s, i.e., 2,5 V en (c)). Entre les flèches bleues 2 et 3 : dès lors que la vitesse d'avance du robot est constante, celui-ci engage un *suivi de terrain*. Entre les flèches bleues 3 et 4 : une rampe de basculement en tangage de $\Delta\Theta$ = -10° (vers l'arrière) fait diminuer la vitesse d'avance jusqu'à 0 m/s, entraînant automatiquement un atterrissage du robot. Durant l'approche finale, on observe que le robot atterrit à pente constante, comme le fait l'abeille (Srinivasan et al., 2000). Le trait horizontal en pointillés représente la hauteur du train d'atterrissage de l'appareil, situé à 0,30 m du sol.

(b) Vitesse sol V_x.

(c) Sortie du capteur de flux optique ω_{meas}, dont on voit la valeur proche de la consigne ω_{set} représentée en rouge.

(d) Flux optique réel en sortie du régulateur (calculée en faisant le rapport V_x/h). On voit que le flux optique ventral ω est maintenu relativement constant à 3 rad/s tout au long du trajet.

IV.2. *Contrôle du vol horizontal : les régulateurs de flux optique latéraux*

IV.2.1. *Expérimentation*

Remarques préliminaires

* Le protocole expérimental a été inspiré par les situations fondamentales du contrôle de vol vertical (voir **IV.1.**). Au *suivi de terrain* en vol vertical, nous avons associé *le suivi de paroi* en vol horizontal.

Afin de mettre en évidence la relation entre le suivi de paroi et la régulation du flux optique latéral, nous avons mis en place différentes situations expérimentales :

- observations de la trajectoire de suivi de paroi en fonction de la position initiale de l'abeille par rapport à la paroi,
- observations de la trajectoire de suivi de paroi en l'absence d'un flux optique latéral.

* La forme et les dimensions de l'enceinte de vol de l'abeille (corridor) ont été choisies de telle sorte que l'on puisse observer la trajectoire de l'abeille en régime permanent.

Description du corridor expérimental

Toutes les expériences ont été réalisées dans la propriété d'un apiculteur habitant aux alentours de Marseille (commune de Peypin : longitude 43°24' N, latitude 5°33' E, altitude : 336 m) pendant les mois de septembre et octobre 2005[1]. Les températures[2] durant la journée étaient de 20-31°C en septembre et de 18-23°C en octobre. Les expériences ont consisté à enregistrer des vols libres d'abeilles dans quatre conditions expérimentales. Le protocole expérimental est constitué d'un corridor rectangulaire relativement large (0,95 m) et long (3 m) (Figs. IV.2.1.A et IV.2.1.C.(a)). Les deux murs latéraux (hauteur : 0,25 m) sont tapissés d'un motif vertical périodique formant des créneaux de période spatiale λ = 10 cm en utilisant une colle[3] sans solvant. Nous sommes sûrs que l'abeille peut le voir quelle que soit sa position latérale dans le corridor[4], étant donnés les angles d'acceptance et inter-ommatidial de l'abeille, qui sont tous deux de l'ordre de 2,5° (Seidl et Kaiser, 1981 ; Horridge, 2003). Les bandes verticales grises et blanches présentent un contraste m = 0,41. Ce contraste a été mesuré dans la zone spectrale propre à la vision du mouvement de l'abeille (Kaiser et Liske, 1974) en utilisant un filtre optique Kodak vert (Wratten Nb 61, transmission maximale à 550 nm, largeur à mi-hauteur 50 nm).

Dans l'une des expériences, la partie centrale (de longueur 1,5 m) du mur de gauche pouvait être

1 Sur une durée de 3 semaines du 15 septembre 2005 au 6 octobre 2005.
2 Utilisation des données de la station météorologique de Peypin : http://membres.lycos.fr/meteopeypin/Releves.html
3 Colle Sader© Fortissimo à base de polymère MS.
4 La période angulaire minimale vue de la plus grande position latérale (largeur du corridor : 0,95 m) est de 6°>2,5°.

enlevée (entre les abscisses X = 0,75 m et X = 2,25 m) pour créer une ouverture latérale (Fig. IV.2.1.C.(b)) offrant à l'abeille un flux optique gauche négligeable vis-à-vis de son flux optique droit. Cette ouverture était orientée vers la vallée (Fig. IV.2.1.D.(a)) et localisée à ~15 m du pin le plus proche (Fig. IV.2.1.D.(b)). Le tronc de ce pin, que l'abeille pouvait voir, généré un flux optique de seulement 4°/s (voir colonne ω_L dans Tab. IV.2.2.1.).

La surface en bois brut du sol est texturée d'une peinture blanche acrylique pour maximiser le contraste optique de l'insecte par rapport au sol lors des acquisitions vidéo. Le corridor est recouvert d'une moustiquaire transparente favorisant une ventilation efficace du corridor et refermé de part et d'autre par des planches blanches. Les abeilles entrent dans le corridor par l'une des trois ouvertures (gauche : E_L, centrale : E_C, ou droite : E_R) faites sur la moustiquaire (Fig. IV.2.1.C.(a)) avec une vitesse d'avance quasiment nulle.

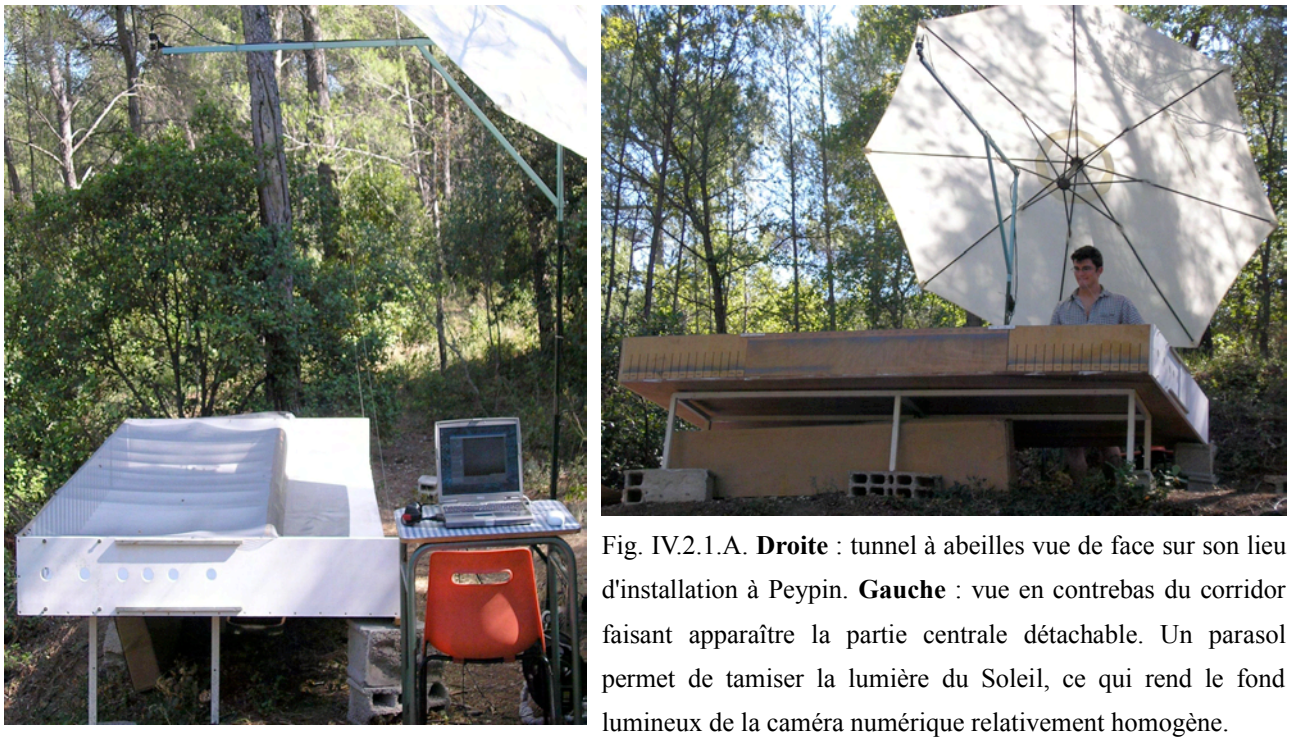

Fig. IV.2.1.A. **Droite** : tunnel à abeilles vue de face sur son lieu d'installation à Peypin. **Gauche** : vue en contrebas du corridor faisant apparaître la partie centrale détachable. Un parasol permet de tamiser la lumière du Soleil, ce qui rend le fond lumineux de la caméra numérique relativement homogène.

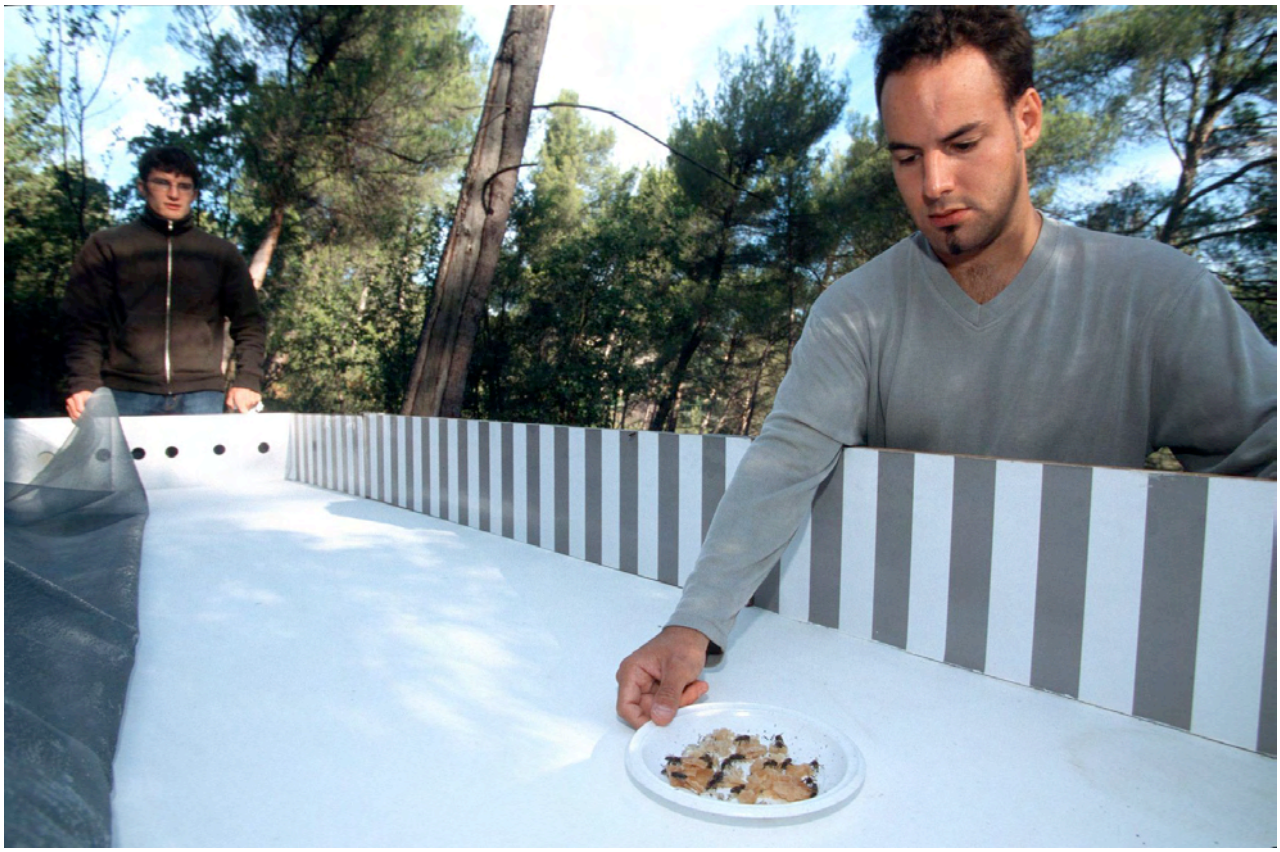

Fig. IV.2.1.B. Entraînement des abeilles. Les bonbons au miel sont placés de plus en plus profondément dans le tunnel de manière à imposer aux abeilles de s'aventurer jusqu'à son extrémité. En arrière plan, Guillaume MASSON, qui a participé largement aux expériences lors de son stage de fin d'études à l'INSA de Lyon.

Copyright® Philippe Psaila.

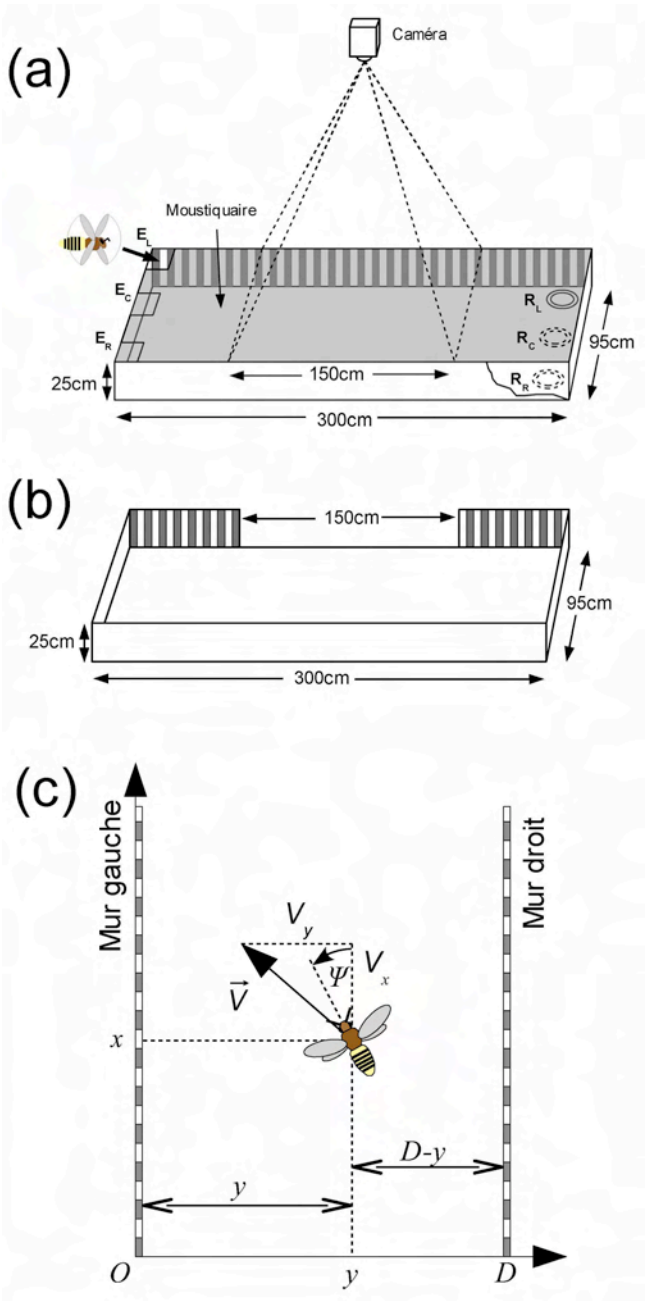

Fig. IV.2.1.C. (a) Corridor expérimental (3x0,95x0,25 m). Les abeilles entrent par l'une des trois ouvertures (gauche : E_L, centrale : E_C, ou droite : E_R) et sont récompensées à l'une des trois positions de la source de nectar artificiel (R_L, R_C, et R_R). Une caméra numérique à haute résolution, placée à 2,20 m au dessus du corridor, enregistre à 20 images par seconde sur une distance de 1,5 m, les trajectoires d'abeilles volant librement. Une moustiquaire transparente est tendue sur le tunnel. Les murs sont recouverts d'un motif périodique d'alternance de bandes verticales grises et blanches (période spatiale $\boldsymbol{\lambda}$ = 10 cm, contraste optique $\boldsymbol{m}$ = 0,41). (b) Dans l'une des expériences, la partie centrale (de longueur 1,5 m) est retirée afin que le flux optique gauche généré durant le vol aller des abeilles soit négligeable vis-à-vis du flux optique droit (voir légende Fig. IV.2.1.D). (c) Vue de dessus d'une abeille volant avec un vecteur vitesse V le long d'un corridor rectiligne. Ψ représente l'angle de lacet du corps de l'abeille par rapport à l'axe du tunnel, x son abscisse, y son ordonnée, V_x et V_y sont les composantes du vecteur vitesse par rapport au tunnel. y_L et y_R, sont les ordonnées respectives des murs gauche et droit. $D_L = y_L - y$ et $D_R = y - y_R$ sont les distances respectives du corps de l'abeille par rapport aux murs gauche et droit.

(D'après Serres et al., 2008)

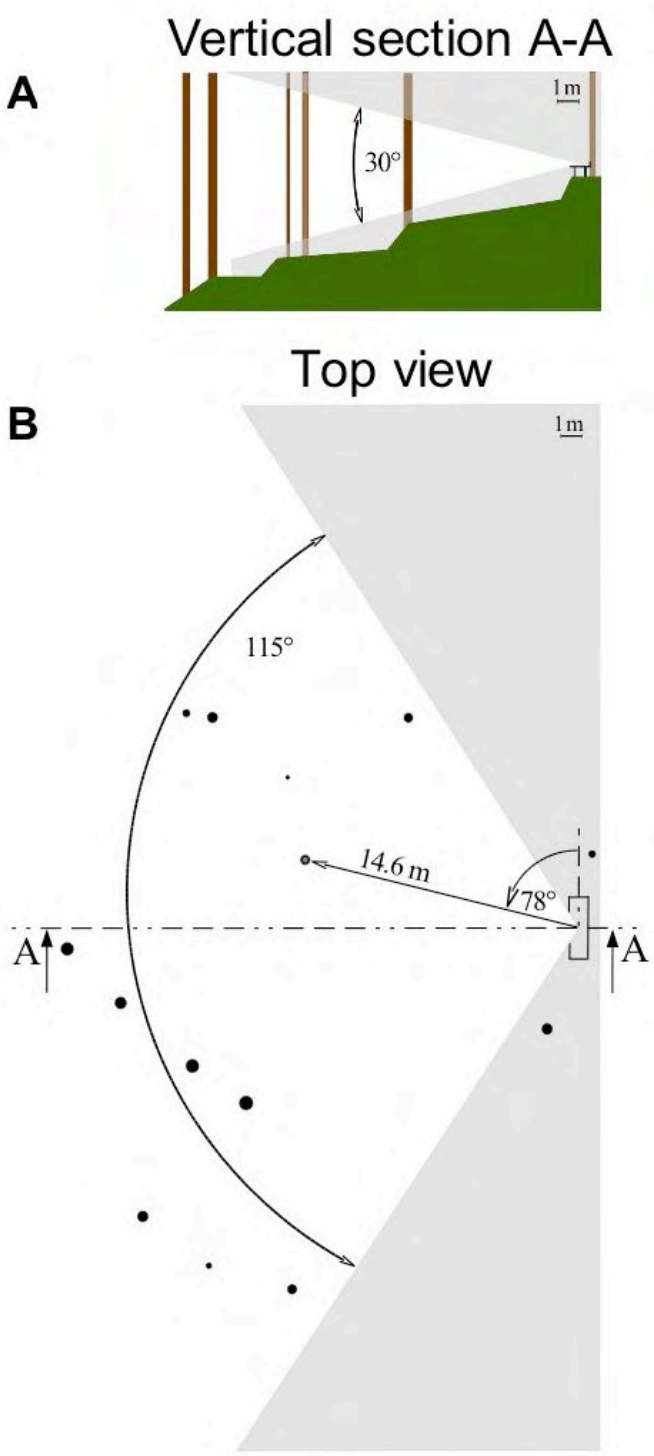

Fig. IV.2.1.D. Vue latérale et vue de dessus du dispositif expérimental (Fig. IV.2.1.A). Le mur gauche du corridor est orienté vers la vallée. Lorsque la partie centrale du mur de gauche est retirée, le champ de vue de l'abeille par rapport au centre du corridor s'étend de 30° verticalement et de 115° horizontalement.

(a) Coupe verticale A-A. Le panorama vallonné extérieur est vert et le tronc des pins est marron foncé.

(b) Vue de dessus du dispositif expérimental. Les disques noirs représentent la position et le diamètre de chacun des pins les plus proches dans le champ visuel gauche. Par exemple, le pin le plus proche (flèche noire) est situé à une distance $D_L = 14{,}6$ m et à un angle azimutal $\theta = 78°$ génèrant un flux optique gauche relativement faible $\omega_{tree} = 12°/s$ ($\omega_{tree} = V.\sin\theta / D_L$ calculé avec la vitesse maximale de l'abeille $V = 3$m/s). Tous les autres arbres génèrent un flux optique bien inférieur à ω_{tree}.

Entraînement des abeilles

Les expériences sont réalisées à l'extérieur par temps ensoleillé et en l'absence de vent. La ruche la plus proche se trouve à ~15 m du couloir. Pour chaque expérience, les abeilles sont entraînées, *en présence des deux murs*, à pénétrer dans le tunnel par l'une de ses trois ouvertures (entrée droite : E_R, centrale : E_C, gauche : E_L), ce choix variant d'une expérience à l'autre. Les abeilles sont nourries pendant trois jours avec une récompense à base de bonbons au miel placée dans une assiette blanche ; celle-ci est déplacée au fur et à mesure de plus en plus vers le fond du corridor (Fig. IV.2.1.B.). Ensuite, les bonbons au miel sont remplacés par de l'eau sucrée[1] pendant deux jours supplémentaires afin d'exclure tout indice olfactif. La récompense à base d'eau sucrée est toujours placée au fond du corridor sur l'une des trois positions (récompense à droite : R_R, au centre : R_C, à gauche : R_L). Suite à cette période d'entraînement, on enregistre la trajectoire d'abeilles se présentant une à une dans le champ de vue de la caméra.

Enregistrement vidéo et analyse des trajectoires de vol

Seules les trajectoires de vol *vers la récompense* sont filmées, à 20 images par seconde, avec une caméra numérique CMOS noir et blanc de haute résolution (*Prosilica*™ EC1280 : 1280x1024 pixels) positionnée à 2,20 m au dessus du sol du corridor (Fig. IV.2.1.A,C). Les données sont stockées sur un PC portable équipé d'un logiciel d'acquisition de séquences d'images (logiciel *VisionStage*™ : http://www.alliancevision.com). Le champ de vue de la caméra est ajusté pour couvrir une longueur de 1,5 m et une largeur de 0,95 m centré sur le corridor. L'ouverture de l'objectif est ajustée pour que sa profondeur de champ couvre toute la hauteur du corridor. L'aire couverte par la caméra est 64 fois plus grande que celle couverte lors des travaux réalisés par l'équipe australienne (Kirchner et Srinivasan, 1989; Srinivasan et al., 1991). La résolution de notre caméra est si bonne qu'elle permet d'enregistrer une « image de corps d'abeille » sous la forme d'une ellipse orientée de ~14 pixels de long et de ~8 pixels de large. Les séquences d'images sont ensuite empilées pour former des chronophotographies, puis calibrées et seuillées avec une macro *ImageJ* (logiciel libre d'analyse et de traitement d'images développé sous licence GNU/GPL : http://rsb.info.nih.gov/ij/). Chacune des 156 trajectoires ainsi enregistrées est alors traitée avec un script *Matlab*™ qui détermine sur chaque image d'abeille : l'ordonnée y, l'abscisse x, et l'angle de lacet Ψ par rapport à l'axe longitudinal du corridor (Fig. IV.2.1.C.(c)). Les détails méthodologiques relatifs à l'enregistrement et la reconstruction des trajectoires sont décrits dans les rapports de projet de fins d'études de G. Masson (2006) et M. Ogier (2007).

1 35% w/w, c'est-à-dire, une concentration de 1,2 mol/l de sucrose (99% de saccharose)

Analyses statistiques

Pour chaque trajectoire, la vitesse d'avance instantanée V_x de l'abeille à l'abscisse x est calculée en appliquant une dérivée filtrée, fenêtrée sur quatre points. Chaque trajectoire enregistrée est résumée en une ordonnée moyenne et une vitesse d'avance moyenne sur la longueur (1,5 m) du champ couvert par la caméra. Les analyses statistiques sont réalisées au moyen du logiciel « R » (logiciel libre d'analyses statistiques développé sous licence GNU/GPL : http://www.r-project.org/). On utilise des tests de Student (tests-*t*) pour comparer deux distributions. Le niveau de signification pour distinguer des différences est pris à $\alpha \leq 0,05$. Lorsque les jeux de données sont comparés plus d'une fois, le niveau de signification est corrigé en appliquant une correction de Bonferroni : $\alpha_c = 0,05/N$ (N : nombre de comparaisons).

IV.2.2. *Résultats*

IV.2.2.1. *Suivi de paroi en fonction des conditions initiales*

La figure IV.2.2.A montre des trajectoires d'abeilles volant librement dans le corridor. Les flèches noires du bas indiquent l'entrée des abeilles dans le corridor (E_R, E_C, ou E_L) et les cercles du haut indiquent la position de la récompense à base d'eau sucrée (R_R, R_C, ou R_L). Chaque ligne continue d'un faisceau représente une trajectoire reconstruite, en reliant linéairement les positions d'une abeille au cours des images successives.

La figure IV.2.2.A.(a) montre les trajectoires d'abeilles enregistrées lorsque l'entrée et la récompense sont centrées dans le corridor ($E_C \rightarrow R_C$)[1]. On voit que les abeilles suivent en moyenne la ligne médiane du corridor, conformément à la *réaction de centrage* observée antérieurement (Kirchner et Srinivasan, 1989). L'ordonnée moyenne de la distribution des 30 trajectoires est 0,48 ± 0,11 m (moyenne ± écart-type), tout à fait similaire à l'ordonnée de la ligne médiane du corridor (0,475 m). L'analyse statistique de la distribution des ordonnées montre que celle-ci n'est pas différente d'une distribution normale centrée suivant la ligne médiane du corridor (*t*-test, t=-0,162, df=29, p=0,872).

En revanche, lorsque les abeilles pénètrent et se nourrissent d'un même côté du corridor, elles volent de façon décentrée. On peut voir sur la Fig. IV.2.2.A.(b), où l'entrée et la récompense sont placées du côté gauche ($E_L \rightarrow R_L$)[2], que l'ordonnée moyenne de la distribution des 27 trajectoires est

1 Les enregistrements ont été faits le 15/09/05 (27°C durant la journée) et le 16/09/05 (26°C durant la journée)
2 Les enregistrements ont été faits le 23/09/05 (23°C durant la journée)

0,30 ± 0,08 m, s'écartant ainsi considérablement de l'ordonnée de la ligne médiane (0,475 m). Ce décentrage est confirmé par l'expérience opposée (Fig. IV.2.2.A.(c)) durant laquelle l'entrée et la récompense sont placées du côté droit du corridor ($E_R \rightarrow R_R$)[1], les abeilles volant alors près du mur droit. Dans ce cas, l'ordonnée moyenne de la distribution des 42 trajectoires est 0,71 ± 0,08 m, s'écartant à nouveau considérablement de l'ordonnée de la ligne médiane. L'analyse statistique des distributions d'ordonnées « gauche » et « droite » (Fig. IV.2.2.A.(b-c)) montre l'existence d'une différence significative entre ces deux distributions et la distribution normale centrée le long du corridor (*t*-test, $p<0,001$).

Les résultats de ces trois premières expériences montrent que les abeilles volant librement le long d'un corridor n'adoptent pas systématiquement une *réaction de centrage*, mais peuvent également adopter un comportement de *suivi de paroi*, qui n'a pas été décrit de manière quantitative auparavant.

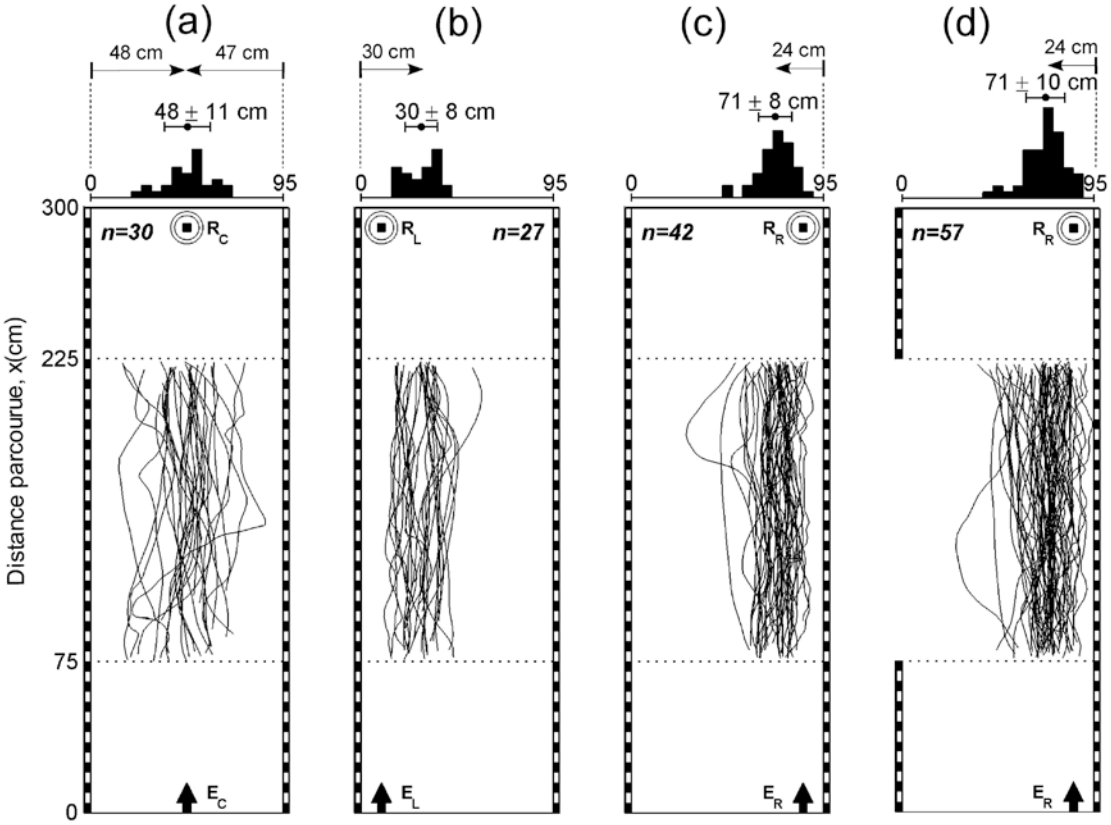

Fig. IV.2.2.A. Trajectoires individuelles d'abeilles dans le corridor pour quatre conditions expérimentales (Fig. IV.2.1.A). (a) L'entrée (E_C) et la récompense (R_C) sont centrées. (d'après Serres et al., 2008)
(b) et (c), l'entrée et la récompense sont placées d'un même côté du corridor (E_R et R_R, ou E_L et R_L).
(d) Les abeilles entrent et sont récompensées du côté droit ($E_R \rightarrow R_R$) comme en (c), mais la partie centrale du mur de gauche est enlevée afin de rendre négligeable le flux optique gauche vis-à-vis du flux optique droit (voir légende Fig. IV.2.1.D). Chaque histogramme représente la distribution des ordonnées moyennes évaluées pour chaque trajectoire ; nous indiquons au-dessus l'ordonnée moyenne et l'écart-type. *n* représente la nombre de trajectoires dans chaque condition.

1 Les enregistrements ont été faits le 05/10/05 (19°C durant la journée) et le 06/10/05 (18°C durant la journée)

Conditions	Nombre de trajectoires : n	Ordonnée y (cm)	Vitesse d'avance V_x (cm/s)	Angle de lacet Ψ (°)	Flux optique gauche ω_L (°/s)	Flux optique droit ω_R (°/s)
A	30	48 ± 11	117 ± 36	0 ± 9	148 ± 54	151 ± 61
B	27	30 ± 8	117 ± 38	5 ± 8	235 ± 80	106 ± 39
C	42	71 ± 8	88 ± 24	-13 ± 9	73 ± 25	226 ± 68
D	57	71 ± 10	98 ± 31	-9 ± 10	4 ± 1	265 ± 116

Tab. IV.2.2.1. Comparaisons entre les résultats des conditions expérimentales (Fig. IV.2.2.A) en termes d'ordonnée, de vitesse, d'angle de lacet, et de flux optique. (d'après Serres et al., 2008)

IV.2.2.2. *Vol en l'absence de flux optique latéral*

Les abeilles sont ici testées avec une ouverture de 1,5 m le long de la partie centrale du mur gauche durant les enregistrements ($E_R \rightarrow R_R$, comme sur la Fig. IV.2.2.A.(c))[1], afin de réduire considérablement (de plus d'une décade) le flux optique gauche vis-à-vis du flux optique droit (entre les abscissses X = 0,75 m et X = 2,25 m). Comme le montre la Fig. IV.2.2.A.(d), les abeilles volent près du mur droit de la même façon que sur la Fig. IV.2.2.A.(c), sans apparemment être affectées par l'absence du mur gauche. L'ordonnée moyenne de la distribution des 57 trajectoires est de 0,71 ± 0,10 m, une distribution très semblable à celle obtenue en présence du mur de gauche (Fig. IV.2.2.A.(c)) (t-test, t=0,026, df=94,6, p=0,979).

Lorsque nous réalisons l'expérience opposée ($E_L \rightarrow R_L$, données non publiées), les abeilles sont confuses et n'arrivent plus à atteindre la source de nectar. Ces expériences suggèrent donc que le maintien du contact visuel avec le mur suivi est un élément clé pour atteindre la source de nectar, et que les abeilles traitent l'information visuelle provenant de ce mur pour se piloter.

IV.2.2.3. *Relation entre la vitesse d'avance et la distance au mur en régime permanent*

Les résultats précédents montrent que l'abeille tend à suivre un mur à une certaine distance plutôt que de se centrer systématiquement dans le corridor. Quelle stratégie les abeilles peuvent-elles employer pour contrôler leur positionnement latéral dans le corridor ? Pour répondre à cette question, nous avons analysé six trajectoires, image par image, sélectionnées parmi les 156 trajectoires parce qu'elles montrent une nette variation de la vitesse d'avance le long de la fenêtre d'observation de la caméra.

1 Les enregistrements ont été faits le 06/10/05 (18°C durant la journée)

Pour chaque image, nous déterminons la position de l'abeille (x,y) et son orientation en lacet Ψ par rapport à l'axe longitudinal du corridor, puis la vitesse d'avance V_x de l'abeille. Nous représentons ensuite cette vitesse d'avance V_x en fonction de la distance au mur de gauche D_L puis en fonction de la distance au mur de droite D_R dans l'optique de déceler l'existence éventuelle d'une relation entre vitesse et distance qui suggèrerait un lien avec le flux optique latéral. Comme le montre la Fig. IV.2.2.3.A, le flux optique latéral généré par une abeille volant dans le plan horizontal est, par définition, la vitesse angulaire des bandes verticales tapissant les murs. L'abeille perçoit les flux optiques droit ω_R (Eq. IV.2.3.3.A) et gauche ω_L (Eq. IV.2.3.3.B).

$$\omega_R = \frac{V_x}{D_R} \qquad \text{Equation IV.2.2.3.A}$$

$$\omega_L = \frac{V_x}{D_L} \qquad \text{Equation IV.2.2.3.B}$$

Seul le flux optique purement latéral est considéré ici, ce qui est justifié par les résultats d'expérience du groupe de Srinivasan (1991). Des abeilles volant librement dans un corridor étroit dont l'un des murs était uniformément blanc alors que l'autre portait une bande verticale noire unique à mi-chemin, a révélé que les abeilles s'éloignaient brusquement de cette bande lorsqu'elle apparaissait dans leur champ visuel *purement latéral* (Srinivasan et al., 1991, Fig. 8). Nous limitons donc notre étude à l'influence des flux optiques latéraux maximaux (Eqs. IV.2.2.3.A-B), car tout autre flux optique latéral est une pondération du flux optique latéral maximal par une fonction sinus (voir Chapitre **II**).

La figure IV.2.2.3.B montre trois trajectoires d'abeilles (sélectionnées parmi celles de la Fig. IV.2.2.A, et une expérience supplémentaire non décrite ici : trajet $E_L \rightarrow R_R$) dans lesquelles la vitesse de l'abeille varie notablement.

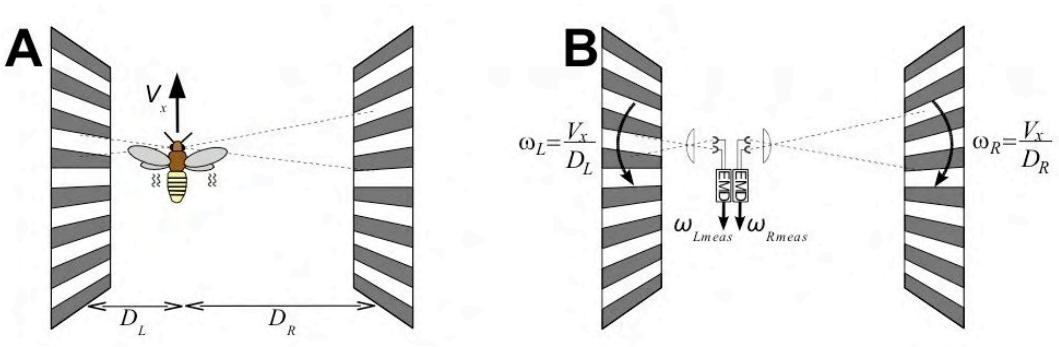

Fig. IV.2.2.3.A. (a) Définitions des flux optiques droit ω_R et gauche ω_L, et mesurés ω_{Rmeas} et ω_{Lmeas} perçus par une abeille se translatant dans le plan horizontal le long du tunnel (Approximation 2-D) à une vitesse d'avance V_x, et une distance au mur droit D_R, et une distance au mur gauche D_L. Les flux optiques sont les vitesses angulaires respectives ω_R et ω_L (en rad/s) auxquelles défilent les bandes verticales à la perpendiculaire semblant se déplacer en sens inverse du mouvement de l'abeille.

(b) Une paire minimaliste de capteurs de flux optique du système visuel de l'abeille : chaque capteur de flux optique latéral comprend une micro-lentille et deux photorécepteurs pilotant un détecteur élémentaire de mouvement (DEM) . Chaque sortie, ω_{Rmeas} et ω_{Lmeas}, sert de signal de contre-réaction sur le schéma de contrôle de la Fig. IV.4.

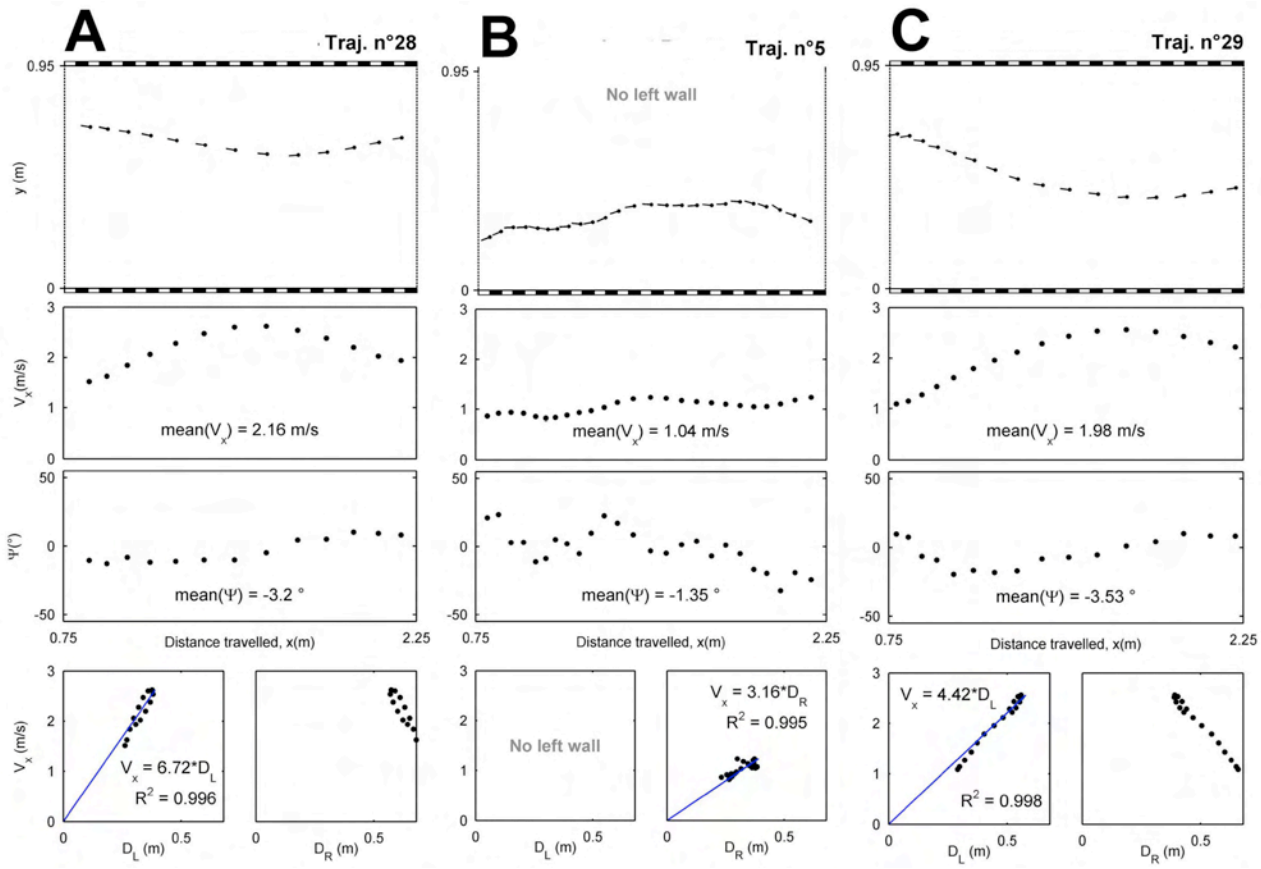

Fig. IV.2.2.3.B. Analyse détaillée de trois trajectoires individuelles d'abeilles sélectionnées parmi les trajectoires obtenues à la Fig. IV.2.2.A. Les figures du haut représentent des trajectoires d'abeilles (y en fonction de x) toutes les 50 ms (point = tête de l'abeille ; le segment = corps). Les graphiques centraux représentent la vitesse d'avance et l'angle de lacet instantanés en fonction de la distance parcourue x. Les deux sous-graphiques inférieurs représentent la vitesse d'avance en fonction des distances aux murs gauche et droit. Dans chacun des trois cas ci-dessus, la vitesse d'avance de l'abeille et sa distance à un mur apparaissent comme proportionnelles l'une à l'autre, avec un fort coefficient de détermination (R^2>0,99).

(a) et (c) La vitesse d'avance V_x apparaît *proportionnelle* à la distance au mur *gauche* D_L.

(b) Les 1,5 m de la partie centrale du mur gauche sont enlevés afin d'offrir à l'abeille un flux optique gauche négligeable vis-à-vis de celui du flux optique droit. La vitesse d'avance de l'abeille et sa distance au mur droit apparaissent être proportionnelles l'une à l'autre, comme si l'abeille n'était pas perturbée par la partie manquante du mur gauche.

Sur la Fig. IV.2.2.3.B.(a), l'abeille effectue le trajet $E_L \rightarrow R_R$. On constate que la vitesse d'avance V_x de l'abeille et la distance au mur *gauche* D_L sont proportionnelles l'une à l'autre sur les 1,5 m de trajectoires enregistrées (cf. graphique du bas, partie gauche). En revanche, la partie droite de ce même graphique montre que la vitesse d'avance n'est pas du tout proportionnelle à la distance au mur *droit*.

Sur la Fig. IV.2.2.3.B.(b), l'abeille entre et collecte du nectar du côté droit ($E_R \rightarrow R_R$), alors que la partie centrale du mur de gauche a été retirée. Nous observons que la vitesse d'avance de l'abeille et la distance au mur *droit* sont proportionnelles l'une à l'autre (cf. graphique du bas, partie droite). La

Fig. IV.2.2.3.B.(c) représente une autre trajectoire au cours de laquelle la vitesse d'avance et la distance au mur *gauche* sont proportionnelles l'une à l'autre (comme sur la Fig. IV.2.2.3.B.(a)).
Pour les trois exemples en question on constate donc qu'il existe une relation *linéaire* entre la vitesse d'avance et la distance au mur (droit ou gauche), comme l'atteste le fort coefficient de détermination (R^2>0,99) sur chacun des graphiques du bas (Fig. IV.2.2.3.B). Selon les Eqs. IV.2.2.3.A-B, la pente des droites de régression (droite bleue sur la Fig. IV.2.2.3.B) n'est rien d'autre que le flux optique latéral. Dans les trois cas examinés, la pente de régression est respectivement égale à 4,42 rad/s (253°/s) sur la Fig. IV.2.2.3.B.(a), 3,16 rad/s (181°/s) sur la Fig. IV.2.2.3.B.(b), de 6,72 rad/s (385°/s) sur la Fig. IV.2.2.3.B.(c).

IV.2.2.4. *Trajectoires en régime transitoire : décomposition en phases de vol*

Dans des conditions naturelles de vol, les abeilles doivent gérer des situations bien plus complexes qu'un simple suivi de paroi. Comment l'abeille peut-elle bien faire pour éviter les obstacles ?

Sur la Fig. IV.2.2.4, sont représentées trois trajectoires d'abeilles qui suivent *successivement* le mur droit et gauche. Sur la Fig. IV.2.2.4.(a,c), l'abeille suit le trajet $E_C \rightarrow R_C$, alors que sur la Fig. IV.2.2.4.(b), l'abeille suit le trajet $E_L \rightarrow R_R$. Chacune de ces trois trajectoires est divisée en phases de vol (numérotées 1, 2, 3...) caractérisées par une orientation relativement constante du corps de l'abeille (angle de lacet). Ces phases de vol sont analysées séparément les unes des autres.
Sur la Fig. IV.2.2.4.(a), deux phases de vol peuvent être distinguées. L'abeille entre au milieu du corridor puis suit le mur *gauche*, sa vitesse d'avance et sa distance au mur *gauche* apparaissent proportionnelles l'une à l'autre (régression bleue de gauche : la pente de la droite de régression est de 2,40 rad/s, soit 138°/s). A mi-parcours, on voit l'abeille changer soudainement de mur et voler plutôt vers le mur *droit*, sa vitesse d'avance et sa distance au mur *droit* sont alors proportionnelles (régression bleue de droite, la pente de la droite de régression est de 3,09 rad/s, soit 177°/s).
Sur la Fig. IV.2.2.4.(b), au lieu de voler directement vers la récompense (cette fois placée en oblique : $E_L \rightarrow R_R$), l'abeille suit d'abord le mur *gauche* durant avec une vitesse d'avance et une distance au mur *gauche* proportionnelles l'une à l'autre (le facteur de proportionnalité est de 3,23 rad/s, soit 185°/s, comme le montre la régression linéaire bleue sur les points noirs). Puis, après une transition durant laquelle l'abeille suit la ligne médiane (avec de fortes rotations en lacet), elle se met à suivre le mur *droit*. Sa vitesse d'avance et sa distance au mur *droit* sont alors proportionnelles l'une à l'autre (le facteur de proportionnalité est de 2,60 rad/s, soit 145°/s, comme le montre la régression linéaire bleue sur les points ronds).

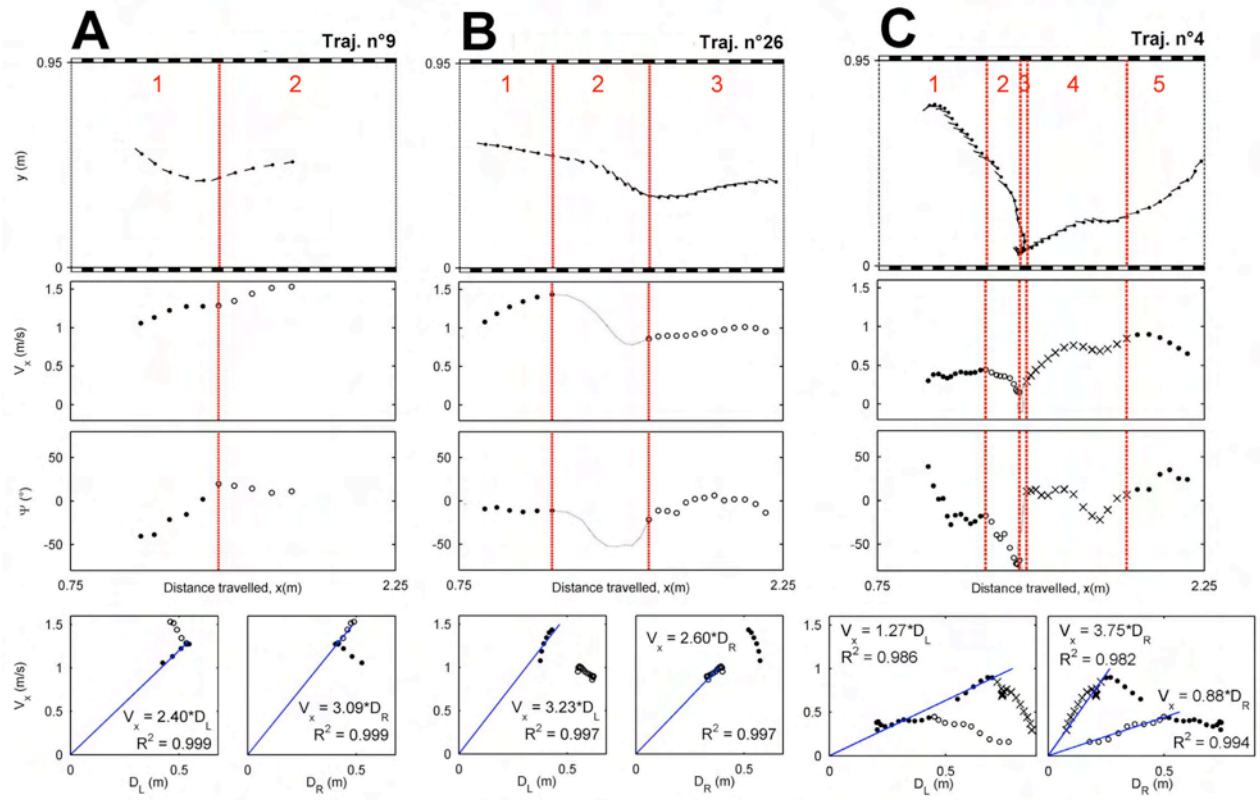

Fig. IV.2.2.4. Analyse détaillée de trois trajectoires individuelles dans lesquelles l'abeille suit de façon successive les murs.

(a) La trajectoire peut être décomposée en deux phases de vol 1 et 2. Durant la phase 1, la vitesse d'avance de l'abeille et sa distance au mur *gauche* sont proportionnelles l'une à l'autre (R^2>0,99). Durant la phase 2, la vitesse d'avance de l'abeille et sa distance au mur *droit* sont proportionnelles l'une à l'autre (R^2>0,99).

(b) L'abeille pénètre dans le corridor côté gauche. Sa vitesse d'avance et sa distance au mur *gauche* sont initialement proportionnelles l'une à l'autre. Après une phase durant laquelle l'abeille effectue de fortes rotations autour de l'axe vertical (non analysées), elle vole près du mur *droit*. Sa vitesse d'avance et sa distance au mur *droit* sont alors proportionnelles l'une à l'autre (R^2>0,99).

(c) La trajectoire d'abeille semble plutôt chaotique, mais, quatre phases de vol peuvent être distinguées durant lesquelles l'angle du corps de l'abeille est relativement constant. Durant chacune de ces phases, la vitesse d'avance de l'abeille et sa distance au mur droit ou gauche sont proportionnelles l'une à l'autre, avec un très bon coefficient de détermination (R^2>0,98).

Il semblerait donc que l'abeille soit capable, le long d'une même trajectoire, de « changer de mur » et de « changer de facteur de proportionnalité » entre sa vitesse d'avance et sa distance à l'un des murs ; ceci se vérifie encore sur la trajectoire la plus chaotique (Fig. IV.2.2.4.(c)) sur laquelle nous distinguons pas moins de cinq phases de vol. L'abeille entre du côté gauche du corridor (Phase 1 : points noirs), puis elle vole en direction du côté droit (Phase 2 : points ronds). Dès qu'elle atteint le mur droit, elle semble « hésiter », puis se met à tourner sur elle-même (Phase 3 : ligne en pointillés), cette brève phase n'est pas analysée du fait des fortes rotations en lacet de l'insecte. L'abeille aligne alors son corps avec l'axe du corridor et exécute une parfaite glissade latérale en

même temps qu'elle accélère (Phase 4 : croix). L'abeille achève sa course en direction de la récompense (Phase 5 : points noirs). Les deux graphiques du bas révèlent que, durant chacune des phases de vol, l'abeille maintient étonnamment sa vitesse d'avance et sa distance *à l'un des deux murs* proportionnelles l'une à l'autre. Durant les phases 2 (point ronds) et 4 (croix), l'abeille vole près du mur droit, sa vitesse d'avance et sa distance au mur droit sont proportionnelles l'une à l'autre (régression linéaire à 0,88 rad/s, soit 50°/s, durant la phase 2, et 3,75 rad/s, soit 215°/s, durant la phase 4). Un même facteur de proportionnalité est obtenu, durant les phases 1 et 5, entre la vitesse d'avance et la distance au mur gauche (les deux régressions linéaires ont la même pente : 1,27 rad/s, soit 73°/s). Bien que cette trajectoire d'abeille soit atypique et plutôt chaotique, l'analyse effectuée ici (Fig. IV.2.2.4.(c)) semble révéler l'existence d'une règle de base qui opère successivement pendant chaque phase.

IV.2.3. *Discussion*

Les expériences conduites sur des abeilles volant librement dans un *large* corridor en route vers une source artificielle de nectar montrent qu'elles n'adoptent pas systématiquement un comportement de centrage (Fig. IV.2.2.A), comme celui si souvent décrit dans des corridors plutôt *étroits* (Kirchner et Srinivasan, 1989 ; Srinivasan et al., 1991 ; Hrncir et al., 2004 ; Baird et al., 2005). Les abeilles semblent ici plutôt longer un mur et le suivre visuellement sans « prêter attention » au mur opposé. Cette idée est renforcée par le fait que les abeilles sont également capables de collecter du nectar alors même qu'une partie majeure du mur de gauche est retirée (Fig. IV.2.2.A.(d)). La discussion ci-dessous propose de comparer des mécanismes de contrôle visuo-moteur basés : soit sur des indices visuels *statiques* (hauteur des murs, textures sur les murs), soit sur des indices visuels *dynamiques* (flux optique), qui pourraient expliquer de façon satisfaisante le *comportement de suivi de paroi* mis en évidence dans ce chapitre.

IV.2.3.1. *Indices visuels : statiques ou dynamiques ?*

Nous observons que les abeilles adoptent un comportement de suivi de mur dès lors que l'entrée et la récompense sont placées près du même mur (Fig. IV.2.2.A.(b-c)), et même si une partie de l'un des deux murs est enlevée (Fig. V.2.2.A.(d)). Pour exécuter une telle manoeuvre, l'abeille pourrait maintenir sa distance à l'un des murs constante en utilisant un système de vision binoculaire. On sait que la majorité des insectes possèdent une trop faible base binoculaire pour pouvoir estimer les distances (Collet et Harkness, 1982 ; Horridge, 1987). Pour analyser le mécanisme de contrôle

visuo-moteur de l'abeille, Srinivasan et ses collaborateurs ont entraîné des abeilles à traverser un corridor étroit (12 cm de large) dont l'un des murs pouvait être mis en mouvement suivant l'axe longitudinal (voir **III.3.2.**). Ils observèrent alors que les abeilles se décentraient plus ou moins, selon la vitesse relative des motifs du mur en mouvement. Cette expérience met en évidence trois points fondamentaux du guidage aérien de l'abeille :

(i) Les abeilles n'estiment pas les distances pour éviter les murs, sinon elles auraient été insensibles au mouvement relatif du mur motorisé (voir Fig. III.3.2.B.(b-c)), dont la distance ne change pas qu'il soit ou non en mouvement.

(ii) Les abeilles n'estiment, pour éviter les murs, ni la hauteur, ni l'angle d'élévation qu'ils sous-tendent, sinon elles auraient conservé un comportement de centrage même lorsque l'un des deux murs étaient texturé d'un gris homogène (voir Fig. III.3.2.B.(d-e)).

(iii) La *réaction de centrage* de l'abeille est largement indépendante de la texture des motifs tapissant les murs en termes de fréquences spatiales et de contraste optique (Srinivasan et al., 1991). Cela montre également que l'abeille n'estime pas, pour éviter les murs, la largeur angulaire (donc la fréquence spatiale) des rayures verticales qui les tapissent.

Les travaux conduits par l'équipe australienne montrent que les mécanismes visuo-moteurs pilotant la locomotion *aérienne* de l'abeille dans un corridor sont basés sur des indices visuels *dynamiques* (flux optique) plutôt que *statiques* comme c'est le cas pour la fourmi du désert (dans des conditions expérimentales similaires la fourmi utilise les angles sous-tendus par la hauteur des murs pour les éviter et se centrer dans un corridor : Heusser et Wehner, 2002).

IV.2.3.2. *Equilibre des flux optiques latéraux ou régulation unilatérale ?*

Pour expliquer le comportement de suivi de mur de l'abeille dans notre *large* corridor, nous supposons ici que l'abeille se fie seulement au flux optique latéral qu'elle génère par sa locomotion. Le Tableau IV.2.2.1. montre la moyenne et l'écart-type des flux optiques latéraux (droit et gauche) pour chacune des conditions expérimentales correspondant à la Fig. IV.2.2.A. Lorsque les abeilles adoptent un *comportement de centrage* (Fig. IV.2.2.A.(a)), les flux optiques latéraux ne diffèrent pas significativement l'un de l'autre (*t*-test, t=-0,187, df=57,1, p=0,852). Au contraire, lorsque les abeilles adoptent un *comportement de suivi de paroi* (Fig. IV.2.2.A.(b-d)), les flux optiques latéraux diffèrent significativement l'un de l'autre (*t*-test pour chaque paire de flux optiques latéraux, p<0,001). Par ailleurs, nous observons que lorsque les abeilles suivent le mur droit ou gauche, les distributions de flux optique *unilatéral* (gauche sur la Fig. IV.2.2.A.(b), et droit sur les Figs. IV.2.2.A.(c-d)) ne diffèrent pas significativement les unes des autres (*t*-test, α_C=0,025, p>0,025 pour chaque comparaison).

Nos résultats montrent enfin que les abeilles sont capables de franchir le corridor même si une partie majeure de l'un des ses murs est retirée. Si une abeille franchissait un corridor de ce type en équilibrant les flux optiques latéraux (selon l'hypothèse de Kirchner et Srinivasan, 1989), elle devrait s'engouffrer dans l'ouverture béante, puisqu'une ouverture génère un flux optique négligeable. Kirchner et Srinivasan (1989) ont entraîné des abeilles à collecter du nectar lorsqu'un mur était recouvert de bandes verticales alors que l'autre était recouvert d'un gris homogène (faible contraste optique $\boldsymbol{m}$<0,05). Ce mur homogène avait pour effet de générer des signaux visuels avec un très mauvais rapport signal-sur-bruit, mettant vraisemblablement « hors service » les capteurs de flux optique. Les auteurs de cette étude observèrent alors que les abeilles se décalaient vers le mur homogène mais sans entrer en collision avec celui-ci (Kirchner et Srinivasan, 1989 ; Srinivasan et al., 1991). En 1993, Srinivasan et ses collaborateurs étudièrent à nouveau ce comportement en entraînant les abeilles à franchir un corridor étroit (15,5 cm de large) présentant sur l'un de ses murs une ouverture circulaire de 21 cm de diamètre. A nouveau, ils observèrent que l'abeille se décentrait vers l'ouverture, sans toutefois s'y engouffrer. Ils appelèrent ce *nouveau* comportement « réaction latérale de l'abeille » sans pour autant donner plus d'explication sur la manière dont il pourrait apparaître. Prises dans leur ensemble, les données antérieures et les données nouvelles que nous avons apportées témoignent d'un comportement de *suivi de paroi* plutôt que d'un comportement de *centrage* dans les quatre situations suivantes :

- l'un des murs est recouvert d'un gris homogène (Kirchner et Srinivasan, 1989)
- l'un des murs présente une ouverture circulaire (Srinivasan et al., 1993)
- l'un des murs est relativement éloigné (~60 cm) (Fig. IV.2.2.A.(b-c))
- l'un des murs est retiré (Fig. IV.2.2.A.(d))

L'*hypothèse d'équilibrage des flux optique latéraux* (Kirchner et Srinivasan, 1989) n'explique le comportement de *suivi de paroi* observé chez l'abeille dans aucune de ces quatre situations. Nous montrons, dans ce qui suit, qu'une *régulation du flux optique unilatéral*, similaire en de nombreux aspects à la *régulation du flux optique ventral* (Ruffier et Franceschini, 2005 ; Franceschini et al., 2007), permettrait à un insecte de maintenir automatiquement une « distance de sécurité » à un mur, le prévenant de toute collision latérale. Au niveau physiologique, ce maintien du flux optique unilatéral pourrait simplement se traduire chez l'abeille par le maintien à une valeur constante de la fréquence des impulsions nerveuses produites par l'un de ses neurones VT (voir **III.2.3.2.**).

IV.2.3.3. *Qu'en est-il de la stabilisation en lacet de l'abeille ?*

Le mouvement en lacet d'un insecte est contrôlé par un réflexe en rotation dit de *réaction optomotrice* (voir **III.3.1.**), qui stabilise le cap de l'insecte contre toute perturbation en rotation

autour de son axe vertical (e.g., turbulences). Les neurones détecteurs de mouvement à large champ qui sont aptes à déclencher une *réaction optomotrice* possèdent une bande passante fréquentielle de 7-13 Hz, avec un pic de sensibilité à 10 Hz (Ibbotson et Goodman, 1990 ; Ibbotson, 2001). Dans nos expériences, nous observons que la fréquence temporelle (définie comme le quotient de la vitesse d'avance V_x par la période spatiale λ des bandes verticales sur les murs) perçue par chacun des deux yeux est voisine de 10 Hz, et qu'elle correspond, par conséquent, au maximum de sensibilité des neurones optomoteurs (voir **III.2.3.**). Ainsi, quelle que soit l'ordonnée de l'abeille dans le corridor, la fréquence temporelle perçue par ses deux yeux est voisine de 10 Hz, ce qui montre que l'abeille ne peut pas se fier à la fréquence temporelle de ses signaux photorécepteurs pour éviter les murs. Ce résultat concorde avec celui observé sur l'indépendance du comportement de l'abeille vis-à-vis des fréquences spatiales des textures sur les murs d'un corridor étroit (Kirchner et Srinivasan, 1989 ; Srinivasan et al., 1991 ; Baird et al., 2005). De plus, Srinivasan et ses collaborateurs ont apporté la preuve de l'existence de deux mécanismes de détection du mouvement à bord de l'abeille. Contrairement à la *réaction optomotrice* de l'abeille (Kunze, 1961 ; Srinivasan et al. , 1993), la *réaction de centrage* de l'abeille est régie par un mécanisme de détection non-directionnel du mouvement (Srinivasan et al., 1993). Le comportement de *suivi de paroi* observé ici chez l'abeille est donc vraisemblablement régi par ce même mécanisme de détection non-directionnel du mouvement. Par ailleurs, comme le montre la Fig. IV.2.2.A.(d), la trajectoire des abeilles n'est pas affectée par l'absence d'une partie du mur gauche, l'animal ne percevant qu'un flux optique gauche extrêmement faible. Une théorie basée sur la *réaction optomotrice* classique dite *théorie des équilibres optomoteurs* (Götz, 1975) contrôlant également le lacet de l'insecte ne permet pas d'expliquer le résultat de la Fig. IV.2.2.A.(d). La *réaction optomotrice* de l'insecte tendrait en effet à annuler son mouvement relatif par rapport au mur droit, or l'insecte poursuit son trajet sans « se coller » contre ce mur (Fig. IV.2.2.A.(d)). Enfin, la possibilité d'acquérir des trajectoires à haute résolution nous a permis de confirmer l'hypothèse qualitative de Srinivasan et collaborateurs (Srinivasan et al., 1991, page 531 et Fig. 2) selon laquelle l'abeille, lors d'un suivi de paroi, se pilote essentiellement par des glissades latérales plutôt que par des rotations autour de son axe vertical (Zeil et al., 2008).

IV.2.4. *Elaboration du modèle de contrôle du vol horizontal*

IV.2.4.1. *Contrôle d'avance de l'abeille*

Nous observons que les abeilles volent plus rapidement 1,05 ± 0,35 m/s que lors d'expériences

précédentes utilisant des corridors beaucoup plus étroits (Srinivasan et al., 1991; Srinivasan et al., 1996; Hrncir et al., 2004; Baird et al., 2005). Ce résultat est en accord avec des observations quantitatives faites dans un corridor fuselé, dans lequel les abeilles volaient d'autant plus rapidement que la section était plus large (Srinivasan et al., 1996). « L'encombrement » de l'environnement semble donc être évalué par l'abeille en terme de « vitesse angulaire d'image rétinienne des murs », qui peut être définie comme la *somme des flux optiques latéraux* (Srinivasan et al., 1996). Un tel *critère somme* avait déjà été imaginé et implémenté avec succès à bord d'un robot mobile pour contrôler sa vitesse d'avance (Santos-Victor et al., 1995) avant d'être repris par plusieurs autres (Srinivasan et al., 1999 ; Baratoff et al., 2000 ; Argyros et al., 2004). Dans nos expériences (Tab. IV.4), on constate que *la somme des flux optiques latéraux* est remarquablement semblable d'une expérience à l'autre lorsque les deux murs sont présents (*t*-test, $\alpha_C = 0{,}017$, $p>\alpha_C$), sauf pour la comparaison des distributions de la condition *B* par rapport à *D* (*t*-test, $p=0{,}001$) qui sont des distributions différentes dues au fait que le test de normalité est négatif pour la condition *D* (4ème colonne dans Tab. IV.4).

Pour résumer nos expériences, l'analyse des 156 trajectoires enregistrées révèlent que la somme des flux optiques latéraux est relativement constante et égale à 304°/s ± 104°/s. Cela suggère que l'abeille s'efforce de maintenir la somme de ses flux optiques latéraux constante et égale à une valeur que nous définissons comme une *consigne de flux optique bilatéral* et que nous interprétons comme une consigne d'avance ω_{setFwd}.

Tab. IV.4. Somme des flux optiques latéraux et tests statistiques associés.

Conditions	Nombre de trajectoires : *n*	$\omega_R+\omega_L$ (°/s)	Test de normalité Shapiro-Wilk *p-value*	Test de comparaison, *t*-test, *p-value*		
				A	B	C
A	30	299 ± 88	0,795			
B	27	341 ± 102	0,049	0,104		
C	42	299 ± 74	0,924	0,997	0,071	
D	57	269 ± 116	< 0,001	0,181	0,001	0,119

Selon cette hypothèse, la somme des flux optiques latéraux ($\omega_R+\omega_L$, Eq. IV.2.4.A) devrait être maintenue à cette consigne ω_{setFwd} :

$$\omega_{setFwd}=\omega_R+\omega_L=V_x\cdot(\frac{1}{D_R}+\frac{1}{D_L})=V_x\cdot(\frac{D_R+D_L}{D_R\cdot D_L}) \qquad \text{Equation IV.2.4.A}$$

La vitesse d'avance de l'abeille (Eq. IV.2.4.B) peut alors s'exprimer de la façon suivante :

$$V_x = \omega_{setFwd} \cdot \left(\frac{D_R \cdot D_L}{D_R + D_L}\right)$$ Equation IV.2.4.B

On constate donc que dans le cadre de cette hypothèse, la vitesse d'avance V_x de l'abeille (Eq. IV.2.4.B) est simplement fonction de cette consigne de flux optique d'avance ω_{setFwd} et du quotient $(D_R \cdot D_L)$**:**$(D_R + D_L)$. Nous définissons ce quotient comme étant le *paramètre d'encombrement* de l'environnement. Ainsi, la vitesse d'avance de l'abeille serait automatiquement ajustée en proportion du paramètre d'encombrement. Remarquons que ce paramètre ne dépend pas seulement de la largeur locale du corridor $(D_R + D_L)$. Ce n'est que dans un cas particulier où l'abeille est centrée ($D_R = D_L = D/2$), que sa vitesse d'avance serait proportionnelle à la largeur locale du corridor ($V_x = \omega_{setFwd} \cdot D/4$). Cela concorde avec les observations faites sur des mouches ou des abeilles volant librement dans un tunnel fuselé (David, 1982 ; Srinivasan et al., 1996), où l'on voit la vitesse de vol proportionnelle à la largeur locale du tunnel : l'insecte ralentit en pénétrant dans un tunnel rétrécissant, puis accélère une fois franchi le point de constriction (Srinivasan et al., 1996, Fig. 2). Les auteurs en ont conclu que « *la vitesse de vol est contrôlée en régulant la vitesse de l'image* » des murs (Srinivasan et al., 1996, page 244). Notre propre conclusion généralise cette hypothèse du fait que, même si une abeille n'est pas centrée dans un corridor (ou lorsque l'un des murs est en mouvement), elle maintient constante à chaque instant la somme des flux optiques issus des deux murs.

Cette conclusion nous permet de construire le premier régulateur de flux optique du *régulateur dual de flux optique* (Fig. IV.4) qui ajuste la vitesse d'avance de l'insecte, tandis que le second régulateur (voir **IV.2.4.2.**) ajustera sa distance aux murs.

Le contrôle d'avance (boucle bleue sur la Fig. IV.2.4) est un régulateur de flux optique qui maintient la somme des flux optiques latéraux constante en ajustant la force propulsive de l'insecte. Ce contrôle d'avance ressemble aux algorithmes de contrôle qui ont été développés sur des robots terrestres *non-holonomes* (Santos-Victor et al., 1995 ; Srinivasan et al., 1999 ; Baratoff et al., 2000 ; Argyros et al., 2004) qui restaient toujours centrés dans un corridor. Cette première boucle de rétroaction a pour objectif de minimiser l'erreur d'avance $\varepsilon_{Fwd} = \omega_{setFwd} - (\omega_{Lmeas} + \omega_{Rmeas})$ entre la somme des flux optiques et la consigne. En d'autres termes, ce premier régulateur de flux optique interprète toute variation du flux optique *bilatéral* comme résultant d'une accélération ou décélération de l'abeille. La vitesse finalement atteinte sera alors naturellement adaptée à l'encombrement de l'environnement (Eq. IV.2.4.B).

IV.2.4.2. *Contrôle latéral de l'abeille*

Le contrôle latéral (boucle rouge sur la Fig. IV.2.4) est le second *régulateur de flux optique latéral* susceptible d'être implanté dans le système nerveux de l'abeille. Le schéma de contrôle est relativement simple puisqu'il nécessite un comparateur délivrant un signal d'erreur ε_{Side} (Eq. IV.2.4.C) entre une consigne de flux optique *unilatéral* $\omega_{setSide}$ et le plus grand des deux flux optiques latéraux mesurés (droit et gauche). Ce critère de maximum (*max* dans la boucle rouge sur la Fig. IV.2.4) sélectionne la valeur la plus élevée des flux optiques latéraux mesurés, donc celle issue du mur le plus proche – le flux optique étant une fonction inverse de la distance. Le *régulateur de flux optique unilatéral* va permettre de maintenir constant ce flux optique unilatéral, donc de maintenir une « distance de sécurité » au mur puisqu'elle sera proportionnelle à la vitesse d'avance de l'abeille (Eqs. IV.2.4.A-B).

Le système anti-collision latéral est non-linéaire (les non-linéarités étant symbolisées par les deux rectangles entrelacés à la Fig. IV.2.3.3), parce que le flux optique latéral est une fonction inverse de la distance (D_R et D_L) aux murs (Eqs. IV2.2.3). Ce contrôle latéral interprète tout *accroissement* du flux optique latéral comme une *décroissance* de la distance au mur. Une simple fonction *signe* (*sign*

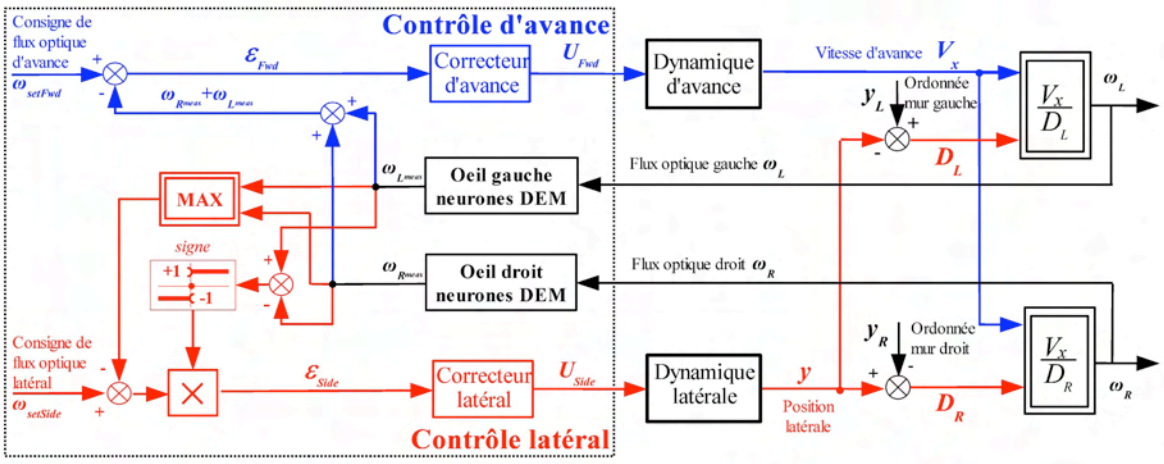

Fig. IV.2.4. Schéma blocs du contrôle des vitesses d'avance V_x et latérale V_y de l'abeille le long du corridor (pour $|\Psi|$ <15°). Les vitesses d'avance et latérale sont des variables indépendantes. Le *régulateur dual de flux optique* est basé sur deux boucles de rétroaction entrelacées travaillant en parallèle, chacune ayant sa propre consigne de flux optique et son propre degré de liberté contrôlé. Le contrôle d'avance (boucle bleue) ajuste la force propulsive de l'abeille (donc sa vitesse d'avance) sur la base de la *somme* des flux optiques latéraux ($\omega_{Lmeas}+\omega_{Rmeas}$), qui est comparée à une consigne de flux optique d'avance ω_{setFwd}. Le contrôleur d'avance pilote la dynamique d'avance afin de minimiser l'erreur ε_{Fwd}. Le contrôle latéral (boucle rouge) ajuste la force latérale de l'abeille (donc sa vitesse latérale) sur la base du *maximum* des deux flux optiques latéraux. Un critère de maximum est utilisé pour sélectionner le flux optique latéral le plus grand des deux. Le flux optique sélectionné est alors comparé à une consigne de flux optique latéral $\omega_{setSide}$. Le contrôleur latéral pilote la dynamique latérale afin de minimiser l'erreurε_{Side}. La direction d'évitement d'obstacles est calculée par une fonction *signe* (signe de la différence des flux optiques latéraux mesurés). (d'après Serres et al., 2008)

dans la boucle rouge sur la Fig. IV.2.4) détermine le signe de la différence des flux optiques latéraux mesurés (ω_{Lmeas} et ω_{Rmeas}) et sélectionne automatiquement le mur qui sera pris en compte par le régulateur de flux optique latéral.

Le signal d'erreur ε_{Side} (Eq. IV.2.4.C) commande le système moteur contrôlant la poussée latérale générée par le battement d'ailes (voir **III.3.5.**). En conséquence, l'abeille réagira aux variations de flux optique *unilatéral* en ajustant sa poussée latérale, déterminant sa vitesse latérale V_y, et partant, son ordonnée (l'ordonnée y étant liée de manière naturelle à la vitesse latérale V_y en rouge sur la Fig. IV.2.4).

$$\varepsilon_{Side} = sign(\omega_{Lmeas} - \omega_{Rmeas}) \times (\omega_{setSide} - max(\omega_{Lmeas}, \omega_{Rmeas})) \qquad \text{Equation IV.2.4.C}$$

La fonction *signe* de l'Eq. IV.2.4.C a été choisie pour sa simplicité, mais elle pourrait être remplacée par un critère plus complexe. Sur quelques trajectoires en effet (e.g., Fig. IV.2.2.3.B.(c)), nous observons que le mur suivi n'est pas nécessairement le plus proche. Le déclenchement d'un changement de *signe* pourrait impliquer, par exemple, un comparateur de type « seuils à hystérésis » appliqué à la différence des flux optiques latéraux, plutôt qu'un simple comparateur à zéro.

IV.2.4.3. *Point de fonctionnement des régulateurs en régime permanent*

Ainsi donc, pour rendre compte des comportements observés chez l'abeille, nous avons imaginé deux régulateurs de flux optique fortement interdépendants. Selon notre hypothèse, le contrôle de vitesse et l'évitement d'obstacles latéraux impliqueraient au total deux régulateurs de flux optique latéral fortement entrelacés, dont le mérite est de pouvoir générer des trajectoires ne dépendant que de *deux paramètres* : une consigne de flux optique *bilatéral* (ω_{setFwd}) et une consigne de flux *unilatéral* ($\omega_{setSide}$). On peut alors prédire, à partir des Eqs. IV.2.4.5.A, que l'abeille atteindra en régime permanent un *point de fonctionnement*, défini par une certaine vitesse $V_{x\infty}$ et une certaine position latérale y_∞.

$$\left\{\begin{array}{l}\omega_{setFwd} = \omega_{R\infty} + \omega_{L\infty} \\ \omega_{setSide} = \omega_{R\infty}\end{array}\right\} \Leftrightarrow \left\{\begin{array}{l}\omega_{setFwd} = \dfrac{V_{x\infty}}{D_{R\infty}} + \dfrac{V_{x\infty}}{D_{L\infty}} \\ \omega_{setSide} = \dfrac{V_{x\infty}}{D_{R\infty}}\end{array}\right\}$$

Equation IV.2.4.3.A1

Equation IV.2.4.3.A2

D'où l'on déduit, le point de fonctionnement ($V_{x\infty}$; y_∞) à partir des deux consignes de flux optique :

$$V_{x\infty} = \frac{\omega_{setSide} \cdot (\omega_{setFwd} - \omega_{setSide})}{\omega_{setFwd}} \cdot D \qquad \text{Equation IV.2.4.3.B1}$$

$$y_\infty = D_{R\infty} = \frac{(\omega_{setFwd} - \omega_{setSide})}{\omega_{setFwd}} \cdot D \qquad \text{Equation IV.2.4.3.B2}$$

$$D = D_{R\infty} + D_{L\infty} \quad avec\ D = largeur\ du\ corridor \qquad \text{Equation IV.2.4.3.B3}$$

La conclusion remarquable est que, pour une largeur de corridor D donnée, deux uniques paramètres suffisent à définir un point de fonctionnement de l'abeille, tant en vitesse qu'en position, *alors même que l'abeille n'a eu à mesurer ni sa vitesse, ni sa position, ni la largeur du corridor*. Par exemple, l'abeille atteindrait le point de fonctionnement ($V_{x\infty}$ = 0,88 m/s ; y_∞ =0,24 m) de la condition C (Tab. IV.2.2.1) avec l'unique couple de consignes de flux optique : ω_{setFwd} = 281 °/s et $\omega_{setSide}$ = 210 °/s (largeur : D = 0,95 m). Et ce même couple de consignes donnerait sensiblement les points de fonctionnement correspondant aux conditions A, B, et D (Tab. IV.2.2.1).

On peut avec avantage représenter ce point de fonctionnement en faisant appel à l'ordonnée réduite y/D (Eqs. IV.2.4.3.C). L'ensemble des points de fonctionnement de chacun des deux régulateurs de flux optique dans le plan (V_x; y/D) fait apparaître le point de fonctionnement commun aux deux (Fig. IV.2.4.3).

$$\begin{cases} V_x = \omega_{setFwd} \cdot D \cdot \left(\frac{y}{D} \cdot \left(1 - \frac{y}{D}\right)\right) \\ V_x = \omega_{setSide} \cdot D \cdot \left(\frac{y}{D}\right) \end{cases}$$

Equation IV.2.4.3.C1

Equation IV.2.4.3.C2

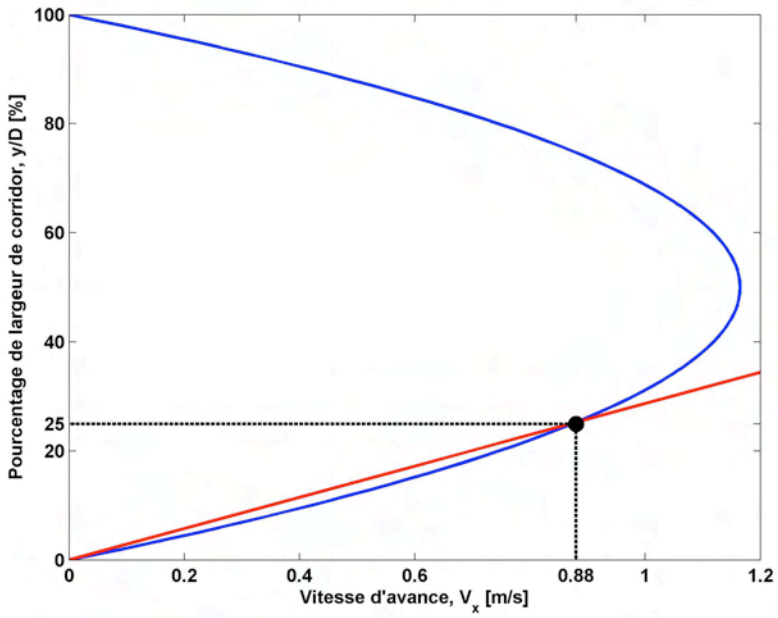

Fig. IV.2.4.3. Point de fonctionnement du régulateur dual de flux optique pour le couple de consignes (ω_{setFwd} = 281°/s et $\omega_{setSide}$ = 210°/s) correspondant à la condition C (Tab. IV.2.2.1). La parabole bleue représente l'ensemble des points de fonctionnement propres à l'Eq. IV.2.4.3.C1 correspondant au régulateur de flux optique bilatéral (contrôle de vitesse en bleue sur la Fig. IV.2.4). La droite rouge représente l'ensemble des points de fonctionnement propres à l'Eq. IV.2.4.3.C2 correspondant au régulateur de flux optique unilatéral (contrôle latéral en rouge sur la Fig. IV.2.4). Le point noir (V_x = 0,88 m/s ; y/D = 25%) correspond au point de fonctionnement stable commun aux deux régulateurs de flux optique latéral entrelacés de la Fig. IV.2.4.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons construit un nouveau protocole expérimental basé sur un corridor élargi (près de 10 fois plus large que ceux utilisés par d'autres auteurs). Nos expériences comportementales ont alors montré que l'abeille ne se centrait pas nécessairement dans un large corridor et qu'elle pouvait aussi suivre une paroi. Lorsque l'entrée et la récompense sont positionnées près d'un même mur, l'abeille adopte un comportement de *suivi de paroi*. Cette étude comportementale nous permet ainsi de remettre en cause l'*hypothèse d'équilibrage des flux optiques latéraux* et d'attribuer à l'abeille une nouvelle capacité visuo-motrice : le *suivi de paroi*. Par ailleurs, aucune boucle visuo-motrice explicitée à ce jour ne permet d'expliquer un tel comportement (Chapitre **III**).

A partir de l'hypothèse de *régulation* du flux optique *unilatéral*, nous avons construit un schéma de contrôle basé seulement sur la vision du mouvement rendant compte explicitement de la manière dont une abeille pourrait contrôler sa vitesse d'avance et sa distance aux murs. Ce schéma se décompose en deux boucles visuo-motrices interdépendentes, auxquelles nous avons donné le nom de « *régulateur dual de flux optique* » :

(i) Le premier régulateur de flux optique contrôle la poussée d'avance de l'abeille (déterminant sa vitesse d'avance) sur la base de la somme des flux optiques latéraux. Ce régulateur s'efforce donc de maintenir la somme des flux optiques (droit+gauche) constante et égale à une *consigne de flux optique bilatéral* $\omega_{setFwd} \approx 300°/s$. L'abeille volera d'autant plus rapidement que l'environnement sera moins encombré.

(ii) Le second régulateur de flux optique contrôle la poussée latérale de l'abeille (déterminant sa vitesse latérale puis son positionnement latéral), et conserve la distance latérale au mur gauche (ou droit) proportionnelle à la vitesse d'avance déterminée en (i). Ce second régulateur s'efforce de maintenir le flux optique unilatéral constant et égal à une *consigne de flux optique unilatéral* $\omega_{setSide}$ dont on a montré chez l'abeille qu'elle pouvait se situer entre ~150°/s et ~280°/s. L'abeille s'éloignera d'autant plus du mur qu'elle volera rapidement.

En association avec le *régulateur de flux optique ventral* ajustant la poussée verticale (Ruffier et Franceschini, 2005 ; Franceschini et al., 2007), le principe de régulation de flux optique décrit dans ce chapitre apparaît comme un système de contrôle générique qui rend compte d'un nombre

important de comportements guidés visuellement chez l'abeille. Chacun des trois régulateurs de flux optique serait en charge d'un des trois degrés de liberté en translation de l'insecte (x,y,z). La valeur du principe établi ici est que ni la vitesse, ni la distance aux obstacles, n'ont besoin d'être mesurées par l'animal. Il n'y a donc aucunement de *régulateur de vitesse* ou de *régulateur de distance*. La seule variable qui soit régulée est le flux optique, qui n'est autre que le quotient vitesse/distance. Réguler ce quotient, c'est-à-dire le maintenir constant et égal à une consigne, c'est ce qui est réalisé au moyen des deux boucles visuo-motrices imbriquées d'où émergent automatiquement :

- un contrôle de vitesse (voir Chapitre **IV.2.4.1**, page 95)

- un évitement d'obstacles dans le plan horizontal (voir **IV.2** page 79, et modélisé au chapitre **V**) et dans le plan vertical (voir **IV.1** page 73, Ruffier et Franceschini, 2005 ; Franceschini et al., 2007).

Le seul capteur exigé est un capteur de flux optique, et l'on sait que certains neurones (dit VT) existent à bord de l'abeille pour jouer ce rôle. Le schéma de régulation du flux optique est si explicite qu'il peut être testé en simulation (Chapitre **V**). En se focalisant sur le guidage visuel dans le plan horizontal, nous avons développé un *insecte artificiel* équipé du *régulateur dual de flux optique* décrit dans ce chapitre et de deux yeux latéraux intégrant des neurones détecteurs de mouvement bio-inspirés, qui mesurent le flux optique avec la même (médiocre) résolution angulaire que celle d'un oeil composé d'abeille. Ce système de contrôle est dénommé **LORA III** (pour *Lateral Optic flow Regulation Autopilot*, i.e., *pilote Automatique de Régulation du flux Optique Latéral*, version 3). Nous établirons au chapitre **V** que **LORA III** à lui seul fait générer à notre *insecte artificiel* des comportements étonnamment semblables à ceux observés par divers auteurs sur des abeilles volant librement dans divers types de corridors. Ces comportements comprennent : (i) le contrôle de vitesse (voir **III.3.3.**), (ii) le suivi de paroi (voir **IV.2.**), (iii) le centrage dans des corridors rectilignes ou fuselés (voir **III.3.2.** et **III.3.3.**), (iv) la réaction à une ouverture latérale (voir **IV.2.**). Cela suggère qu'un schéma de contrôle aussi simple que celui-ci pourrait être implanté dans le système nerveux central de l'abeille. Ce système de contrôle nécessite d'ailleurs peu de ressources sensorielles et neuronales, ce qui les rend compatibles avec les limitations draconiennes imposées par un cerveau de moins d'un milligramme.

Chapitre V.
Modélisation et simulation de la boucle visuo-motrice LORA

« Y a t-il un pilote dans l'insecte ? »

N. Franceschini (2007)

Résumé.....104

V.1. Simulation numérique du modèle.....105

V.1.1. Simulation numérique d'environnements stationnaire et non-stationnaire.....105

V.1.2. Organisation séquentielle de la simulation LORA.....107

V.1.3. Simulation numérique d'une sortie photoréceptrice.....111

V.1.4. Simulation numérique des traitements DEM.....113

V.2. Modélisation de la boucle visuo-motrice LORA III.....114

V.2.1. De la régulation du flux optique ventral à la régulation du flux optique latéral.....114

V.2.2. Avantages/inconvénients de la boucle visuo-motrice LORA I.....116

V.2.3. Avantages/inconvénients de la boucle visuo-motrice LORA II.....118

V.2.4. La boucle visuo-motrice LORA III.....119

V.2.4.1. Modèle dynamique de l'aéroglisseur totalement actionné.....119

V.2.4.2. Signaux d'erreur des deux régulateurs de flux optique latéral.....121

V.2.4.3. Synthèse des correcteurs d'avance et latéral.....121

V.2.4.4. Positionnement latéral automatique dans un corridor rectiligne.....123

V.2.4.5. Réaction automatique à une ouverture.....127

V.2.4.6. Réaction automatique à une perturbation en échelon de flux optique.....128

V.2.4.7. Décélération et accélération automatiques dans un corridor fuselé.....131

V.3. Simulation d'un modèle visuo-moteur d'abeille.....135

V.3.1. Simulation d'un suivi de paroi fixe.....136

V.3.2. Simulation d'un suivi de paroi mobile.....137

V.4. Intégrabilité de la boucle visuo-motrice LORA III sur FPGA.....139

V.4.1. Flot de conception sur cible FPGA.....139

V.4.2. Organisation de la carte LORA 140

V.4.3. Résultats de co-simulation matériel/logiciel.....142

V.4.3.1. Suivi automatique de paroi.....142

V.4.3.2. Réaction automatique à une ouverture.....143

V.4.3.3. Contrôle automatique de la vitesse dans un corridor fuselé.....144

Conclusion.....145

Résumé

*Ce chapitre établit une modélisation du comportement d'agents simulés (abeille ou robot) par des processus décrits sous forme de schémas fonctionnels. L'étude et la ré-interprétation de travaux antérieurs, ainsi que l'analyse de nouvelles données biologiques décrites dans le chapitre **IV**, nous ont permis d'élaborer un schéma-bloc explicite, incluant deux boucles visuo-motrices, dénommé **LORA** (LORA pour Lateral Optic flow Regulation Autopilot). Les simulations nous ont permis de tester des agents simulés équipés de LORA dans des corridors semblables en tous points à ceux utilisés lors des études éthologiques préalables (Chapitres **III** et **IV**). La construction du pilote automatique **LORA** s'est opérée en trois stades, de **LORA I** à **LORA III**, permettant au fur et à mesure d'en apprécier les points forts ou les faiblesses. Pour terminer, nous montrons qu'une boucle visuo-motrice de type **LORA III** pourrait tout bien être mise en jeu dans le système nerveux de l'abeille, car un agent simulé équipé de **LORA III** génère des trajectoires étonnemment semblables à celles enregistrées sur nos abeilles en vol libre.*

Chapitre V.
Modélisation et simulation de la boucle visuo-motrice LORA

V.1. *Simulation numérique du modèle*

La simulation a été exécutée sur un PC standard équipé d'un processeur de 2,60 GHz (RAM 512Mo). Elle a été écrite au moyen du logiciel *Matlab*™ (Version 7.0.1, R14SP1) et de la boîte à outils *Simulink* (*The Mathworks*™, Version 6.1) qui permet de développer des simulations sous forme de schéma-blocs. Cet environnement de simulation est particulièrement adapté au prototypage rapide de boucles de contrôle. Les schéma-blocs ainsi obtenus peuvent être, soit directement utilisés pour générer du code en langage C en vue d'une implantation sur cible matérielle de type microcontrôleur, soit traduits à l'aide de blocs configurables 'IP' disponibles dans la boîte à outils *System Generator for DSP* (*Xilinx*™). Cette boîte à outils permet alors de générer du code en langage VHDL, qui peut être directement implanté sur une cible matérielle de type FPGA.

V.1.1. *Simulation numérique d'environnements stationnaire et non-stationnaire*

La simulation de la boucle visuo-motrice LORA repose sur celle de la boucle visuo-motrice OCTAVE (Ruffier, 2004, Chapitre VI). Le circuit DEM simulé pour OCTAVE a été, dans sa globalité, réutilisé comme une boîte noire pour la simulation LORA. De nombreuses améliorations ont toutefois été apportées par rapport à la simulation initiale :

- La position angulaire φ_i du bord contrasté en (x_i, y_i) dans le champ visuel est calculé sur 360° par la commande arctangente quatre quadrants : ϕ_i = `atan2(`x_i`,`y_i`)`, au lieu de l'être sur un champ visuel de 180°.

- Les agents simulés peuvent évoluer dans des environnements stationnaires de type labyrinthe en deux dimensions (2D), au lieu d'évoluer simplement au dessus d'un plan dans un environnement à une dimension (1D). Cette fonctionnalité est écrite au moyen d'une *S-function* `PHI_SF.m` qui calcule à chaque pas d'échantillonnage ($T_{ech_PHI_SF}$ = 1ms) l'état des sorties photodiodes en fonction de la position de l'agent dans l'environnement.

- Un algorithme de tri des positions angulaires des bords contrastés a été développé par D.

Dray durant son projet de fin d'études (Dray, 2006). Cet algorithme filtre tous les phénomènes d'occlusion rencontrés dans un environnement de type labyrinthe. Il en existe de deux natures : l'un, dit de *chevauchement* de deux éléments contrastés et l'autre, dit d'*éclipse totale* d'un élément contrasté (Dray, 2006, page 46). L'environnement étant décrit par une variable globale non dynamique, seul le cas dit d'*éclipse partielle* n'est pas pris en charge, ce qui nécessiterait de scinder en deux un élément constrasté du fait qu'il soit masqué en partie par un autre. Ce dernier cas de figure pourrait se produire dans des environnements de type « forêt d'obstacles » – non considérés ici.

- Les environnements peuvent être stationnaires ou non-stationnaires, c'est-à-dire que les murs du labyrinthe pourront être immobiles ou mobiles pour tester les agents simulés en présence de mouvements relatifs (Dray, 2006, page 41-43). Cette fonctionnalité met à jour à chaque pas de calcul la matrice `environnement.mat` au moyen d'un vecteur d'état dit de mouvement cyclique `mouv_cyclique.mat`.

- Pour simplifier l'interprétation des résultats de la simulation, une fonctionnalité de visualisation en temps réel a été incorporée à la simulation par l'ajout d'une *S-function* `plot_SF.m`, dont la finalité est de représenter graphiquement l'évolution de l'agent dans l'environnement simulé toutes les $T_{ech_PLOT_SF}$ =50ms (Dray, 2006).

V.1.2. *Organisation séquentielle de la simulation LORA*

Pour décrire l'organisation séquentielle de la simulation LORA, les traitements numériques ont été décomposés en six phases, notées de A à F (Fig. V.1.2.A), et explicitées à la Fig. V.1.2.C. Les phases A et B requièrent un traitement plus complexe, dit spatio-temporel. C'est la raison pour laquelle elles sont écrites au moyen d'un bloc *S-function* de *Simulink*™ (Ruffier, 2004), tandis que les phases C à F nécessitent seulement des traitements temporels.

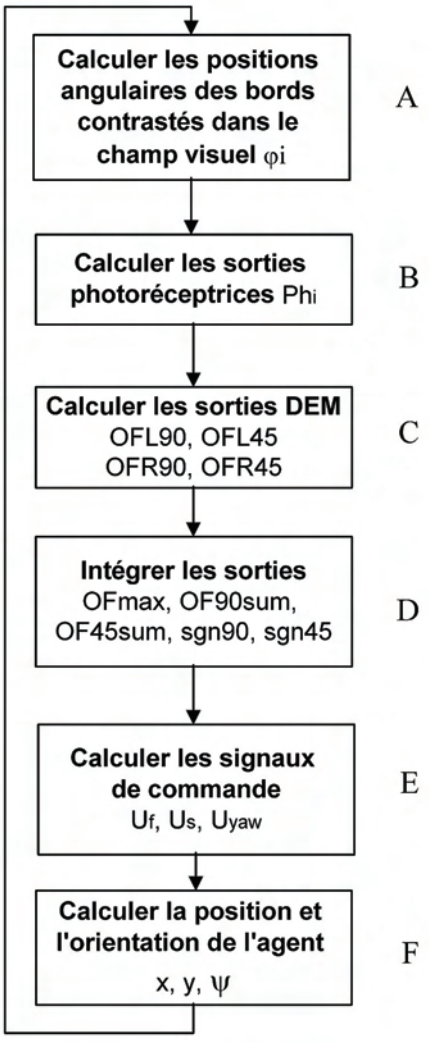

Fig. V.1.2.A. Les six phases de la simulation LORA

Phase A : Calcul des positions angulaires φ_i des éléments contrastés dans le plan horizontal en tenant compte de la position et de l'orientation actuelles de l'agent simulé, des spécificités de son système visuel (*Etape 1* du traitement DEM, paragraphe **VI.3.1.**) et des éléments contrastés (éventuellement mobiles) présents dans son champ visuel. La méthode employée pour simuler des environnements non-stationnaires est décrite en détail dans le rapport du projet de fin d'études de D. Dray (Dray, 2006).

Phase B : Calcul des sorties photoréceptrices Ph_i. Le champ visuel photorécepteur étant de forme gausienne, on applique à chaque luminance présente dans ce champ une pondération de type gaussien (*Etape 2* du traitement DEM, paragraphe **VI.3.1.**). La photoconduction est ensuite linéaire (*Etape 3* du traitement DEM, paragraphe **VI.3.1.**).

Phase C : Calcul des sorties des circuits électroniques de traitement DEM. Il existe ensuite de part et d'autre de l'agent deux capteurs de flux optique mesurant le flux optique latéral, à 90° et à 45° de l'axe de l'agent – capteurs OFR90 et OFR45 à tribord, capteurs OFL90 et OFL45 à babord – (*Etapes 4 à 9* du traitement DEM, paragraphe **VI.3.1.**).

Phase D : Calcul des sorties sensorielles de plus haut niveau nécessaires à l'élaboration des lois de contrôle visuo-moteur :

Signal de rétroaction du contrôle latéral : OFmax = max(OFR90,OFL90),
Signal de direction latérale à suivre : sgn90 = signe(OFL90-OFR90),
Signal de rétroaction du contrôle d'avance : OF90sum = OFR90+OFL90,
Signal de détection de collision frontale : OF45sum = OFR45+OFL45,
Signal de direction frontale à éviter : sgn45 = signe(OFL45-OFR45).

Phase E : Elaboration des signaux de commandes d'avance U_f, latérale U_s, et de rotation en lacet U_{yaw} en fonction des signaux issus de l'intégration visuelle. On a la possibilité d'incorporer un modèle physique de capteur inertiel pour mesurer la vitesse de rotation en lacet de l'agent (Fig. V.1.2.C). Le gyromètre simulé est idéalisé (gain unitaire) pour les deux raisons suivantes : (1) le gyromètre réel présente une large bande passante (40 Hz) ~20 fois supérieure à la bande passante de la dynamique en lacet du robot LORA, (2) le robot sera également équipé d'un micro compas magnétique pour stabiliser son cap.

Phase F : Calcul de la position (x, y) et de l'orientation Ψ de l'agent simulé en intégrant les vitesses d'avance V_f, latérale V_s, et de lacet $d\Psi/dt$ en tenant compte des dynamiques du système simulé (Eqs. V.1). Les dynamiques du système simulé incorporent l'inertie du robot, les forces d'inertie (Coriolis), et les forces de frottement visqueux (Eqs. V.1). La vitesse maximale de la plate-forme robotisée étant de quelques mètres par seconde, un modèle linéarisé permet de tester efficacement les évolutions du pilote automatique LORA sous diverses configurations environnementales.

De plus, comme les actionneurs équipant le robot réel possèdent des constantes de temps ~100 fois plus faibles que celles du robot lui-même, on considère que les forces appliquées sont

proportionnelles aux signaux de commande (Eqs. V.1).

$$m.\frac{d\dot{V}_f}{dt} - 2\cdot m\cdot V_s\cdot\dot{\Psi} + \zeta_f\cdot V_f = K_T\cdot U_f \qquad \text{Equation V.1.A}$$

$$m.\frac{d\dot{V}_s}{dt} + 2\cdot m\cdot V_f\cdot\dot{\Psi} + \zeta_s\cdot V_s = K_T\cdot U_s \qquad \text{Equation V.1.B}$$

$$J.\frac{d\dot{\Psi}}{dt} + 0 + \zeta_\Psi\cdot\dot{\Psi} = r\cdot K_T\cdot U_\Psi \qquad \text{Equation V.1.C}$$

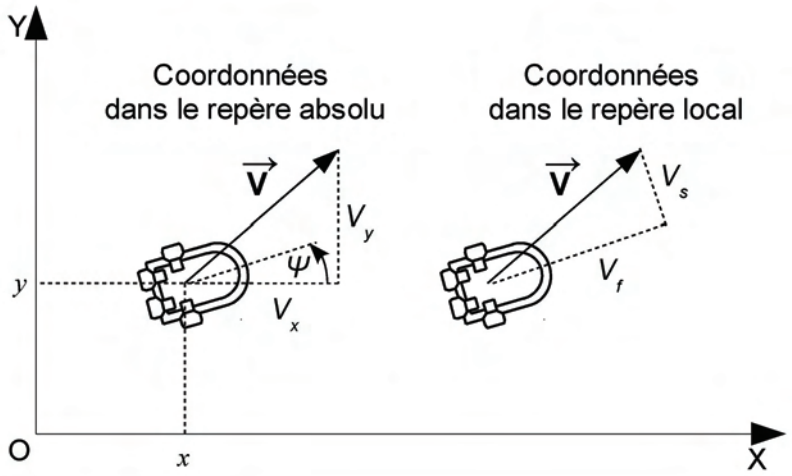

Fig. V.1.2.B. Coordonnées du vecteur vitesse V selon le repère de projection.

La position (x, y) et l'orientation Ψ de l'agent mobile sont calculées en intégrant les coordonnées des vecteurs vitesses dans le repère global (Fig. V.1.2.B et Eqs. V.2), alors que l'agent mobile se pilote lui-même dans le repère local (égocentrique). C'est la raison pour laquelle, le vecteur vitesse V dans le repère global fait intervenir la rotation plane d'angle Ψ (Eqs. V.2).

$$\dot{x} = V_f\cdot\cos\Psi - V_s\cdot\sin\Psi \qquad \text{Equation V.2.A}$$

$$\dot{y} = V_f\cdot\sin\Psi + V_s\cdot\cos\Psi \qquad \text{Equation V.2.B}$$

$$\dot{\Psi} = \frac{d\Psi}{dt} \qquad \text{Equation V.2.C}$$

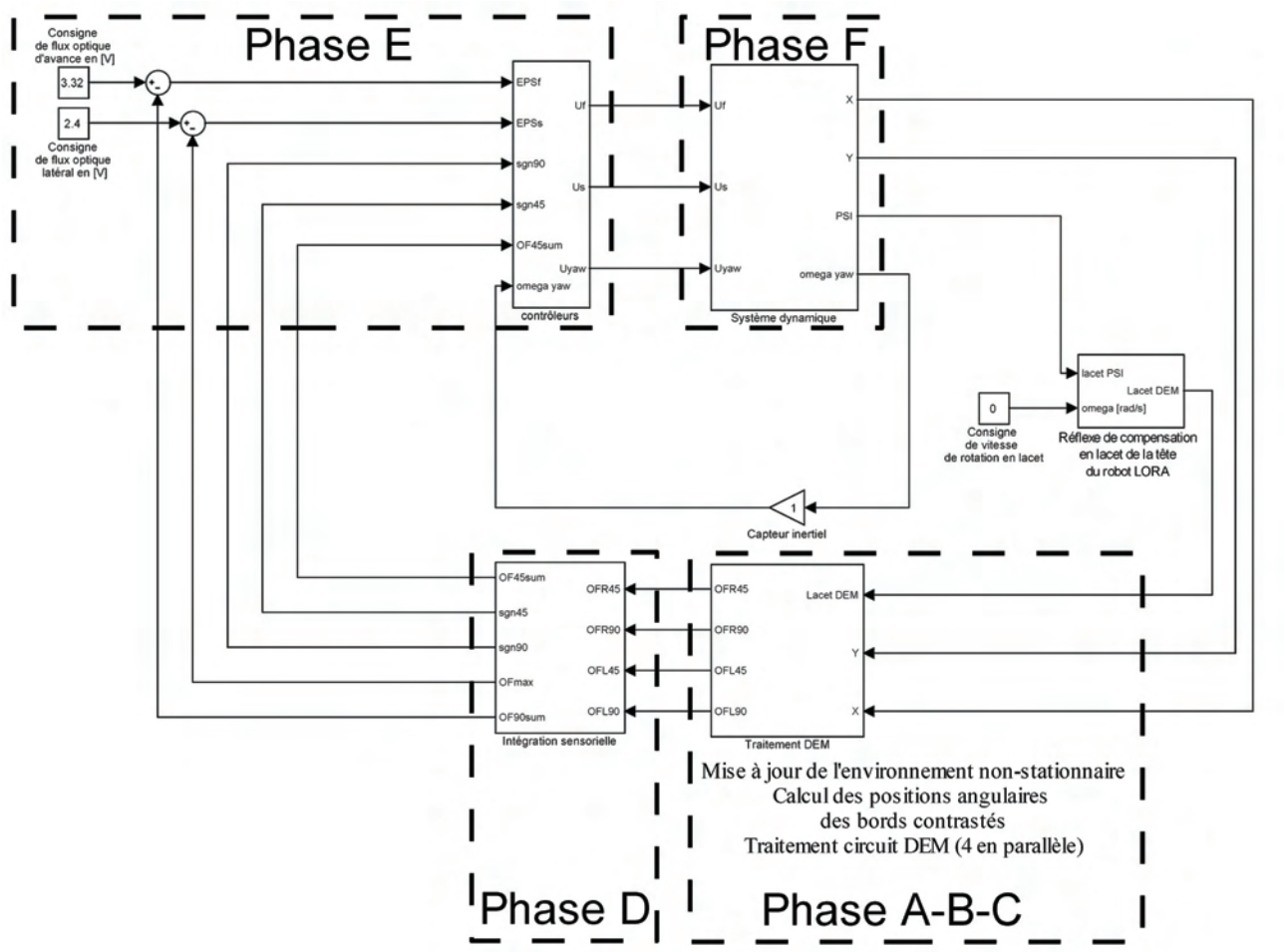

Fig. V.1.2.C. Schéma *Simulink* de la boucle visuo-motrice LORA, avec la décomposition des phases A à F. Pour la décomposition des phases A et B, voir Ruffier (2004, page 127). Conjointement développée avec le robot réel LORA, la simulation LORA peut intégrer un modèle physique de capteur inertiel ou encore des fonctions plus avancées, telles qu'un réflexe de compensation en lacet de la tête du robot.

V.1.3. *Simulation numérique d'une sortie photoréceptrice*

Un détecteur élémentaire de mouvement (DEM) mesure le flux optique dans *une direction privilégiée*, c'est la raison pour laquelle les textures tapissant les murs du labyrinthe sont des bandes verticales en niveau de gris (Fig. V.1.3.A.(a)), qui sont des textures à *une dimension* (1D). Le calcul de la contribution de chaque élément contrasté (Fig. V.1.3.A.(a)) au signal photorécepteur est réalisé en intégrant par morceaux (Fig. V.1.3.A.(b)) la sensibilité angulaire gaussienne du photorécepteur dans le plan (dont la base est tronquée à 1%). En appelant $\Delta\rho$ la largeur à mi-hauteur de la gaussienne, la largeur angulaire du champ visuel d'un photorécepteur est de $2{,}6\cdot\Delta\rho$. La sortie du photorécepteur Ph_φ détectant dans une direction azimutale d'angle φ s'écrit :

$$Ph_\varphi = \int_0^{2\cdot\pi} I(\theta)\cdot A(\theta)\cdot d\theta = \int_{\varphi-1{,}3\cdot\Delta\rho}^{\varphi+1{,}3\cdot\Delta\rho} I(\theta)\cdot A(\theta)\cdot d\theta = \sum_{n=1}^{N} I_n \cdot A(\theta_{1,n},\theta_{2,n}) \qquad \text{Equation V.3.}$$

Avec :

I_n le niveau de gris de l'élément n (blanc : $I_n = 1$, noir $I_n = 0$),

$\theta_{1,n}$ et $\theta_{2,n}$ les deux angles de visée de l'élément n,

A matrice estimant l'intégrale de la sensibilité gaussienne entre deux angles (Fig. V.1.2.A.(b))

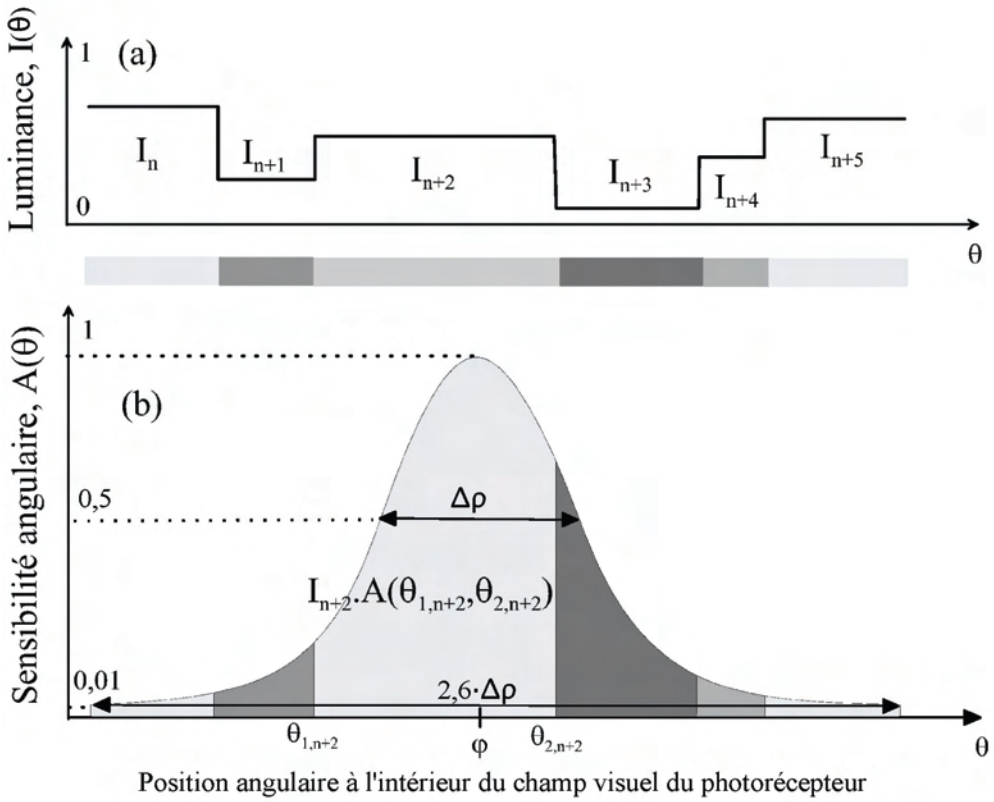

Fig. V.1.3.A. (a) Fonction continue par morceaux de la luminance perçue à un instant donné par un photorécepteur.
(b) La sortie photorécepteur est calculée en intégrant par morceaux diverses luminances présentes dans son champ visuel et les pondérant par la sensibilité angulaire gaussienne (Eq. V.3). (D'après Ruffier, 2004)

Pour optimiser la phase B de la simulation, les calculs estimant l'intégrale de la sensibilité gaussienne entre les deux angles d'un élément de contraste se font au moyen d'une table de correspondance (matrice *A*, voir Fig. V.1.3.B) ; ceci permet de gagner en temps de calcul au prix d'une mémoire RAM plus restreinte. La précision spatiale de la simulation dépend donc de la résolution angulaire de la matrice *A* (Fig. V.1.3.B) qui a été pré-calculée avec un pas angulaire de $\delta\theta = 0{,}005°$. La taille de la matrice *A* (Fig. V.1.3.B) dépend de la largeur à mi-hauteur $\Delta\rho$ de la sensibilité gaussienne A. Pour $\Delta\rho=4°$, dim(A) = 2077x2077, ce qui réprésente 32,9 Mo codé en format *double* sur 8 octets. La précision des calculs est alors de $\delta\theta/\Delta\rho = 1‰$.

Cette méthode de programmation est simple à mettre en oeuvre pour des yeux composés présentant un nombre minimaliste de facettes (ici, 4 facettes) dans le but de tester des boucles visuo-motrices sous diverses configurations environnementales. Elle présente toutefois deux inconvénients majeurs :

1) pour des $\Delta\rho$ plus faibles, c'est-à-dire pour les facettes situées vers les régions frontales, la précision angulaire des calculs se dégrade ($\delta\theta/\Delta\rho = 2‰$ pour $\Delta\rho=2{,}6°$).

2) chaque type de facette nécessitera une matrice *A* qui lui est propre ($\Delta\rho$ variant d'une facette à l'autre). Pour notre système visuel à deux facettes distinctes ($\Delta\rho = 4°$ et $2{,}6°$), cela représente une mémoire RAM assez considérable (46,8 Mo, soit 11% des ressources RAM du PC).

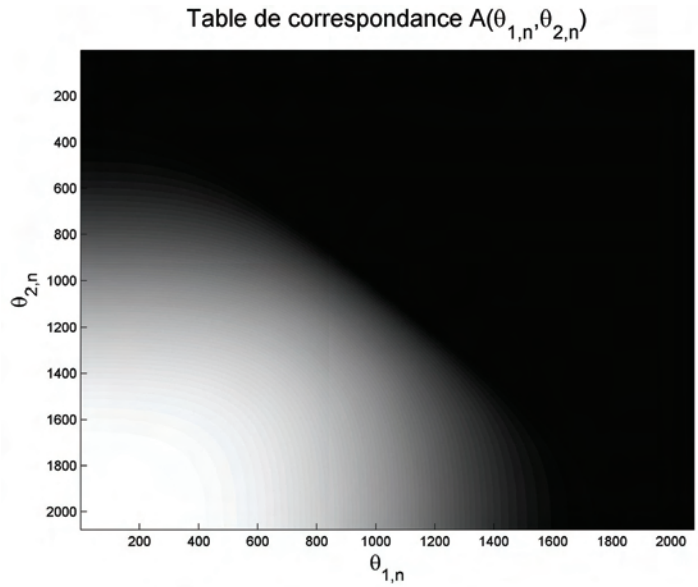

Fig. V.1.3.B. Matrice $A_{i,j}$ pour $\Delta\rho = 4°$ (de taille 2077x2077) avec une résolution angulaire de $\delta\theta = 0{,}005°$. La matrice *A* est triangulaire inférieure avec $0 \leq (a_{i,j}) \leq 1$.

V.1.4. *Simulation numérique des traitements DEM*

Le circuit électronique *détecteur élémentaire de mouvement* (DEM) simulé est le même utilisé pour la simulation d'OCTAVE (Ruffier, 2004). Ce circuit se comporte comme une boîte noire vis-à-vis de la simulation LORA. Facile à manipuler sous *Simulink*™, le schéma-bloc du circuit DEM a été simplement quadruplé (Fig. V.1.2.C). Ce circuit DEM est une version simulée du DEM mixte basé sur un microcontrôleur travaillant à une fréquence d'échantillonnage de 1 kHz (Ruffier, 2004; voir paragraphe **VI.3.**). Pour obtenir la précision temporelle requise, le pas de la simulation est fixé à $\delta t = 0{,}001$ s.

La Figure V.1.4 montre la courbe de réponse des circuits DEM simulés (en volts) en fonction du flux optique (en °/s). Le flux optique mesuré est une fonction monotone croissante du flux optique réel sur une plage d'environ une décade de flux optique. La courbe de réponse du DEM est non-linéaire du fait de la fonction d'approximation du flux optique introduite dans le circuit DEM (voir paragraphe **VI.3.1**). On retrouve l'effet néfaste de la période d'échantillonnage temporelle sur l'estimation du flux optique pour les fortes valeurs de flux optique (voir aussi le paragraphe **VI.3.**).

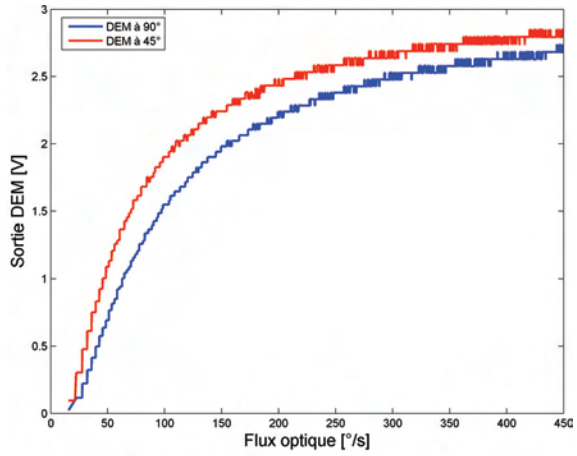

Fig. V.1.4. Courbes de réponse des circuits DEM simulés pour les axes de regard purement latéraux à φ=±90° ($\Delta\varphi$=3,5° et $\Delta\rho$=3,8°) et les axes de regard fronto-latéraux à φ=±45° ($\Delta\varphi$=2,5° et $\Delta\rho$=2,6°) en fixant les paramètres du circuit DEM de la façon suivante : tension d'alimentation U = 3,5 V, constante de temps τ = 0,05 s. (Dray, 2006)

V.2. *Modélisation de la boucle visuo-motrice LORA III*

V.2.1. *De la régulation du flux optique ventral à la régulation du flux optique latéral*

La simulation de la boucle visuo-motrice **LORA I** s'est développée en partant de l'idée que celle-ci allait être implanté sur une plate-forme robotisée de type aéroglisseur miniature *sous-actionné*. La simulation numérique décrite au **V.1.** permet de simuler un oeil composé minimaliste à quatre facettes. Nous montrerons dans ce chapitre que seules deux facettes sont nécessaires à la mise en oeuvre de LORA sur un robot pour lui faire faire un suivi de corridor. Les deux autres (fronto-latérales) seront destinées à la mise en oeuvre future d'un système d'évitement d'obstacle frontal.

La conception des boucles visuo-motrices **LORA I** à **III** s'inspire en partie de la boucle visuo-motrice OCTAVE conçue initialement pour effectuer des tâches telles que le suivi de terrain d'un micro-aéronef. Le choix du degré de liberté actionné avait été conditionné par la nature même de la plate-forme robotisée, qui consistait initialement en un aéroglisseur miniature *sous-actionné*. Ses déplacements latéraux ne pouvaint donc résulter que d'un couplage cinématique entre sa vitesse d'avance V et son angle de lacet Ψ, produisant une vitesse latérale $V_y = V \cdot \cos\Psi$.
Le principe de **LORA I** repose sur *une régulation du flux optique unilatéral* commandant le *couple de lacet*, la vitesse étant supposée constante (V= 1 m/s) (Serres et al., 2005, 2006b), alors que le principe de guidage visuel d'OCTAVE reposait sur *une régulation du flux optique ventral* commandant la *poussée verticale* (Ruffier, 2004; Ruffier et Franceschini, 2005; Franceschini et al., 2007)

Pour mémoire, lorsque le robot OCTAVE vole à vitesse d'avance constante, la consigne de flux optique *ventral* ω_{setV} donne le coefficient de proportionnalité entre vitesse sol V_x et hauteur sol h. Ainsi, maintenir un flux optique *ventral* mesuré ω_{Vmes} constant conduit à élaborer une erreur de flux optique *ventral* ε_V telle que $\varepsilon_V = -(\omega_{setV} - \omega_{Vmes})$, avec un gain (**-1**) compensant la sensibilité négative du flux optique *ventral* ω_V par rapport à la hauteur sol ($\partial\omega_V/\partial h = -\omega_V/h$) (Fig. IV.1.B.).

Dans le cas présent, lorsque le robot **LORA I** vole à vitesse d'avance constante, en boucle ouverte, la consigne de flux optique *latéral* $\omega_{setSide}$ donne le coefficient de proportionnalité entre vitesse d'avance V_x et distance au mur (droite : D_R, ou gauche : D_L). Pour éviter les murs d'un corridor, le régulateur de flux optique *latéral* doit élaborer une erreur de flux optique *latéral* ε_{Side}, qui doit simultanément prendre en compte les deux flux optiques latéraux mesurés à droite, ω_{Rmeas} et à

gauche ω_{Lmeas}, pour éviter, soit le mur de droite, soit celui de gauche. Le signe de la contre-réaction, donc celui de l'erreur ε_{Side}, dépendra du mur à suivre. Lorsque le robot se déplace vers l'avant dans le plan horizontal, le sens positif (i.e., trigonométrique) se situe à gauche et le sens négatif à droite. Une situation similaire au suivi de terrain du robot OCTAVE lorsque celui-ci se déplaçait vers l'avant dans le plan vertical, le sens positif se situait vers le haut, et le sens négatif vers le sol. Cette ressemblance a permis de construire un signal d'erreur ε_{Side} (Eq. V.4) qui dépend du mur suivi de la façon suivante :

- Suivi du mur de droite : $\varepsilon_{Side} = -(\omega_{setSide} - \omega_{Rmeas})$ (comme pour le signal d'erreur de la boucle visuo-motrice OCTAVE). C'est le flux optique droit qui est pris en compte et qui sera régulé.
- Suivi du mur de gauche : $\varepsilon_{Side} = \omega_{setSide} - \omega_{Lmeas}$, le signe de la contre-réaction s'inverse et l'on prend en compte le flux optique gauche pour le réguler.
- Lorsqu'il n'y a aucun mur à suivre, les distances D_R et D_L sont alors infinies. Ces dernières génèrent des flux optiques nuls, donc $\varepsilon_{Side} = 0$. Dans le rare cas où les flux optiques droit et gauche sont égaux, il est inutile de se déplacer latéralement et à nouveau $\varepsilon_{Side} = 0$.

Ces trois derniers points peuvent être résumés comme suit au moyen de l'Eq. V.4 :

$$\varepsilon_{Side} = sign(\omega_{Lmeas} - \omega_{Rmeas}) \times (\omega_{setSide} - max(\omega_{Lmeas}, \omega_{Rmeas})) \qquad \text{Equation V.4}$$

Un critère de maximum (fonction *max*) sélectionne le flux optique le plus important des deux (droit ou gauche). Ce flux optique sélectionné (qui pour une vitesse d'avance donnée correspond au mur le plus proche) va être régulé (c'est-à-dire maintenu constant) pour effectuer une tâche de suivi de mur. Une fonction *signe* (fonction *sign*) change automatiquement le signe de l'erreur ε_{Side} selon le mur suivi. Par convention, la valeur du signe d'une quantité positive est (**+1**) et celle du signe d'une quantité négative est (**-1**), et pour des raisons de symétrie, la valeur du signe d'une quantité nulle est nulle *sign*(0) = **0**. Un correcteur à avance de phase (action Proportionnelle-Dérivée P.D.) est introduit dans la boucle visuo-motrice **LORA I** pour la stabiliser (Serres et al., 2005 ; Serres et al., 2006b).

V.2.2. *Avantages et inconvénients de la boucle visuo-motrice LORA I*

Parmi les avantages de la boucle visuo-motrice **LORA I**, on peut mentionner :

AV1. Une même et unique loi de contrôle, basée sur une simple régulation de flux optique

latéral commandant la dynamique latérale donne naissance à la fois à un comportement de suivi de mur (dans des corridors larges : $D > 2.V/\omega_{setSide}$) et à un comportement de centrage (dans des corridors étroits : $D < 2.V/\omega_{setSide}$), et à des réactions adéquates aux éventuelles ouvertures latérales (Serres et al., 2005 ; Serres et al., 2006b).

AV2. Un opérateur externe peut simplement agir sur la consigne de flux optique latéral $\omega_{setSide}$ pour changer le comportement du robot, en le faisant se rapprocher ou s'éloigner d'un mur (Fig. V.2.2.). $\omega_{setSide}$ fixe en effet le coefficient de proportionnalité entre la distance au mur le plus proche et la vitesse d'avance (D_R ou $D_L = V_x/\omega_{setSide}$). Toutes les positions latérales sont donc potentiellement des points d'*équilibre stable*. Avec la stratégie d'*équilibrage des flux optiques latéraux*, au contraire, seule la position centrée était *stable*, et devenait même instable lorsque l'un des deux flux optiques latéraux faisait défaut (conduisant le robot à s'engouffrer dans toute ouverture béante).

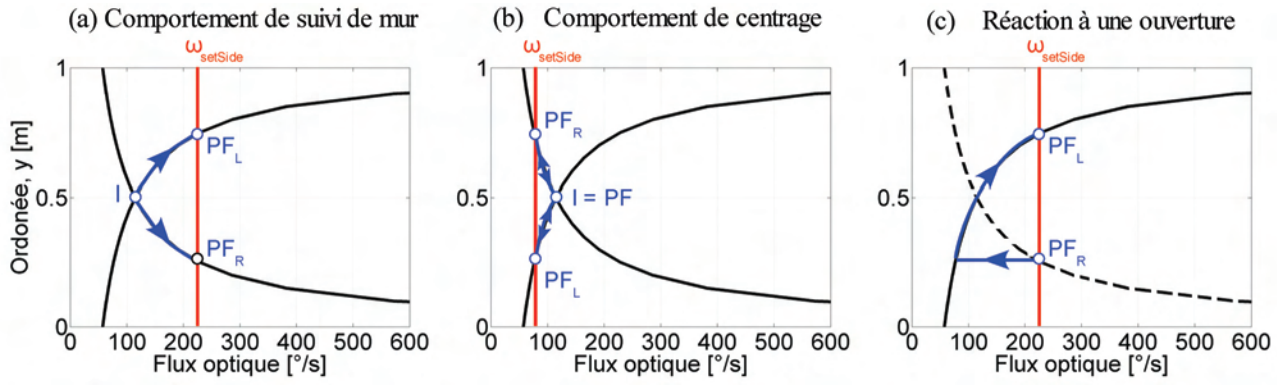

Figure V.2.2. Point de Fonctionnement (droit PF_R ou gauche PF_L) de la boucle visuo-motrice LORA I en fonction de la consigne de flux optique latéral $\omega_{setSide}$ pour V=1m/s dans un corridor d'un mètre de large. I représente l'ordonnée initiale du robot. Les points de fonctionnement se trouvent sur des hyperboles (noires) car l'ordonnée y (position latérale) est inversement proportionnelle au flux optique. Les tracés bleus représentent la trajectoire du point de fonctionnement de la boucle en fonction des situations rencontrées en (a), (b), et (c).

(a) Comportement de suivi de mur : il existe deux points de fonctionnement stables (PF_R et PF_L) correspondant à une consigne de flux optique $\omega_{setSide}$. Le critère *max* des deux flux optiques latéraux mesurés sélectionne le mur à suivre : c'est le mur le plus proche qui sera suivi.

(b) Comportement de centrage : les points de fonctionnement PF_R et PF_L sont instables. La boucle oscille autour du point milieu (PF) du fait de l'alternance des suivis de mur droit et gauche. Le point de fonctionnement droit PF_R (gauche PF_L) se situant dans le demi-plan gauche (droit) du corridor est incompatible avec le critère *max* qui sélectionne le flux optique latéral du mur le plus proche.

(c) Réaction automatique à une ouverture sur l'un des murs : l'absence de flux optique gauche (PF_L devient instable) fait automatiquement changer le comportement d'un suivi de mur gauche en un suivi de mur droit pour atteindre le point de fonctionnement droit PF_R stable.

Parmi les inconvénients de la boucle visuo-motrice **LORA I**, on peut mentionner :

INC1. Piloter le couple de lacet pour piloter la dynamique latérale conduit à une dynamique de classe 2. La présence de ces deux intégrateurs dégrade la stabilité de la boucle.

INC2. Pour s'affranchir du flux optique de rotation, il faut que le système visuel de **LORA I** soit doté d'un système de *réflexe de compensation en lacet*, comme celui observé chez les insectes ailés. Ce type de compensation nécessite d'agir sur un degré de liberté interne (cf. les mouvements relatifs de la tête par rapport au corps en roulis et en tangage chez la mouche : Hengstenberg, 1988, 2001 ; en roulis chez la guêpe : Zeil et al., 2008). Ce réflexe nécessite une mesure inertielle (e.g. gyromètre) ou visuelle de la vitesse de rotation en lacet du robot pour piloter l'actionneur de tête (cou du robot) et contrebalancer les rotations du corps du robot. Un tel réflexe serait apte à stabiliser la vision du robot, lui permettant ainsi de s'affranchir du flux optique de rotation (Viola, 1989 ; Coombs et Roberts, 1992 ; Lewis, 1997; Zufferey et Floreano, 2006 ; Kerhuel et al., 2007).

INC3. Piloter le cap du robot (angle de lacet) ne découple aucunement les mouvements d'avance des mouvements latéraux, l'analyse de la stabilité de **LORA I** ayant été conduite en linéarisant la boucle autour de $\Psi = 0$ (axe longitudinal du corridor). Pour éviter de déstabiliser le robot, son excursion en cap est limitée autour de l'axe longitudinal du corridor ($|\Psi| \leq 18°$) pour ne pas affecter de plus de 5% la vitesse d'avance V_x du robot. La contrainte de non-glissement d'un robot *non-holonome* est donnée par $\dot{V}_y = V_x \cdot \dot{\Psi}$.

INC4. La vitesse d'avance V du robot simulé est pilotée en boucle ouverte. Il serait judicieux d'ajuster la vitesse d'avance dans les corridors étroits pour éviter les oscillations du robot le long de la ligne médiane. Dans de telles circonstances, **LORA I** ne peut pas atteindre la consigne de flux optique latéral $\omega_{setSide}$ désirée.

Initialement conçu pour équiper un aéroglisseur *sous-actionné*, le pilote automatique **LORA I** montre ses limites en termes de stabilité et d'améliorations, comme le pilotage de la vitesse d'avance. Son développement peut néanmoins s'appliquer aux plate-formes robotisées *non-holonomes* (robots mobiles à roue, automobiles...) ou *sous-actionnées* (aéroglisseurs, avions...) qui représentent aujourd'hui la part la plus importante des véhicules (Serres et al., 2005 ; Serres et al., 2006b).

Pour concevoir un pilote automatique « plus biomimétique », susceptible d'expliquer les prouesses

aériennes des insectes, nous avons fait évoluer le pilote automatique **LORA I** vers **LORA II**. Une difficulté soulevée par **LORA I** est qu'il actionnait un degré de *rotation* sur la base du flux optique de *translation*, ce qui peut apparaître contradictoire avec le fait de privilégier les mouvements de translation. La locomotion devrait viser à rejeter les perturbations décelées par la perception, et non à la perturber elle-même.

V.2.3. *Avantages et inconvénients de la boucle visuo-motrice LORA II*

Le principe de guidage de **LORA II** repose sur une *double* régulation du flux optique latéral qui commande les translations d'avance et latérale du robot (Serres et al., 2006a). Cela est rendu possible par l'ajout de deux pousseurs latéraux sur la plate-forme robotisée (Fig. V.2.4.A), qui permet de découpler les mouvements d'avance et latéraux du robot, le rendant ainsi *totalement actionné* dans le plan. **LORA II** se distingue de **LORA I** d'une part par sa dynamique latérale résultant d'une poussée latérale (et non pas d'un couple de lacet), d'autre part, par sa vitesse d'avance qui résulte d'une seconde boucle visuo-motrice. Plus précisement, **LORA II** commande sa dynamique latérale par une régulation du flux optique *unilatéral* (droit ou gauche) et sa dynamique d'avance par une régulation du flux optique *bilatéral* (droit+gauche) (Serres et al., 2006a).
Parmi les avantages de la boucle visuo-motrice **LORA II**, on peut mentionner :

AV1. Le bouclage de la vitesse d'avance sur la base du flux optique bilatéral permet de générer une vitesse d'avance adéquate vis-à-vis de l'étroitesse du corridor. La consigne de flux optique *bilatéral* étant le double de la consigne de flux optique *unilatéral*, les deux boucles entrelacées convergent vers un point de fonctionnement stable en termes de vitesse et de distance aux murs. L'erreur latérale ε_{Side} (Eq. V.4) peut donc s'annuler quelle que soit la largeur du corridor.

AV2. Le découplage entre les dynamiques d'avance et latérale supprime la contrainte de non-glissement du robot, invoquée pour **LORA I**. La commande directe des deux degrés de liberté en translation par des poussées indépendantes produit un effet stabilisant puisqu'il évite une action intégrale dans la chaîne d'action de la boucle du contrôle latéral.

Parmi les inconvénients de la boucle visuo-motrice **LORA II**, on peut mentionner :

INC1. Un opérateur externe ne peut pas agir indépendamment sur les consignes de flux optique ω_{setFwd} et $\omega_{setSide}$ pour contrôler indépendamment la vitesse d'avance et le positionnement la-

téral du robot.

INC2. Le robot doit être équipé d'une boucle à verrouillage de cap (e.g. un compas magnétique) pour assurer son déplacement en translation.

V.2.4. *La boucle visuo-motrice LORA III*

Le principe de guidage de **LORA III**, finalement retenu, repose sur celui de **LORA II** et permet à un opérateur externe d'agir indépendamment sur la consigne de flux optique *bilatéral* ω_{setFwd} et sur la consigne de flux optique *unilatéral* $\omega_{setSide}$. C'est ce couple de consignes distinctes (ω_{setFwd}, $\omega_{setSide}$) qui impose désormais le point de fonctionnement du robot dans un corridor de largeur donnée, en termes de vitesse d'avance et de positionnement latéral. **LORA III** se distingue également de **LORA II** par l'ajout d'une action intégrale dans le correcteur d'avance, qui est maintenant de type proportionnel-intégral (PI) pour annuler l'erreur statique ($\varepsilon_{Fwd\infty} = 0$). **LORA III** est *un régulateur dual de flux optique*, constitué de deux régulateurs de flux optique latéral interdépendants.

La simulation numérique reprend le modèle dynamique du robot décrit par les Eqs. V.5 en y incorporant des saturations. Le signal de commande latéral U_{Side} est limité à 5 V (valeur simulée), correspondant à une vitesse latérale maximale V_{ysat} = 0,50 m/s. Le signal de commande d'avance U_{Fwd} est limité à 10 V (valeur simulée), correspondant à une vitesse d'avance maximale V_{xsat} = 2 m/s.

V.2.4.1. *Modèle dynamique de l'aéroglisseur totalement actionné*

Les caractéristiques de l'aéroglisseur modèle réduit T3-Typhoon (Taiyo Toy Ltd.) ont été améliorées pour accroître ses capacités dynamiques. m = 825 g représente la masse totale du robot LORA, ζ_x et ζ_y sont les coefficients de frottement visqueux suivant les axes X et Y. L'aéroglisseur est à la fois *holonome* et *totalement actionné* : chaque composante du vecteur vitesse V_x (Eq. V.5.A) et V_y (Eq. V.5.B) peut être commandée *indépendamment* par sa tension respective de commande (U_{Fwd} ou U_{side}). Les constantes de temps d'avance $\tau_x = m/\zeta_x$ et latérale $\tau_y = m/\zeta_y$ *simulées* sont identiques et égales à $\tau_x = \tau_y$ = 0,50 s (valeurs correspondantes à $\zeta_x = \zeta_y$ = 1,65 kg/s).

$$m.\frac{dV_x}{dt} + \zeta_x \cdot V_x = K_T \cdot U_{Fwd} \qquad \text{Equation V.5.A}$$

$$m.\frac{dV_y}{dt} + \zeta_y \cdot V_y = K_T \cdot U_{Side} \qquad \text{Equation V.5.B}$$

$$\dot{\Psi} = 0 \qquad \text{Equation V.5.C}$$

$$\Psi = 0 \qquad \text{Equation V.5.D}$$

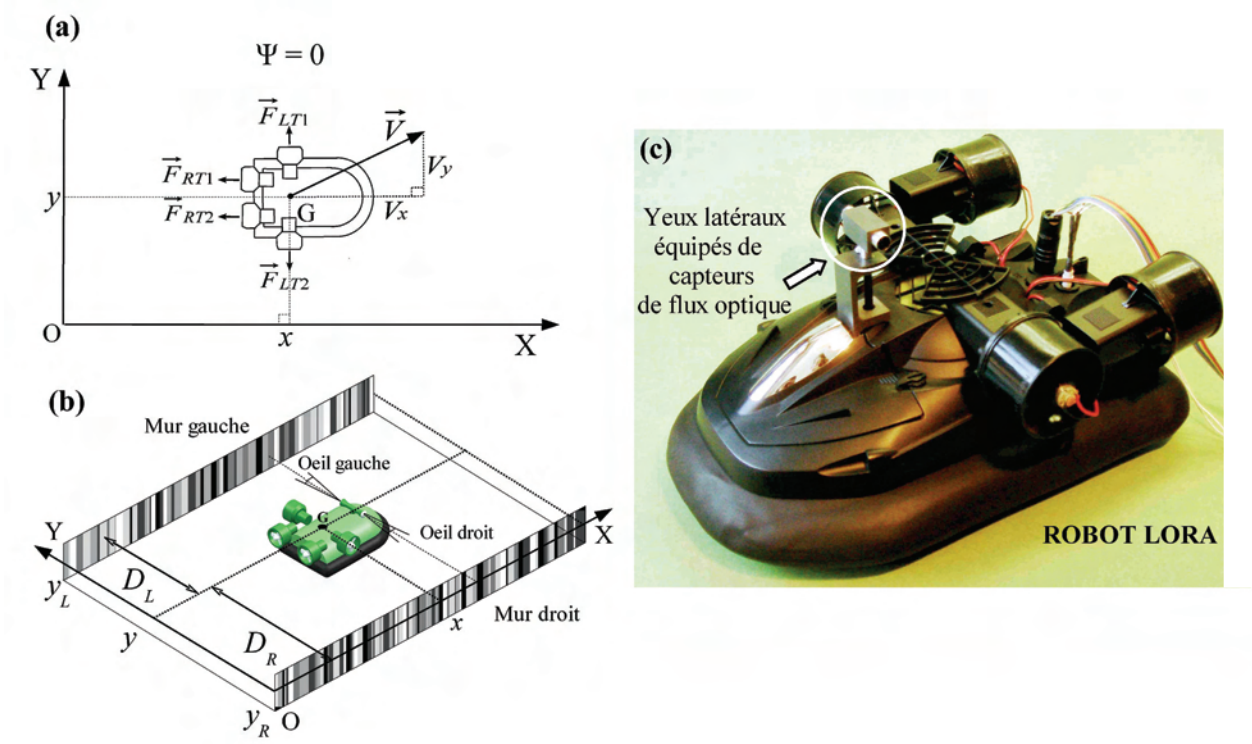

Fig. V.2.4.A. Schéma, paramétrage, et photo de l'aéroglisseur LORA (version 2 ou 3).

(a) Le vecteur vitesse $\boldsymbol{V}$ de l'aéroglisseur peut être projeté dans le système de coordonnées fixes rattaché au corridor. L'aéroglisseur est totalement actionné, les trois degrés de liberté peuvent être controlés indépendamment les uns des autres. La vitesse d'avance V_x résulte de la poussée commune des deux propulseurs arrières (F_{Fwd}=F_{RT1}+F_{RT2}). La vitesse latérale V_y résulte de la force de poussée latérale des deux pousseurs latéraux (F_{side}=F_{LT1}-FR_{T2}). Le cap de l'engin (angle de lacet Ψ) est maintenu constant et aligné avec l'axe longitudinal du corridor Ψ = 0 au moyen d'une boucle à verrouillage de cap basée sur un micro compas magnétique qui compense toute perturbation de lacet en agissant sur la poussée *différentielle* arrière.

(b) L'aéroglisseur LORA (version 2 ou 3) équipé de deux yeux latéraux ($\Delta\varphi$ = $\Delta\rho$ = 4°) se déplace dans un corridor richement texturé (1 m de large). Les murs sont tapissés de contrastes aléatoires en niveaux de gris formant des bandes aléatoires couvrant une large plage de fréquences spatiales (de 0,069 c/° à 0,87 c/° lues suivant la ligne médiane) et une large plage de contraste optique (de 6% à 40%). Les motifs droit et gauche ne sont pas symétriques. D_L et D_R sont respectivement les distances aux murs gauche et droit. V_x et V_y sont respectivement les composantes longitudianale et latérale du vecteur vitesse $\boldsymbol{V}$.

(c) L'aéroglisseur miniature LORA (dimensions : 0,36x0,21x0,14 m) est une version améliorée de l'aéroglisseur radiocommandé T-3 Typhoon (Taiyo Toy Ltd.). Le robot est équipé de deux yeux diamétralement opposés regardant de part et d'autre du véhicule à +90/-90°.

L'aéroglisseur est maintenant équipé de quatre propulseurs. Chaque propulseur peut produire une poussée maximale de 0,72 N sous 7,2 V, la force de poussée est proportionnelle à la tension appliquée (Jin et al., 2004; http://www.gws.com.tw) . K_T = 0,10 N/V est un simple gain liant la poussée et la tension appliquée (U_{Fwd} ou U_{side}). La dynamique des hélices est négligée vis-à-vis de celle de la plate-forme robotisée.

V.2.4.2. *Signaux d'erreur des deux régulateurs de flux optique latéral*

LORA III commande la dynamique latérale par une régulation du flux optique *unilatéral*. Le signal d'erreur ε_{Side} (Eq. V.6) est élaboré de la même manière que dans les deux versions précédentes de LORA à partir des mesures de flux optique (boucle rouge sur la Fig. V.2.4.B) :

$$\varepsilon_{Side} = sign(\omega_{Lmeas} - \omega_{Rmeas}) \times (\omega_{setSide} - max(\omega_{Lmeas}, \omega_{Rmeas})) \qquad \text{Equation V.6}$$

LORA III commande la dynamique d'avance par une régulation du flux optique *bilatéral*. Le signal d'erreur ε_{Fwd} (Eq. V.7) est élaboré en tenant compte d'une consigne de flux optique d'avance qui est maintenant propre au contrôle d'avance (boucle bleue sur la Fig. V.2.4.B) :

$$\varepsilon_{Fwd} = \omega_{setFwd} - (\omega_{Lmeas} + \omega_{Rmeas}) \qquad \text{Equation V.7}$$

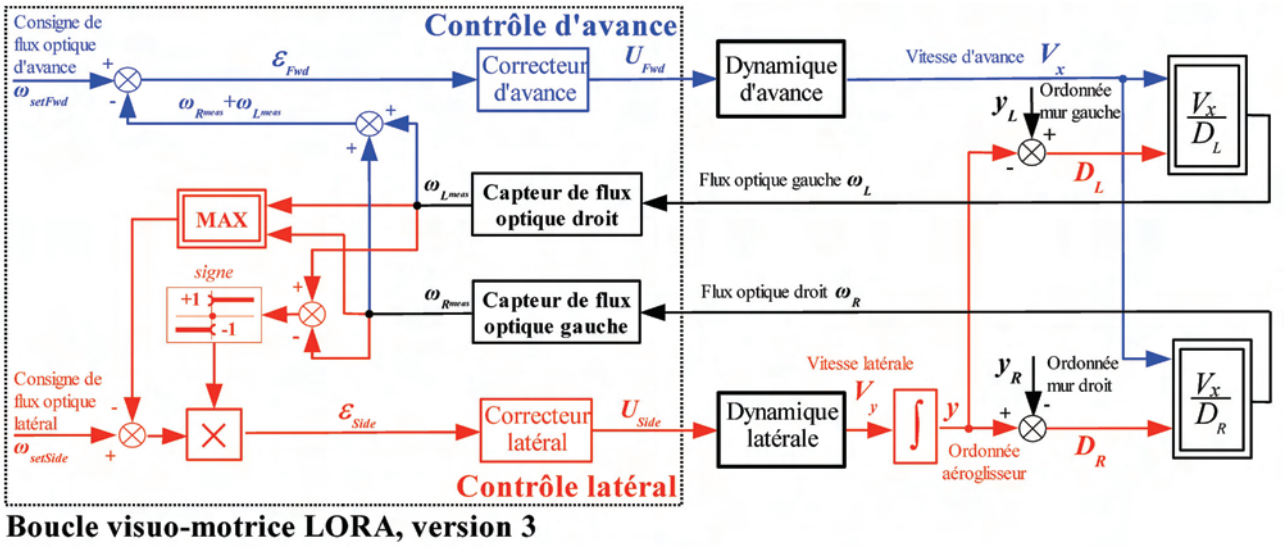

Fig. V.2.4.B. La boucle visuo-motrice LORA III est basée sur deux régulations entrelacées de flux optique latéral.
Le contrôle d'avance (schéma-bloc en bleu) est piloté par la commande U_{Fwd} ajustant la poussée d'avance qui va déterminer la vitesse d'avance V_x. La somme des flux optiques latéraux est comparée à une consigne de flux optique d'*avance* ω_{setFwd}, élaborant ainsi une erreur d'avance ε_{Fwd}. Le correcteur d'avance (type PI) minimise l'erreur ε_{Fwd} en commandant la dynamique d'avance.
Le contrôle latéral (schéma-bloc en rouge) est piloté par la commande U_{Side} ajustant la poussée latérale, qui va déterminer la vitesse latérale V_y. Le flux optique unilatéral (*max* droite et gauche) est comparé à une consigne de flux optique *latéral* $\omega_{setSide}$, élaborant ainsi une erreur latérale ε_{Side}. Le correcteur latéral (type PD) minimise l'erreur ε_{Side} en commandant la dynamique latérale.

V.2.4.3. *Synthèse des correcteurs d'avance et latéral*

La synthèse des correcteurs d'avance et latéral de **LORA III** s'est opérée par une approche fréquentielle en linéarisant chacune des deux boucles (Fig. V.2.4.C) autour du point de

fonctionnement régulé :

$\omega_{setSide}$= 2,21 V (230 °/s), ω_{setFwd}= 2,21 V (230 °/s) + 1,07 V (70 °/s) = 3,28 V (300 °/s)

en tenant compte par ailleurs de la caractéristique non-linéaire des capteurs de flux optique, $\Psi = 0°$, $V_{x\infty}$=1 m/s et y_∞ = 0,23 m dans un corridor de 1m de large, et en supposant que le robot est en train de suivre le mur de droite $signe(\omega_{Lmeas} - \omega_{Rmeas}) = -1$.

La fonction de transfert du contrôle latéral linéarisé en boucle ouverte s'écrit :

$$T_y(p) = -C_y(p).G_y(p).\frac{\partial \omega_R}{\partial y}.K_{DEM} \quad \text{avec} \quad G_y(p) = \frac{0,1}{p\cdot(1+0,5\cdot p)}$$

K_{DEM}(230°/s)=0,1897 V/(rad/s) avec les paramètres : $\Delta\varphi$=4°, U=3,1 V, et τ = 0,05 s de la table de correspondance du circuit DEM, et $(\partial\omega_R/\partial y)_{y=y\infty}$ = $-\omega_{setSide}/y_\infty$ = -17,20 (rad/s)/m.

Le correcteur à avance de phase $C_y(p) = 10\cdot\frac{1+1,5\cdot p}{1+0,5\cdot p}$ permet d'obtenir une marge de phase de 45° et une pulsation critique de 4 rad/s (0,64 Hz).

La fonction de transfert du contrôle d'avance linéarisé en boucle ouverte s'écrit :

$$T_{Vx}(p) = C_{Vx}(p).G_{Vx}(p).\frac{\partial(\omega_L+\omega_R)}{\partial V_x}.K'_{DEM} \quad \text{avec} \quad G_{Vx}(p) = \frac{0,1}{1+0,5\cdot p}$$

K'_{DEM}(110°/s)=0,56 V/(rad/s) correspondant à la sensibilité moyenne des capteurs de flux optique pour un flux optique droit de 230 °/s et un flux optique gauche de 70 °/s, et

$(\partial(\omega_R+\omega_L)/\partial y)_{y=y\infty}$ = $1/y_\infty + 1/(1-y_\infty)$= 5,65 rad/s/(m/s).

Le correcteur proportionnel-intégral (PI) $C_{V_x}(p) = 10\cdot\frac{1+0,5\cdot p}{p}$ est ajusté pour compenser le pôle dominant (aéromécanique) de la dynamique d'avance de l'aéroglisseur, et réduire la constante de temps d'avance en boucle fermée d'un facteur 1,6. L'action *intégrale* est introduite pour annuler l'erreur statique $\varepsilon_{Fwd\infty}$.

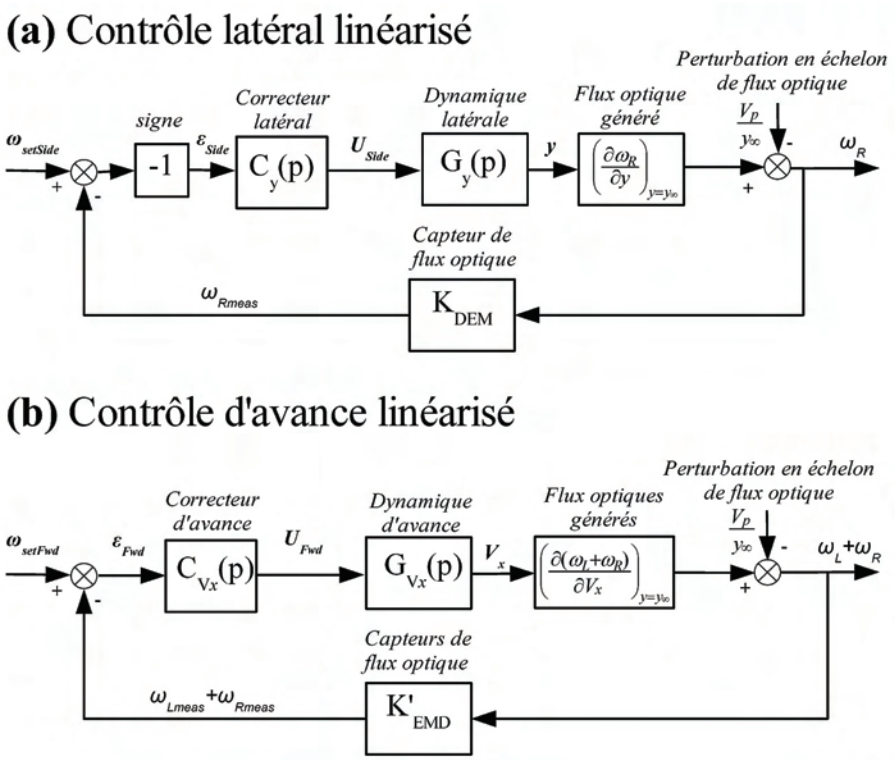

Fig.V.2.4.C. (a) Linéarisation du contrôle d'avance de LORA III.

(b) Linéarisation du contrôle latéral de LORA III. La mise en mouvement des motifs sur le mur droit à la vitesse V_p permet d'introduire une perturbation en échelon de flux optique d'amplitude V_p / y_∞.

V.2.4.4. *Positionnement latéral automatique dans un corridor rectiligne*

Dans la discussion ci-dessous, le pilote automatique LORA III est supposé avoir atteint le régime permanent $\varepsilon_{Side\infty} = 0$ et $\varepsilon_{Fwd\infty} = 0$. C'est-à-dire que l'aéroglisseur se déplace à la vitesse d'avance $V_{x\infty}$ et à une distance au mur de droite est $D_{R\infty} = y_\infty$. LORA III s'efforce, à tout instant, de maintenir le flux optique droit égal à la consigne de flux optique latéral $\omega_{setSide}$, et de maintenir la somme des deux flux optiques latéraux égale à la consigne de flux optique d'avance ω_{setFwd}. Le point de fonctionnement de l'aéroglisseur en régime permanent ($V_{x\infty}$; y_∞) peut être défini de la manière suivante :

En régime permanent : $$\left\{\begin{array}{l}\omega_{setFwd} = \omega_{R\infty} + \omega_{L\infty} \\ \omega_{setSide} = \omega_{R\infty}\end{array}\right\} \Leftrightarrow \left\{\begin{array}{l}\omega_{setFwd} = \dfrac{V_{x\infty}}{D_{R\infty}} + \dfrac{V_{x\infty}}{D_{L\infty}} \\ \omega_{setSide} = \dfrac{V_{x\infty}}{D_{R\infty}}\end{array}\right\}$$ Equation V.8.A / Equation V.8.B

ce qui permet d'écrire le point de fonctionnement ($V_{x\infty}$; y_∞) du robot en fonction des consignes de flux optique ($\omega_{setSide}$ et ω_{setFwd}), et la largeur D du corridor :

$$V_{x\infty} = \frac{\omega_{setSide}\cdot(\omega_{setFwd}-\omega_{setSide})}{\omega_{setFwd}}\cdot D \qquad \text{Equation V.9.A}$$

$$y_\infty = D_{R\infty} = \frac{(\omega_{setFwd}-\omega_{setSide})}{\omega_{setFwd}}\cdot D \qquad \text{Equation V.9.B}$$

$$D = D_{R\infty} + D_{L\infty} \qquad \text{Equation V.9.C}$$

Les équations V.9.A-C engendrent trois résultats majeurs :

1) les coordonnées du point de fonctionnement ($V_{x\infty}$; y_∞) sont proportionnelles à la largeur D du corridor.

2) si la consigne de flux optique latéral $\omega_{setSide}$ est supérieure à la moitié de la consigne de flux optique d'avance ω_{setFwd} (i.e., $\omega_{setSide} > \omega_{setFwd}/2$), le robot pourra atteindre l'ordonnée finale $y_\infty \in]0, D/2[$ (Eq. V.9.B). Avec un tel réglage, le robot restera près d'un mur, adoptant ainsi un *comportement de suivi de paroi*.

3) si la consigne de flux optique latéral $\omega_{setSide}$ est inférieure à la moitié de la consigne de flux optique d'avance ω_{setFwd} (i.e., $\omega_{setSide} \leq \omega_{setFwd}/2$), le robot ne pourra pas atteindre l'ordonnée finale y_∞ prédite par l'Eq. V.9.B sans que change le signe du signal d'erreur ε_{Side} (Eq. V.6). Avec un tel réglage, le robot conservera un même flux optique latéral (égal à $\omega_{setFwd}/2$) de part et d'autre du corridor. Il naviguera donc le long de la ligne médiane du corridor, adoptant ainsi un *comportement de centrage*.

La figure V.2.4.D montre trois trajectoires résultant du *régulateur dual de flux optique* LORA III avec comme réglage $\omega_{setSide}$ = 230°/s et ω_{setFwd} = 300°/s. Comme $\omega_{setSide} > \omega_{setFwd}/2$, l'aéroglisseur adopte un comportement de *suivi de paroi* (Fig. V.2.4.D(a)). Pour les trois ordonnées initiales différentes, l'aéroglisseur génère une distance de sécurité de 0,25 m avec l'un des deux murs (celui de gauche : carrés et croix, celui de droite : points, Fig. V.2.4.D(a)) et une vitesse d'avance de sécurité de 1 m/s (Fig. V.2.4.D(b)). Le point de fonctionnement final atteint par l'aéroglisseur est proche de celui calculé à partir des Eqs. V.9. En prenant D = 1 m, on obtient ($V_{x\infty}$; y_∞) = (0,94 m/s ; 0,23 m). L'aéroglisseur suit alors le mur droit ou gauche selon le signe initial de l'erreur ε_{Side} (Eq. V.6), et donc selon son ordonnée initiale y_0. En régime permanent, aussi bien la somme que le maximum des flux optiques latéraux atteignent leur consigne respective de flux optique (Fig. V.2.4.D(d,f)).

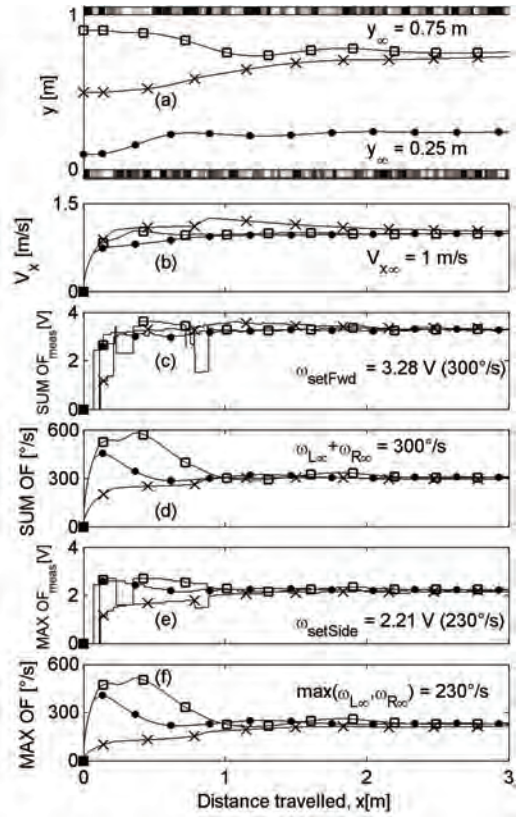

Fig. V.2.4.D. Comportement automatique de suivi de paroi en fonction de l'ordonnée initiale y_0 (marquage temporel toutes les 300 ms). Le corridor simulé mesure 3 m de long, 1 m de large, ses murs sont richement contrastés : ils sont recouverts de bandes verticales aléatoires dont les niveaux de gris couvrent une décade de contraste optique (de 4% à 38%) et 1,1 décades de fréquences spatiales (de 0,068 c/° à 0,87 c/° lues suivant la ligne médiane). Les bandes tapissant les murs opposés ne sont pas symétriques.

(a) Trois trajectoires simulées de l'aéroglisseur avec comme réglage ω_{setFwd} = 300 °/s et $\omega_{setSide}$ = 230 °/s mais différentes ordonnées initiales y_0 (marqueurs carrés : y_0 = 0,90 m, croix : y_0 = 0,50 m, points : y_0 = 0,10 m).

(b) Profil de vitesse d'avance V_x le long du corridor correspondant aux trajectoires montrées en (a).

(c) Somme des flux optiques mesurés ($\omega_{Rmeas} + \omega_{Lmeas}$).

(d) Somme des flux optiques générés ($\omega_R + \omega_L$).

(e) Maximum des flux optiques mesurés $max(\omega_{Rmeas},\omega_{Lmeas})$.

(f) Maximum des flux optiques générés $max(\omega_R,\omega_L)$.

La figure V.2.4.E montre trois trajectoires résultant du régulateur dual de flux optique LORA III avec comme réglage ω_{setFwd} = 300 °/s et différentes valeurs de $\omega_{setSide}$ < 150 °/s. Comme chacune de ces valeurs est telle que : $\omega_{setSide} < \omega_{setFwd}/2$, l'aéroglisseur adopte un *comportement de centrage* (Fig. V.2.4.E(a)). Pour les trois consignes $\omega_{setSide}$ différentes, l'aéroglisseur se centre et atteint une vitesse d'avance de 1,3 m/s (Fig. V.2.4.E(b)). L'aéroglisseur atteint un point de fonctionnement proche de celui calculé à partir des Eqs. V.8, en prenant $D_{R\infty} = D_{L\infty}$ = 0,50 m, on obtient ($V_{x\infty}$; y_∞) = (1,31 m/s ; 0,50 m). Le *comportement de centrage* résulte du fait que l'erreur latérale ε_{Side} (Eq. V.6) est minimum le long de la ligne médiane du corridor. Ce comportement de centrage est le

fruit d'une succession de comportements de suivi de paroi droit et gauche. En régime permanent, la somme des flux optiques latéraux atteint la consigne de flux optique ω_{setFwd}, alors que le flux optique latéral ne peut atteindre une valeur inférieure à $\omega_{setFwd}/2$ = 150°/s générant ainsi une erreur latérale permanente. Lors du centrage, on observe des oscillations (Fig. V.2.4.E(a)) qui sont liées à la commutation de la fonction *signe* (comparateur à zéro) qui sélectionne le mur à suivre (Fig. V.2.4.B). Une solution classique pour atténuer ces oscillations serait de remplacer le comparateur à zéro par un comparateur à hystérésis.

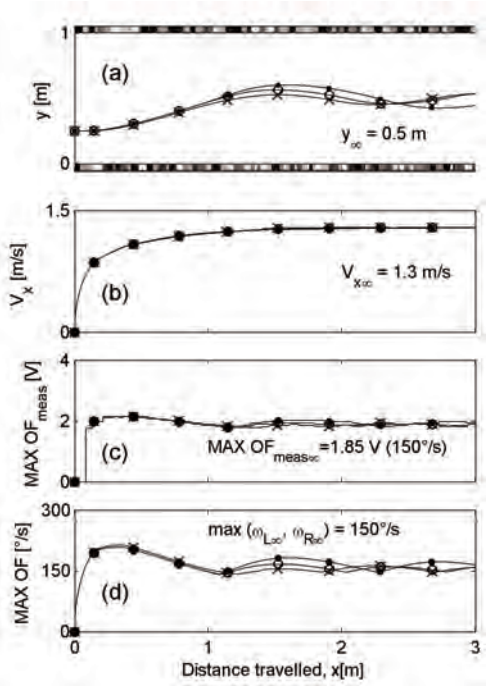

Fig. V.2.3.E. Comportement automatique de centrage pour différentes valeurs de consigne de flux optique latéral, toutes inférieures à la moitié de la consigne de flux optique d'avance (marquage temporel toutes les 300 ms). Mêmes caractéristiques de l'environnement visuel que celui de la Fig. V.2.4.D.

(a) Trois trajectoires simulées de l'aéroglisseur avec comme réglage ω_{setFwd} = 300°/s et y_0 = 0,25 m mais différentes consignes de flux optique latéral $\omega_{setSide}$ < 150°/s (marqueurs croix : $\omega_{setSide}$ = 130°/s, ronds : $\omega_{setSide}$ = 110°/s, points : $\omega_{setSide}$ = 90 °/s).

(b) Profil de vitesse d'avance V_x le long du corridor correspondant aux trajectoires montrées en (a).

(c) Maximum des flux optiques mesurés $max(\omega_{Rmeas},\omega_{Lmeas})$.

(d) Maximum des flux optiques générés $max(\omega_R,\omega_L)$.

V.2.4.5. *Réaction automatique à une ouverture*

La figure V.2.4.F montre l'effet d'une ouverture sur le comportement du robot. Cette ouverture fait apparaître une zone de non-contraste. Le capteur de flux optique gauche étant incapable de mesurer un flux optique latéral le long de l'ouverture rencontrée entre X = 2 m et X = 6 m, l'aéroglisseur se met automatiquement à suivre le mur de droite (Fig. V.2.4.F(a)). Initialement, on observe la réponse à un échelon des deux régulateurs, le robot atteignant le régime permanent ($V_{x1\infty}$; $y_{1\infty}$) = (1 m/s ; 0,25 m). Entre X = 2 m et X = 2,5 m, le robot n'est pas affecté par l'ouverture car les capteurs de flux optique sont équipés de bloqueurs qui maintiennent la dernière valeur mesurée pendant 0,5 s (Fig. V.2.4.F(c)). Passé ce délai : ω_{Lmeas} = 0, une phase transitoire d'accélération apparaît parce que l'environnement est moins encombré ($D_L \rightarrow +\infty$), ce qui réduit la somme des flux optiques latéraux (Fig. V.2.4.F(d)). La vitesse d'avance augmente alors jusqu'à

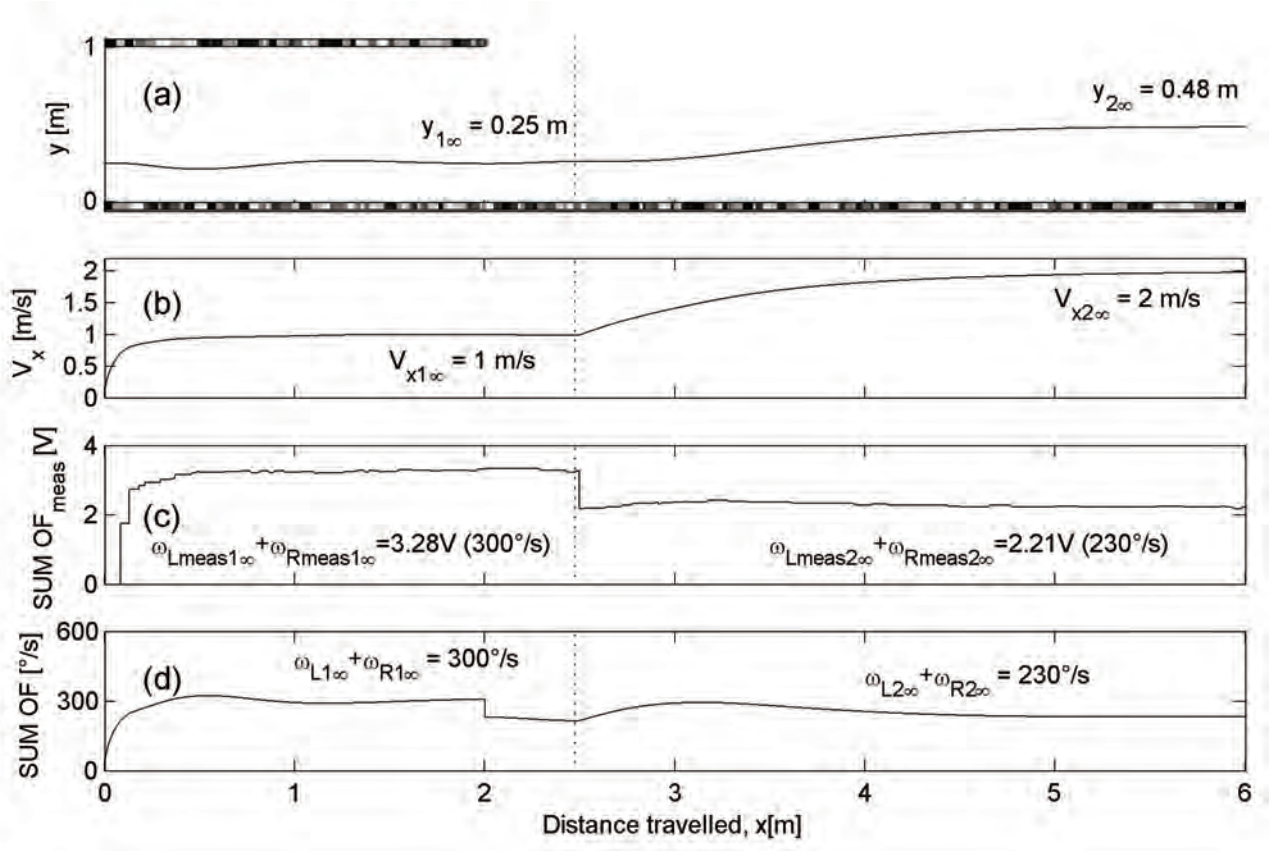

Fig. V.2.4.F. Réaction automatique à une ouverture. Mêmes caractéristiques de l'environnement visuel que celui de la Fig.V.2.4.D.

(a) Trajectoires simulées de l'aéroglisseur avec comme réglage ω_{setFwd} = 300 °/s et $\omega_{setSide}$ = 230 °/s.

(b) Profil de vitesse d'avance V_x le long du corridor correspondant à la trajectoire représentée en (a).

(c) Somme des flux optiques mesurés ($\omega_{Rmeas} + \omega_{Lmeas}$).

(d) Somme des flux optiques générés ($\omega_R + \omega_L$).

(e) Maximum des flux optiques mesurés $max(\omega_{Rmeas},\omega_{Lmeas})$.

(f) Maximum des flux optiques générés $max(\omega_R,\omega_L)$.

saturation $V_{x2\infty}$ = 2 m/s. Le point de fonctionnement atteint est alors similaire à celui prédit par Eq. V.8.B : ($V_{x2\infty}$; $y_{2\infty}$) = (2 m/s ; 0,50 m). Il existe une erreur permanente sur le contrôle de vitesse $\varepsilon_{Fwd\infty}$ = 1,07 V (Fig. V.2.4.F(c)), par contre le contrôle latéral annule l'erreur $\varepsilon_{Side\infty} = 0$.

V.2.4.6. *Réaction automatique à une perturbation en échelon de flux optique*

Dans cette partie, on se focalise sur la robustesse de LORA III vis-à-vis de perturbations en échelon de flux optique. Ces dernières sont simulées en faisant rencontrer au robot, de façon soudaine, un mur mobile. En notant V_p la vitesse des motifs du mur par rapport au corridor, la vitesse d'avance relative du robot par rapport au mur s'écrit $V_x - V_p$.

La figure V.2.4.G(a) montre la trajectoire du robot lorsque le mur droit se déplace à vitesse constante *dans le même sens que le robot* ($V_p > 0$) sur une distance de 3 m (de X = 3 m à X = 6 m).
La figure V.2.4.H(a) montre une situation opposée, dans laquelle le mur se déplaçe *à contre-sens* ($V_p < 0$).
Dans les deux situations, on observe un changement du point de fonctionnement du robot. Pour expliquer ce changement, il faut considérer le mouvement du mur comme une perturbation affectant le pilote automatique LORA III. Le point d'application de la perturbation V_p est montré sur la Fig. V.2.4.C. L'effet de la perturbation affecte le point de fonctionnement comme suit :

En régime permanent : $$\left.\begin{array}{l}\omega_{setFwd} = \omega_{R\infty} + \omega_{L\infty} \\ \omega_{setSide} = \omega_{R\infty}\end{array}\right\} \Leftrightarrow \left\{\begin{array}{l}\omega_{setFwd} = \dfrac{V_{x\infty} - V_p}{D_{R\infty}} + \dfrac{V_{x\infty}}{D_{L\infty}} \\ \omega_{setSide} = \dfrac{V_{x\infty} - V_p}{D_{R\infty}}\end{array}\right.$$

Equation V.10.A

Equation V.10.B

Dès lors, le point de fonctionnement final de l'aéroglisseur ($V_{x\infty}$; y_∞) s'écrit de la façon suivante :

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

Equation V.11.A

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

Equation V.11.B

$$D = D_{R\infty} + D_{L\infty}, \text{ la largeur du corridor}$$

Equation V.11.C

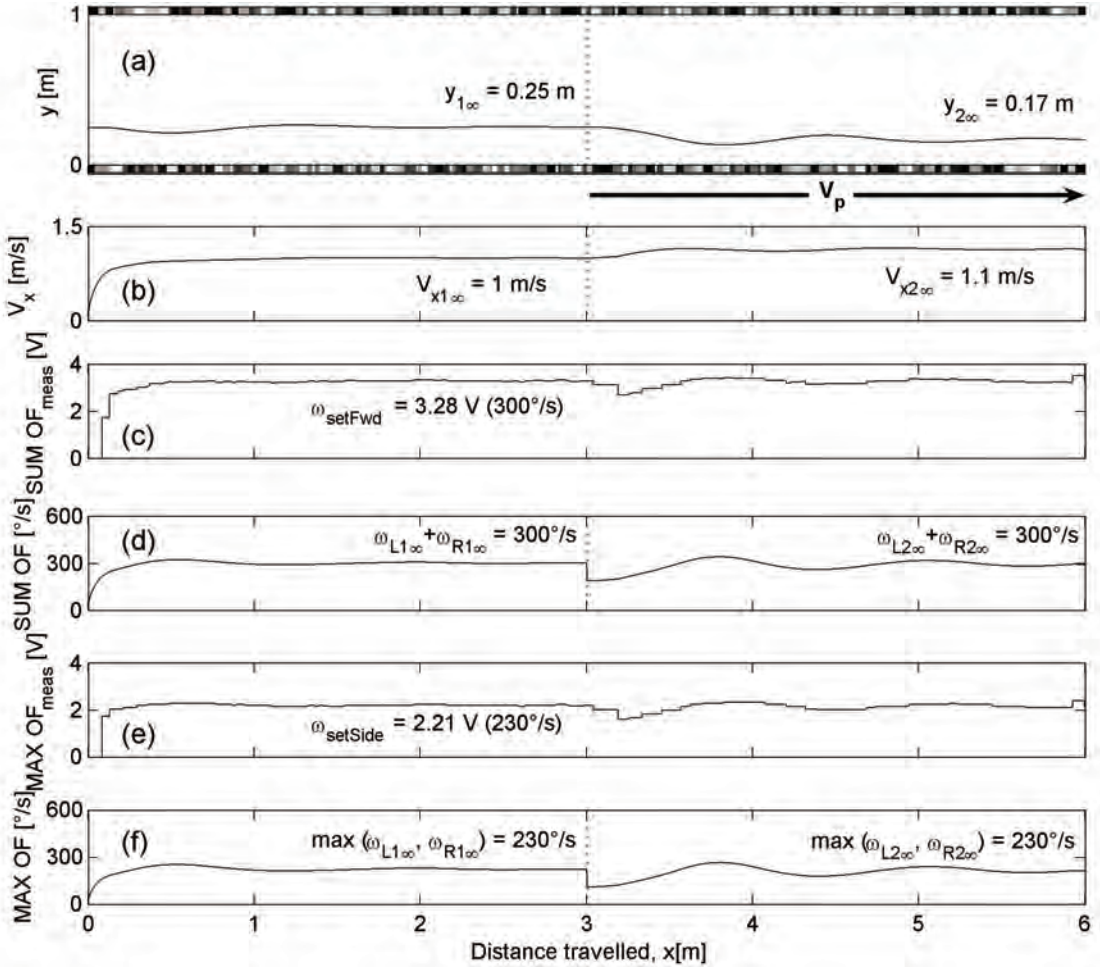

Fig. V.2.4.G. Réaction automatique à une perturbation en échelon négatif d'amplitude -115 °/s résultant de la vitesse des motifs du mur de droite V_p = +0,5m/s. Mêmes caractéristiques de l'environnement visuel que celui de la Fig. V.2.4.D.

(a) Trajectoires simulées de l'aéroglisseur avec comme réglage ω_{setFwd} = 300 °/s et $\omega_{setSide}$ = 230 °/s.

(b) Profil de vitesse d'avance V_x le long du corridor correspondant à la trajectoire représentée en (a).

(c) Somme des flux optiques mesurés ($\omega_{Rmeas} + \omega_{Lmeas}$).

(d) Somme des flux optiques générés ($\omega_R + \omega_L$).

(e) Maximum des flux optiques mesurés $max(\omega_{Rmeas},\omega_{Lmeas})$.

(f) Maximum des flux optiques générés $max(\omega_R,\omega_L)$.

La partie initiale du corridor est stationnaire, l'aéroglisseur atteint le point de fonctionnement ($V_{x1\infty}$; $y_{1\infty}$) = (1 m/s ; 0,25 m) conformément aux Eqs. V.8.

Entre les abscisses X = 3 m et X = 6 m, la vitesse positive des motifs contrastés ($V_p > 0$) cause une perturbation en échelon négative de flux optique, d'amplitude -115 °/s (Fig. V.2.4.G).

Pour une vitesse négative des motifs contrastés ($V_p < 0$), on observe une situation similaire mais avec une perturbation en échelon positive de flux optique, d'amplitude +115 °/s (Fig. V.2.4.H).

Dans les deux cas, le point de fonctionnement de l'aéroglisseur ($V_{x2\infty}$; $y_{2\infty}$) le long du mur en mouvement est proche des résultats prédits par les Eqs. 11. Avec D = 1 m, ω_{setFwd} = 300 °/s, $\omega_{setSide}$ = 230 °/s, et V_p = +0,5 m/s le point de fonctionnement est ($V_{x2\infty}$; $y_{2\infty}$) = (1,1 m/s ; 0,14 m), alors que,

toutes choses étant égales par ailleurs, le mouvement à contre-sens avec V_p = -0,5 m/s donne ($V_{x2\infty}$; $y_{2\infty}$) = (0,82 m/s ; 0,33 m).

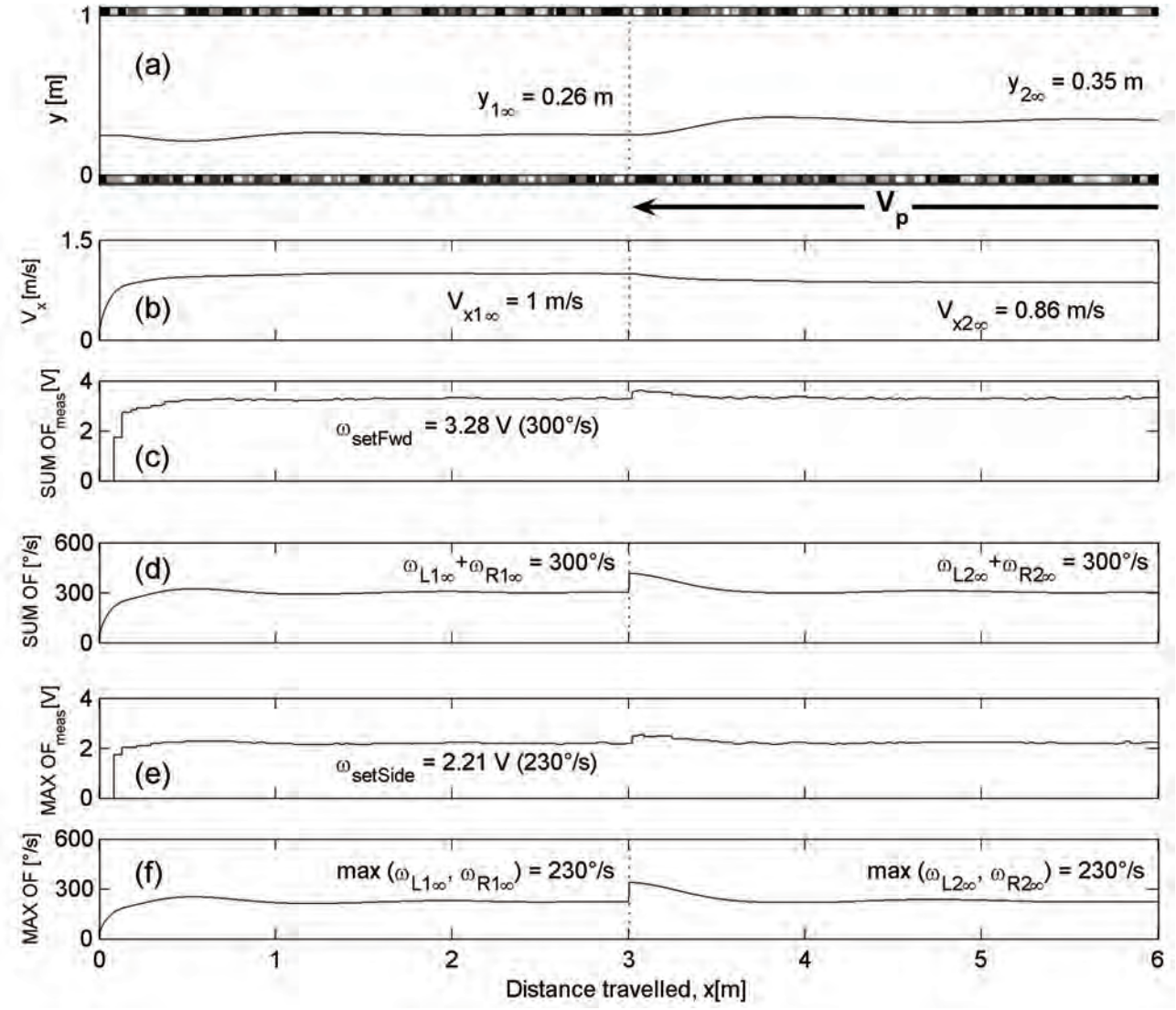

Figure V.2.4.H. Réaction automatique à une perturbation en échelon positif d'amplitude +115 °/s résultant de la vitesse des motifs du mur de droite V_p = -0,5 m/s. Mêmes caractéristiques de l'environnement visuel que celui de la Fig. V.2.4.D.

(a) Trajectoires simulées de l'aéroglisseur avec comme réglage ω_{setFwd} = 300 °/s et $\omega_{setSide}$ = 230 °/s.

(b) Profil de vitesse d'avance V_x le long du corridor correspondant à la trajectoire représentée en (a).

(c) Somme des flux optiques mesurés ($\omega_{Rmeas} + \omega_{Lmeas}$).

(d) Somme des flux optiques générés ($\omega_R + \omega_L$).

(e) Maximum des flux optiques mesurés $max(\omega_{Rmeas},\omega_{Lmeas})$.

(f) Maximum des flux optiques générés $max(\omega_R,\omega_L)$.

En d'autres termes, dès qu'un flux optique plus faible est mesuré, le contrôle latéral traite cette situation comme s'il s'agissait d'un mur plus distant, provoquant une accélération de la part du contrôle d'avance et rapprochant l'aéroglisseur du mur jusqu'à ce qu'il retrouve un flux optique égal

à la consigne latérale (Fig. V.2.4.G). Au contraire, dès qu'un flux optique plus important est mesuré, cela provoque l'effet opposé (Fig. V.2.4.H). Ces deux simulations d'expériences montrent que l'aéroglisseur réagit de façon appropriée et stable en présence de perturbations en échelon, mais aussi que le pilote automatique LORA III génère des comportements qui concordent avec des observations éthologiques sur l'abeille dans un corridor non-stationnaire (Kirchner et Srinivasan, 1989). La partie suivante se focalisera sur la robustesse de LORA III vis-à-vis de perturbations non-constantes de flux optique.

V.2.4.7. *Décélération et accélération automatiques dans un corridor fuselé*

Le profil des vitesses obtenues le long d'un corridor fuselé est particulièrement instructif (Fig. V.2.4.J(b)). Le flux optique latéral est supposé être régulé tout au long du corridor fuselé. LORA III agit de manière à ce que (i) l'un des deux flux optiques latéraux (celui de droite, par exemple) soit égal à la consigne de flux optique latéral $\omega_{setSide}$, et que (ii) la somme des flux optiques latéraux soit égale à la consigne de flux optique d'avance ω_{setFwd} en toutes circonstances et à tout instant. La distance aux murs (D_R et D_L) sont désormais fonction du temps, la vitesse d'avance instantanée $V_x(t)$ se détermine de la façon suivante :

à tout instant t : $\left.\begin{matrix}\omega_{setFwd}=\omega_R(t)+\omega_L(t)\\ \omega_{setSide}=\omega_R(t)\end{matrix}\right\}\Leftrightarrow\left\{\begin{matrix}\omega_{setFwd}=\dfrac{V_x(t)}{D_R(t)}+\dfrac{V_x(t)}{D_L(t)}\\ \omega_{setSide}=\dfrac{V_x(t)}{D_R(t)}\end{matrix}\right.$ Equation V.12.A / Equation V.12.B

on peut en déduire la vitesse d'avance instantanée $V_x(t)$ comme suit :

$$V_x(t) = \frac{\omega_{setSide}\cdot(\omega_{setFwd}-\omega_{setSide})}{\omega_{setFwd}}\cdot D(t) \qquad \text{Equation V.13.A}$$

$$D(t) = D_R(t)+D_L(t) \qquad \text{Equation V.13.B}$$

La vitesse d'avance instantanée $V_x(t)$ (Eq. V.13.A) apparaît donc comme étant proportionnelle à la largeur locale du corridor $D(t)$ (Eq. V.13.B). Le corridor fuselé est traité par le pilote automatique LORA III comme une *pertubation non-constante de flux optique* causée par les variations linéaires des ordonnées des murs droit $y_R(x)$ et gauche $y_L(x)$ en fonction de la distance parcourue x. Cela conduit l'aéroglisseur à répondre en réduisant (ou augmentant) sa vitesse d'avance linéairement en fonction de la distance parcourue (Fig. V.2.4.I). La largeur locale $D(x)$ du corridor peut s'écrire comme suit en fonction de l'angle fuselant α (fléché sur Fig. V.2.4.I(a)) :

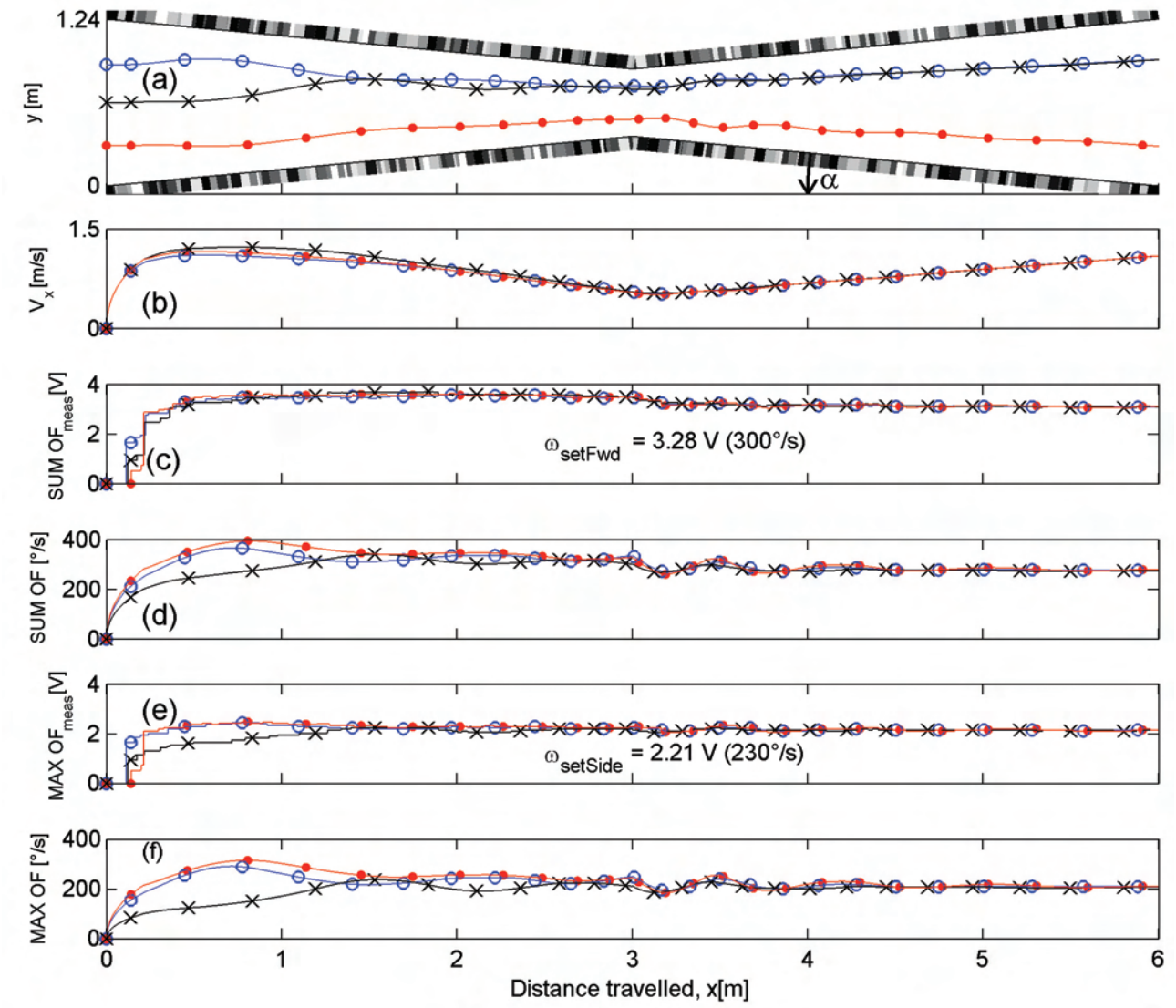

Fig. V.2.4.I. Contrôle automatique de la vitesse d'avance dans un corridor fuselé en fonction de l'ordonnée initiale y_0 (marquage temporel toutes les 300 ms). Le corridor simulé fait 6 m de long, 1,24 m de large à l'embouchure et 0,50 m au point de constriction et ses murs sont richement contrastés. Ils sont recouverts de bandes verticales aléatoires en niveaux de gris qui couvrent une décade de contraste optique (de 4% à 38%) et 1,5 décades de fréquences spatiales (de 0,034 c/° à 1,08 c/° suivant la ligne médiane). Les bandes verticales tapissant les murs opposés ne sont pas symétriques.
(a) Trois trajectoires simulées de l'aéroglisseur avec comme réglage ω_{setFwd} = 300 °/s et $\omega_{setSide}$ = 230 °/s mais différentes ordonnées initiales (marqueurs ronds : y_0 = 0,90 m, croix : y_0 = 0,60 m, points : y_0 = 0,30 m).
(b) Profil de vitesse d'avance V_x le long du corridor correspondant aux trajectoires montrées en (a).
(c) Somme des flux optiques mesurés ($\omega_{Rmeas} + \omega_{Lmeas}$).
(d) Somme des flux optiques générés ($\omega_R + \omega_L$).
(e) Maximum des flux optiques mesurés $max(\omega_{Rmeas},\omega_{Lmeas})$.
(f) Maximum des flux optiques générés $max(\omega_R,\omega_L)$.

$$D(x) = D_R(x) + D_L(x) = y_L(x) - y_R(x) = y_{L_0} - y_{R_0} + 2 \cdot \tan(\alpha) \cdot x \qquad \text{Equation V.14}$$

En combinant l' Eq. V.13.A et l'Eq. V.13.B, la vitesse d'avance $V_x(x)$ apparaît proportionnelle à la distance parcourue x :

$$V_x(x) = 2 \cdot \tan(\alpha) \cdot \frac{\omega_{setSide} \cdot (\omega_{setFwd} - \omega_{setSide})}{\omega_{setFwd}} \cdot x + V_{x_0}$$ Equation V.15.A

$$V_x(x) = \frac{signe(\alpha)}{\tau(\alpha)} \cdot x + V_{x_0}$$ Equation V.15.B

avec $V_{x0} = (y_{L0} - y_{R0}).\omega_{setSide}.(\omega_{setFwd} - \omega_{setSide})/\omega_{setFwd}$.

La constante de temps d'avance en boucle fermée $\tau(\alpha)$ fonction de l'angle fuselant α peut s'exprimer comme suit :

$$\tau(\alpha) = \frac{\omega_{setFwd}}{2 \cdot \tan|\alpha| \cdot \omega_{setSide} \cdot (\omega_{setFwd} - \omega_{setSide})}$$ Equation V.16

Un graphique représentant dx/dt en fonction de x donnera une fonction affine (Eq. V.15.A) dans le plan de phase (x, dx/dt), comme finalement observé dans la simulation (Fig. V.2.4.I(b)). En dérivant l'Eq. V.15.B, la vitesse d'avance est alors solution d'une équation différentielle du premier ordre :

$$\frac{dV_x}{dt} - \frac{signe(\alpha)}{\tau(\alpha)} \cdot V_x = 0$$ Equation V.17

et par conséquent, V_x est une fonction exponentielle en fonction du temps :

$$V_x(t) = V_x(t_0)\, e^{\frac{signe(\alpha)}{\tau(\alpha)} \cdot (t - t_0)}$$ Equation V.18

Ainsi, sans aucune connaissance de l'angle fuselant α à bord de l'aéroglisseur, celui-ci est contraint de ralentir de façon exponentielle (Eq. V.18) dans un passage rétrécissant ($\alpha < 0$), et d'accélérer de façon exponentielle (Eq. V.18) dans un passage s'élargissant ($\alpha > 0$), avec la même constante de temps d'avance en boucle fermée $\tau(\alpha)$ (Eq. V.17). Cette constante de temps est contrainte par l'environnement visuel, elle est d'autant plus faible que l'étranglement du passage est raide. On vérifie que pour $\alpha = 0$ (corridor rectiligne), la vitesse d'avance du robot reste constante, comme cela a été observé dans les simulations d'expériences (Fig. V.2.4.D).

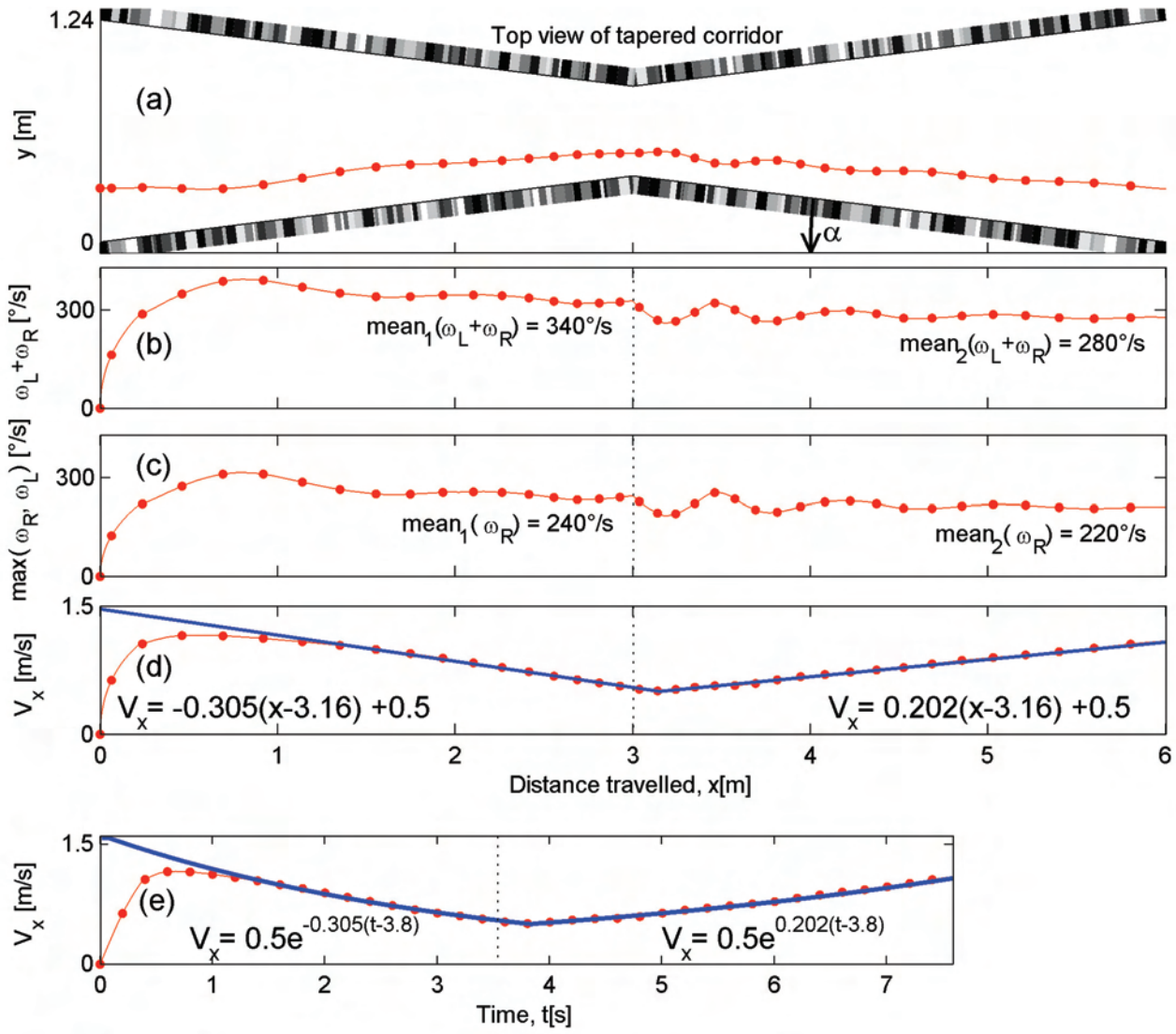

Fig. V.2.4.J. Profil de vitesse dans un corridor fuselé (angle fuselant α = 7°) correspondant à la même trajectoire rouge tracée sur la Fig. V.2.4.I. (marquage temporel toutes les 200 ms). Mêmes caractéristiques de l'environnement visuel que celui de la Fig. V.2.4.I.

(a) Trois trajectoires simulées de l'aéroglisseur avec comme réglage ω_{setFwd} = 300 °/s, $\omega_{setSide}$ = 230 °/s, une ordonnée initiale y_0 = 0,30 m.

(b) Profil de vitesse d'avance V_x le long du corridor correspondant à la trajectoire représentée en (a).

(c) Somme des flux optiques générés ($\omega_R + \omega_L$).

(d) Maximum des flux optiques générés $max(\omega_R,\omega_L)$.

(e) Profil de vitesse V_x en fonction de la distance parcourue x.

(d) Profil de vitesse d'avance V_x en fonction du temps.

La constante de temps de vitesse en boucle fermée $\tau(\alpha)$ dépend de la somme des flux optiques ($\omega_R+\omega_L$) et du flux optique maximal $max(\omega_R,\omega_L)$ qui sont effectivement maintenus constants le long du corridor fuselé (Fig. V.2.4.J(b,c)). Représenter la vitesse d'avance V_x en fonction de la distance parcourue x définit un *plan de phase* (Fig. V.2.4.J(d)), sur lequel la constante de temps $\tau(\alpha)$ peut être lue directement. La constante de temps de vitesse en boucle fermée est alors égale à

$\tau(\alpha)$ = somme(ω_R,ω_L)/[2·tan|α|·max(ω_R,ω_L)·(somme(ω_R,ω_L)-max(ω_R,ω_L))] où ω_R et ω_L sont les flux optiques générés, qui sont effectivement maintenus constants pendant la traversée du corridor. Dans la partie convergente du corridor (α = -7°), les résultats de simulation montrent que les flux optiques effectivement maintenus constants sont : somme(ω_R,ω_L) = 340 °/s et max(ω_R,ω_L) = 240 °/s (Fig. V.2.4.J(b,c)), valeurs qui sont voisines mais distinctes des consignes de flux optique du fait des erreurs du système provoquées par la perturbation non-constante. Une bonne concordance peut être établie entre la pente de la droite de régression -0,305 s^{-1} (Fig. V.2.4.J(d)) donnant une constante de temps τ_{Conv}(α = -7°) = 3,3 s et celle calculée avec l'Eq. V.15.A. Dans la partie convergente du corridor (α = 7°) : somme(ω_R,ω_L)=280 °/s et max(ω_R,ω_L)=220 °/s (Fig. V.2.3.J(b,c)), on obtient une pente de régression +0.202 s^{-1} donnant τ_{Div}(α = 7°) = 4,95 s, valeur qui concorde bien avec celle calculée à partir de l'Eq. V.15.A. Les différences entre τ_{Conv} et τ_{Div} sont causées par l'erreur de traînée du système liée à la *perturbation non-constante*.
La série d'expériences simulés montre que le *régulateur dual de flux optique* LORA III réussit à surmonter des perturbations de type « corridor fuselé » en ajustant de façon fort appropriée la vitesse d'avance du robot, et ce sans aucune information ni sur la largeur locale du corridor, ni sur l'angle fuselant. La constante de temps de décélération ou d'accélération $\tau(\alpha)$ est une fonction monotone de l'angle fuselant α (Eq. V.16).

V.3. *Simulation d'un modèle visuo-moteur d'abeille*

Des simulations, intégrant un modèle d'abeille virtuelle, ont été réalisées pour montrer que la boucle visuo-motrice LORA III génère des trajectoires simulées étonnament semblables à celles enregistrées sur le vol libre d'abeilles réelles (voir **IV.2.**). Les environnements simulés reprennent les conditions expérimentales des études éthologiques menées dans la partie **IV.2**.

Le modèle d'abeille virtuelle incorpore des dynamiques d'avance et latérale du premier ordre de constante de temps τ_x = τ_y = 0,22 s (Franceschini et al., 2007), deux yeux composés élémentaires, chacun d'eux possédant seulement deux ommatidies (N = 2) : les latérales (à ±90°) avec $\Delta\varphi$=3,5° et $\Delta\rho$=3,8°, et les fronto-latérales (à ±45°) avec $\Delta\varphi$=2,5° et $\Delta\rho$=2,6°. Chacune des quatre ommadities contient deux photorécepteurs formant un DEM. Les mesures de flux optique ipsilatéral (ω_φ) sont fusionnées en pondérant par un facteur 0,75 la mesure de la facette à 90° et par un facteur 0,25 la mesure de la facette à 45° (pondération dépendant linéairement de la position azimutale de l'ommaditie, Eq. V.19). Cette intégration spatiale améliore nettement la qualité des mesures des flux optiques mesurés (droit ω_{Rmeas} et gauche ω_{Lmeas}, voir Dray, 2006, Fig. VI.2).

$$\omega_{mes} = \frac{(N - \sum_{\varphi \neq \pi/2} a_\varphi) \cdot \omega_{\pi/2} + \sum_{\varphi \neq \pi/2} a_\varphi \cdot \omega_\varphi}{N} \qquad \text{Equation V.19}$$

$$a_\varphi = \frac{2 \cdot \varphi}{\pi}, \varphi \in [0 ; \pi/2]$$

V.3.1. *Simulation d'un suivi de paroi fixe*

Les conditions expérimentales $E_R \rightarrow R_R$ et $E_L \rightarrow R_L$ sont simulées dans un corridor stationnaire. L'abeille simulée entre dans le corridor de 0,95 m de large à vitesse nulle, soit à l'entrée E_R à l'ordonnée y_0 = 0,10 m, soit à l'entrée E_L en y_0 = 0,85 m. La mire périodique simulée couvrant les deux murs est la même que celle ayant servie au cours des expériences sur les abeilles (période spatiale : λ =10 cm, contraste : m = 0,41, voir IV.2.1.). Lors des expériences réalisées sur le vol libre de l'abeille dans un corridor de 0,95 m de large (voir IV.2.), nous avons observé que les abeilles atteignaient une distance au mur de droite $D_{R\infty}$= 0,24 m ou gauche $D_{L\infty}$= 0,24 m et une

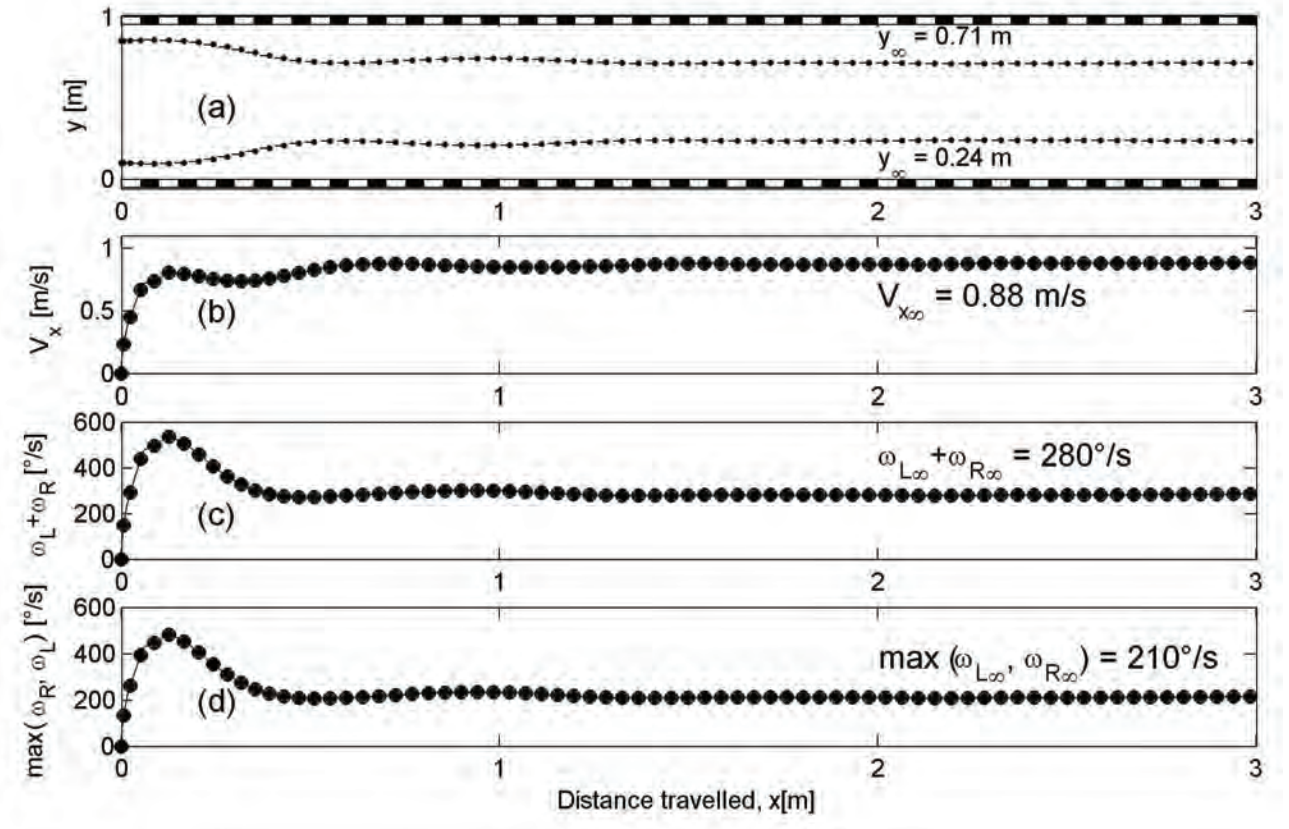

Fig. V.3.1. Deux trajectoires simulées d'abeille pour la condition $E_R \rightarrow R_R$ (points noirs) et la condition $E_L \rightarrow R_L$ (cercles) avec des mêmes consignes de flux optique $\omega_{setSide}$ = 210 °/s (i.e., 2,24 V) et ω_{setFwd} = 280 °/s (i.e., 3,32 V).

(a) Deux chronophotographies simulées avec une période d'échantillonnage de 50 ms (y_0 = 0,85 m et y_0 = 0,10 m). Le marquage temporel des deux trajectoires se superposent.

(b) Profil de vitesse d'avance V_x le long du corridor correspondant aux trajectoires montrées en (a).

(c) Somme des flux optiques latéraux générés ($\omega_R + \omega_L$).

(f) Maximum des flux optiques latéraux générés $max(\omega_R,\omega_L)$.

vitesse d'avance $V_{x\infty}$ = 0,88 m/s en régime permanent. Un couple unique de consignes de flux optique tel que $\omega_{setSide}$ = 210 °/s et ω_{setFwd} = 280 °/s (Eqs. V.9) permet d'atteindre avec LORA III un tel point de fonctionnement.

Les simulations Fig. V.3.1 montrent que la boucle visuo-motrice LORA III génère des trajectoires semblables à celles obtenues expérimentalement (Fig. IV.2.2.A, page 86). Le couple de consignes de flux optique déterminé à partir des Eqs. V.9 a permis à l'abeille simulée d'atteindre le même point de fonctionnement que le point moyen de fonctionnement obtenu à partir des résultats comportementaux (Tab. IV.2.2.1.).

V.3.2. *Simulation d'un suivi de paroi mobile*

Une partie du mur droit est mis en mouvement (entre X=0,75 m et X=2,25 m) pour simuler une

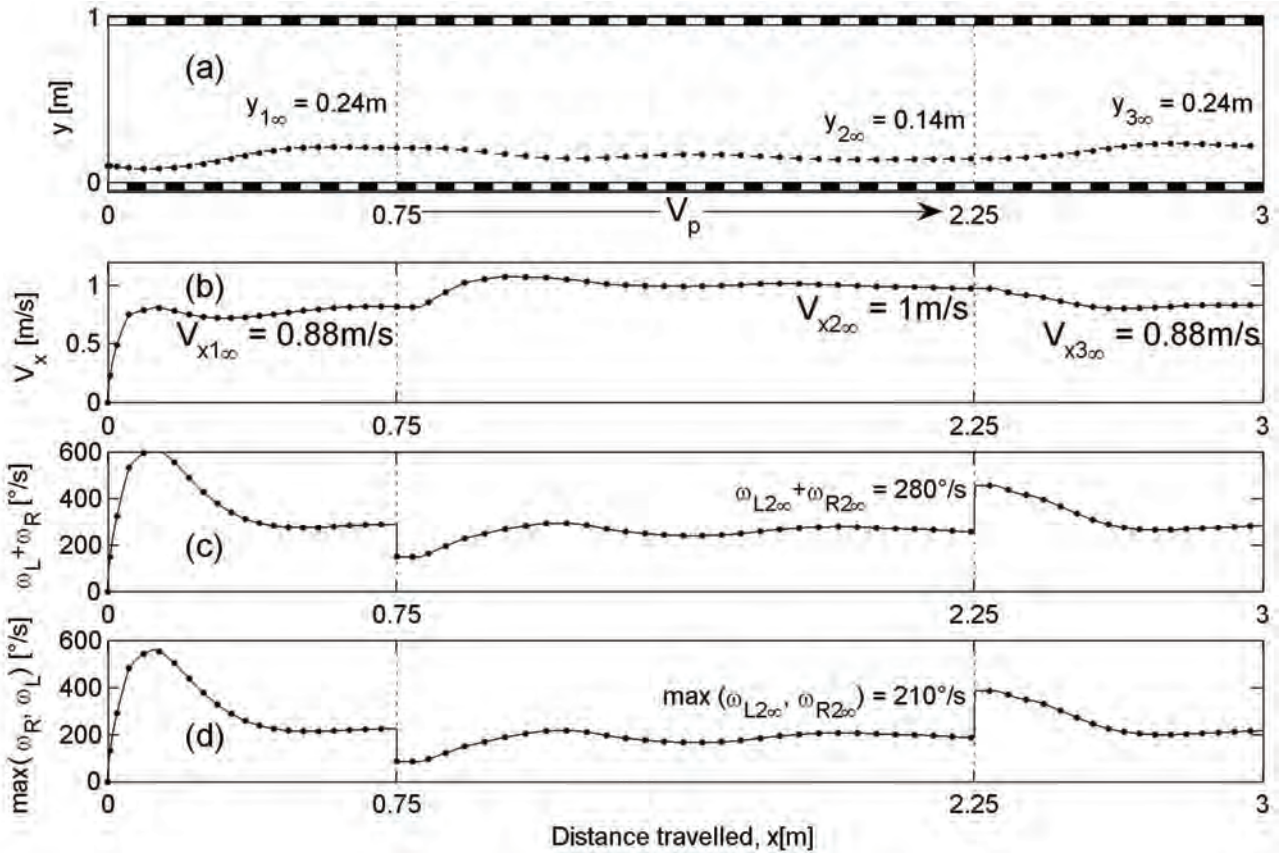

Fig. V.3.2.A. Trajectoire simulée d'abeille pour la condition $E_R \rightarrow R_R$ avec des consignes de flux optique $\omega_{setSide}$ = 210 °/s (i.e., 2,24 V) et ω_{setFwd} = 280 °/s (i.e., 3,32 V). Entre X=0,75 m et X=2,25 m, les motifs du mur de droite sont animés d'un mouvement de translation de vitesse V_p **= +0,50 m/s**.

(a) Chronophotographie simulée avec une période d'échantillonnage de 50 ms (y_0 = 0,10 m).

(b) Profil de vitesse d'avance V_x le long du corridor correspondant aux trajectoires montrées en (a).

(c) Somme des flux optiques latéraux générés ($\omega_R + \omega_L$) régulée à ω_{setFwd} = 280 °/s.

(f) Maximum des flux optiques latéraux générés $max(\omega_R,\omega_L)$ régulé à $\omega_{setSide}$ = 210 °/s.

abeille dans un corridor non-stationnaire. La condition expérimentale $E_R \rightarrow R_R$ est simulée avec une vitesse des motifs sur le mur droit V_p = ±0,50 m/s. Le mur en mouvement génère une perturbation de flux optique en forme d'échelon de $V_p / D_{R\infty}$= ±120 °/s, ce qui représente une perturbation importante vis-à-vis des consignes de flux optique $\omega_{setSide}$ = 210 °/s et ω_{setFwd} = 280 °/s.

On voit que la boucle visuo-motrice LORA III rejette le mouvement relatif du mur droit en affectant le point de fonctionnement de l'abeille simulée. Les équations V.11 permettent de calculer le nouveau point de fonctionnement en tenant compte de la perturbation V_p. Lorsque V_p est positif (Fig. V.3.2.A), l'abeille simulée se rapproche du mur en mouvement et atteint le point de fonctionnement suivant : $V_{x2\infty}$ =1 m/s et $y_{2\infty}$= 0,14m. Par contre, lorsque V_p est négatif (mouvement à contre-sens de l'abeille, Fig. V.3.2.B), l'abeille simulée s'éloigne du mur en mouvement et atteint le point de fonctionnement suivant : $V_{x2\infty}$ =0,74 m/s et $y_{2\infty}$= 0,33 m.
L'échelon de flux optique simulé (± 120 °/s) est du même ordre de grandeur que celui appliqué aux

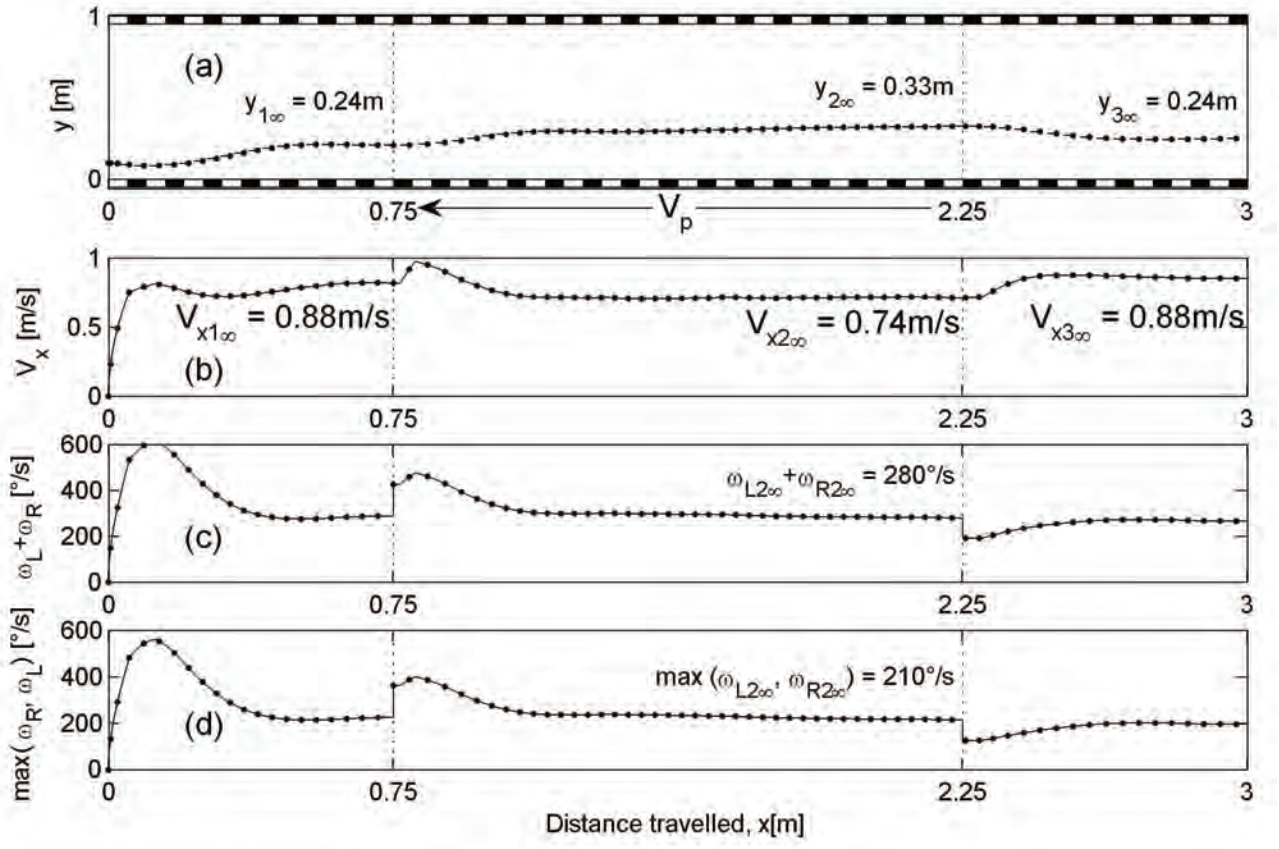

Fig. V.3.2.B. Trajectoire d'abeille simulée pour la condition $E_R \rightarrow R_R$ avec des consignes de flux optique $\omega_{setSide}$ = 210 °/s (i.e., 2,24 V) et ω_{setFwd} = 280 °/s (i.e., 3,32 V). Entre X=0,75 m et X=2,25 m, les motifs du mur de droite sont animés d'un mouvement de translation à contre-sens de celui de l'abeille à une vitesse $\boldsymbol{V_p}$**= -0,50 m/s**.
(a) Chronophotographie simulée avec une période d'échantillonnage de 50ms (y_0 = 0,10 m).
(b) Profil de vitesse d'avance V_x le long du corridor correspondant aux trajectoires montrées en (a).
(c) Somme des flux optiques latéraux générés ($\omega_R + \omega_L$) régulée à ω_{setFwd} = 280 °/s.
(f) Maximum des flux optiques latéraux générés $max(\omega_R,\omega_L)$ régulée à $\omega_{setSide}$ = 210 °/s.

abeilles dans les expériences de Kirchner et Srinivasan (1989), estimé à ± 190 °/s. Les résultats de simulation (Figs. V.3.2.A,B) incorporant un modèle d'abeille virtuelle montrent que le décentrage observé, en présence d'un corridor non-stationnaire, s'explique également à partir de la boucle visuo-motrice LORA III.

V.4. *Intégrabilité de la boucle visuo-motrice LORA III sur FPGA*

L'implantation du pilote automatique LORA sur une plate-forme robotisée autonome nécessite l'intégration de nombreuses fonctions (quatre DEMs, deux boucles visuo-motrices, de nombreux pilotes de périphériques) sur un même support matériel. Le choix d'une cible matérielle de type FPGA permettra de relever le défi en embarquant l'ensemble du système et des traitements à bord de l'engin. L'étude et la réalisation des premiers essais en co-simulation matériel/logiciel ont été réalisées lors du projet de fin d'études d'Antoine Dilly (Dilly, 2007). Ce projet s'est appuyé sur une intégration multi-DEM (245 DEMs) réalisée sur une cible FPGA Virtex-2 XC2V250 (250 000 portes), hautement miniaturisée (12x12 mm, 0,5 g), avec une fréquence d'horloge ajustée à 100 MHz et une fréquence d'échantillonnage des signaux photorécepteurs ajustée à 2,5 kHz (Aubépart et Franceschini, 2005, 2007).

V.4.1. *Flot de conception sur cible FPGA*

Le flot de conception pour développer une application sur une cible matérielle FPGA peut se décomposer en quatre étapes (Fig. V.4.1) :

1) Modélisation de l'application sous forme de blocs fonctionnels au moyen de l'outil *Matlab™*/*Simulink*, permettant de valider le comportement de l'application sous diverses configurations environnementales.

2) Les schéma-blocs décrivant l'application sont traduits sous forme de blocs configurables IP (Intellectual Property) au moyen de la boîte à outils *System Generator for DSP* (*Xilinx™*), en définissant pour certains d'eux la fréquence d'échantillonnage, les formats binaires, et les coefficients numériques des traitements temporels associés.

3) L'interface logiciel *System Generator* permet ensuite de générer le code VHDL de l'application.

4) Ce code VHDL est utilisé comme point d'entrée du flot de conception *Xilinx™*, dont les outils CAO sont regroupés dans l'environnement ISE. A l'issue des étapes de conception, un fichier binaire (.bit) est utilisé pour programmer une cible matérielle FPGA.

L'implantation complète du pilote automatique LORA III sur une cible FPGA nécessite d'importantes ressources internes. Les capacités du FPGA Virtex-2 XC2V250 devenant insuffisantes, les travaux d'Antoine Dilly (Dilly, 2007) ont montré qu'il fallait utiliser un FPGA Virtex-4 XC4FX12 (17x17 mm) dont les capacités de traitement numérique sont supérieures d'un facteur 3,5 par rapport au Virtex-2. Le pilote automatique LORA III tel qu'il est décrit dans la partie **V.2.4** occupe 31% des ressources matérielles (*slices*) du Virtex-4, ce qui permettra d'intégrer sur le robot LORA III des fonctions plus avancées comme le bouclage du lacet par la vision ou l'élargissement du champ visuel.

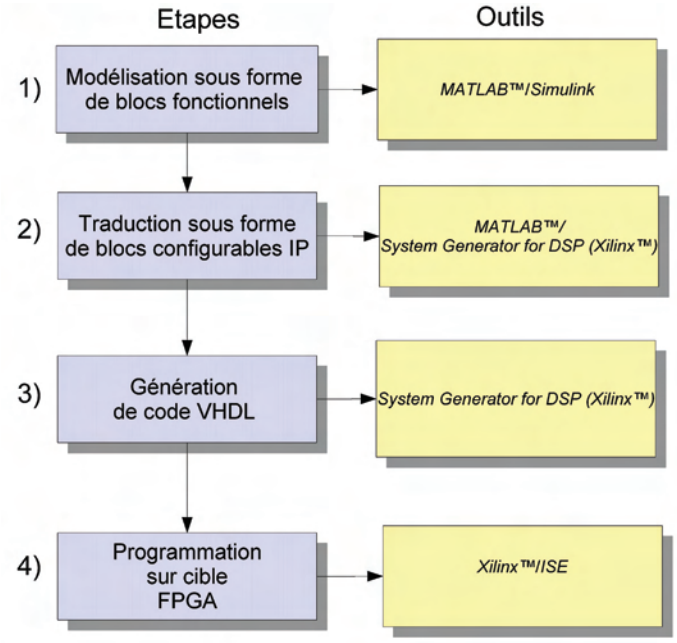

Fig. V.4.1. Méthode descendante de conception et de simulation du pilote automatique LORA III en vue d'une implantation sur une cible FPGA. (Aubépart et Franceschini, 2005, 2007; d'après Dilly, 2007)

V.4.2. *Organisation de la carte LORA*

La carte électronique LORA (Figs. V.4.2.A,B) est alimentée sous 3,7 V par des batteries LiPo. Les convertisseurs LTC3417 fournissent les trois niveaux de tension : 3,3 V, 2,5 V, et 1,2 V nécessaires au bon fonctionnement du FPGA. Un convertisseur à pompe de charge XC9801 délivrant 5 V alimente les circuits électroniques *front end* comprenant les photorécepteurs, les convertisseurs courant-tension, et les amplificateurs (voir Chapitre **VI**). Un générateur d'horloge LTC6905-80 ajuste la fréquence d'horloge à 40 MHz. Un convertisseur analogique-numérique (CAN) ADC108S102 numérise les 8 signaux photorécepteurs sur 10 bits, et un CAN (ADCS101S101) numérise le signal du gyromètre sur 10 bits. Deux convertisseurs numérique-analogiques (DAC101S101) sont utilisés pour la commande du servomoteur de la tête et de la turbine de

sustentation du robot LORA III. Une liaison série de type JTAG entre le PC et le FPGA permet, soit de configurer directement le FPGA (ou sa mémoire flash associée) à chaque mise sous tension, soit de réaliser des co-simulations matériel/logiciel, le FPGA se comportant alors comme un émulateur vis-à-vis de *Simulink*.

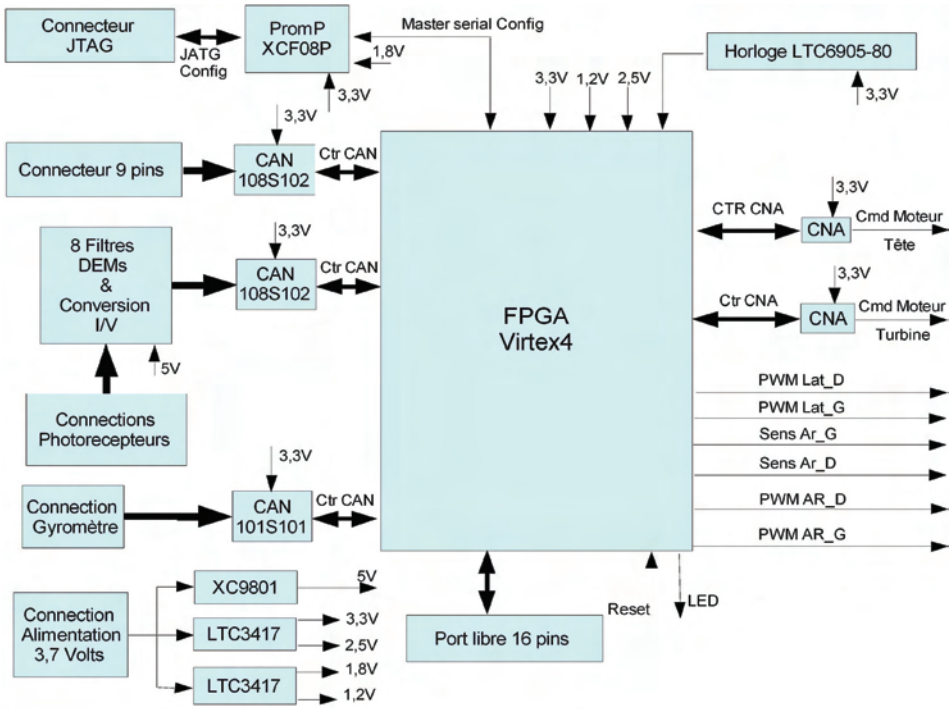

Fig. V.4.2.A. Organisation des entrées/sorties de la carte LORA basée sur un FPGA Virtex-4 XC4FX12. (Dilly, 2007)

En fixant la fréquence d'horloge du FPGA à 5 MHz, la fréquence des boucles visuo-motrices et de l'échantillonnage photorécepteur à 2,5 kHz, la consommation du FPGA (estimée au moyen de l'outil *Xilinx™/Xpower*) est modique (149 mW). La puissance électrique totale consommée par la carte électronqiue LORA (Fig. V.4.2.B) est estimée ~500 mW (pour une taille de 90x50 mm et une masse de 17,3 g), ce qui est tout à fait compatible avec une solution technologique de type embarquée.

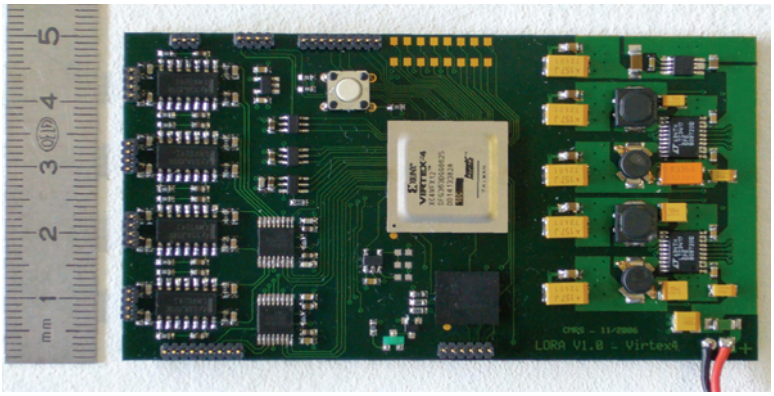

Figure V.4.2.B. Carte électronique LORA. On distingue : sur le tiers droit de la carte, les composants relatifs aux diverses alimentations électriques ; au centre le FPGA Virtex-4 XC4FX12 (17x17 mm) et sa mémoire associée ; sur le tiers gauche le *front end* analogique des pré-traitements DEM (Etapes 3 et 4 du traitement DEM, voir **VI.3.1.**). (d'après, Dilly, 2007)

V.4.3. *Résultats de co-simulation matériel/logiciel*

Les simulations ont été faites sous *Simulink* en utilisant directement les blocs IP de l'outil *System Generator*. Le système visuel du robot LORA simulé possède quatre ommatidies, deux latérales à ±90° des murs (avec $\Delta\varphi$=3,5° et $\Delta\rho$=3,8°), et deux fronto-latérales à ±45° (avec $\Delta\varphi$=2,5° et $\Delta\rho$=2,6°). Le pas temporel de calcul de la simulation est de δt = 400 µs, correspondant à une fréquence d'échantillonnage photorécepteur de 2,5 kHz, la précision spatiale de la simulation est de δθ = 0,005°. Pour obtenir en régime permanent une distance au mur de droite $D_{R\infty}$= 0,24 m et une vitesse d'avance $V_{x\infty}$ = 1 m/s dans un corridor de 1 m de large, il faut choisir les consignes de flux optique suivantes : $\omega_{setSide}$ = 238 °/s et ω_{setFwd} = 314 °/s (Eqs. V.8).

V.4.3.1. *Suivi automatique de paroi*

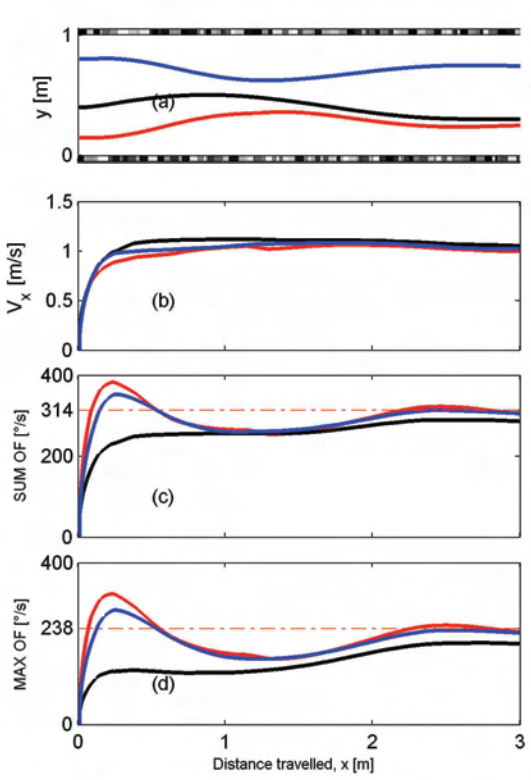

Fig. V.4.3.A. (a) Trois trajectoires simulées de l'aéroglisseur équipé de LORA III avec les mêmes consignes de flux optique $\omega_{setSide}$= 238 °/s et ω_{setFwd} = 314 °/s pour des ordonnées initiales différentes (courbe rouge : y_0 =0,15 m ; noire : y_0 =0,40 m ; bleue : y_0 =0,80 m). (b) Vitesse d'avance V_x. (c) Somme des flux optiques générés (ω_R + ω_L). (d) Maximum des flux optiques générés $max(\omega_R,\omega_L)$. (adapté de Dilly, 2007)

Dans un corridor rectiligne de 3 m de long, le robot LORA III atteint, en régime permanent, une distance de sécurité de $D_{R\infty}$ = 0,24 cm et une vitesse d'avance de $V_{x\infty}$=1 m/s, dès lors qu'il est « accroché visuellement », soit au mur de droite (Figure V.4.3.A, trajectoires noire et rouge), soit au mur de gauche (Figure V.4.3.A, trajectoire bleue).

V.4.3.2. *Réaction automatique à une ouverture*

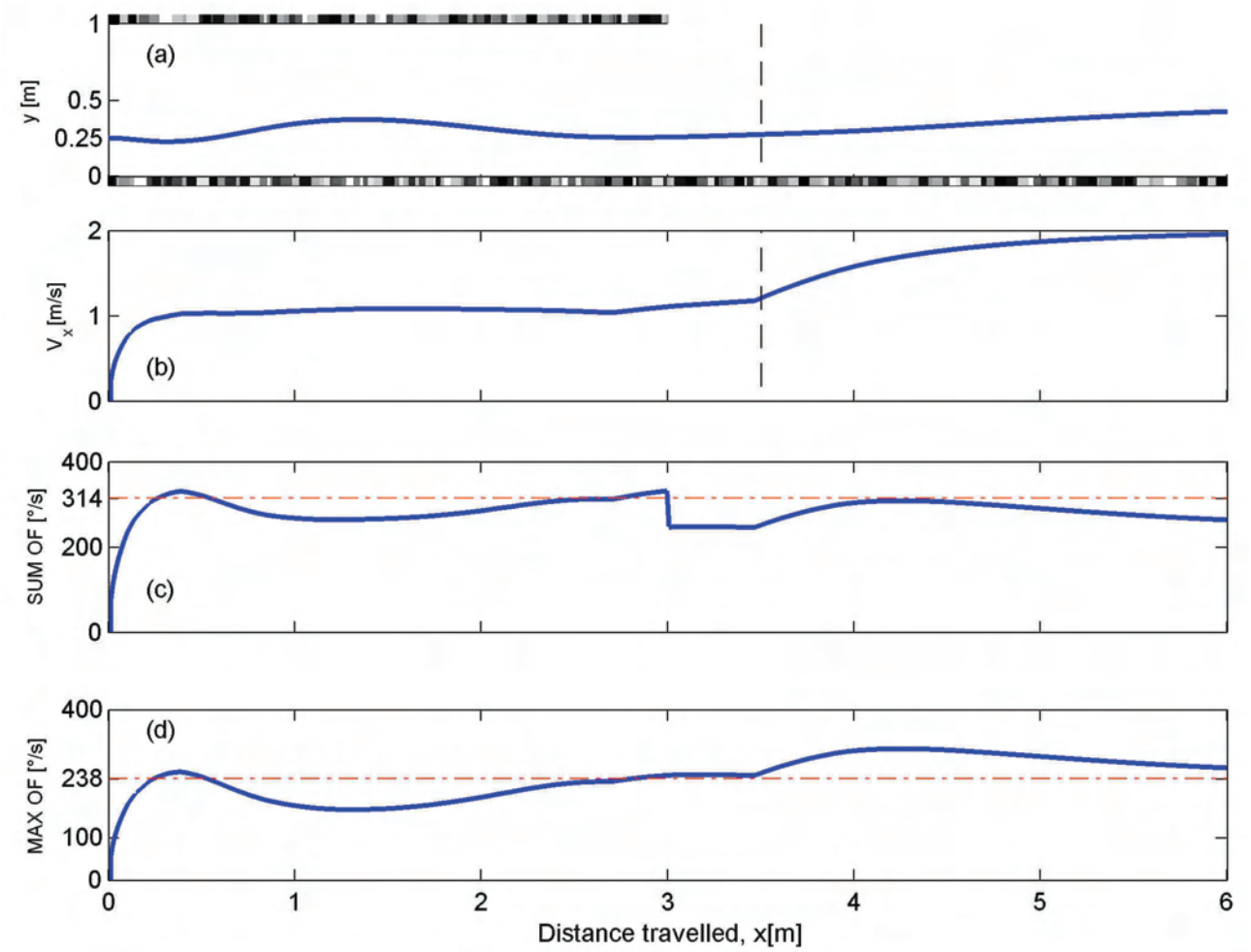

Fig. V.4.3.B. (a) Trajectoire simulée de l'aéroglisseur équipé de LORA III avec des consignes de flux optique telles que $\omega_{setSide}$= 238 °/s et ω_{setFwd} = 314 °/s initialement placé en y_0 = 0,25 m. (b) Vitesse d'avance V_x. (c) Somme des flux optiques générés ($\omega_R + \omega_L$). (d) Maximum des flux optiques générés $max(\omega_R,\omega_L)$. (adapté de Dilly, 2007)

L'ouverture le long du mur de gauche entre X = 3 m et X = 6 m agit comme une perturbation en échelon négatif de flux optique d'amplitude $-V_{x\infty}/D_{L\infty}$ = -75 °/s vis-à-vis du contrôle d'avance (Fig. V.4.3.B). Celui-ci ajuste alors la vitesse d'avance jusqu'à la faire saturer à 2 m/s, du fait qu'il ne peut atteindre la consigne de flux optique d'avance ω_{setFwd}. Le contrôle latéral suit, ajustant la distance au mur de droite proportionnellement à la vitesse d'avance pendant toute la manoeuvre. Il persiste donc une erreur statique sur le contrôle d'avance du fait de la saturation de la commande U_{Fwd}, alors que le contrôle latéral rejette cette perturbation ($\varepsilon_{Side\infty}$ = 0). Le robot LORA atteint un nouveau point de fonctionnement en régime permament $y_{R\infty}$ = 0,48 m et $V_{x\infty}$ = 2 m/s (Eq. V.8.B).

V.4.3.3. *Contrôle automatique de la vitesse dans un corridor fuselé*

Le corridor fuselé agit comme une perturbation non-constante de flux optique. Le contrôle d'avance ajuste la vitesse d'avance (Fig. V.4.3.C.(b)) proportionnellement à la largeur locale du corridor (Fig. V.4.3.D.(b)), largeur variant de 1,24 m à 0,50 m). Le contrôle latéral ajuste proportionnellement la distance au mur de droite par rapport à la vitesse d'avance pendant toute la manoeuvre. Les deux régulateurs de flux optique de LORA III rejettent cette perturbation non-constante de flux optique comme l'attestent les deux derniers graphiques sur lesquels $\omega_R+\omega_L = 314$ °/s et $\omega_R = 238$ °/s tout au long de la traversée du corridor (Figure V.4.3.C(c,d)).

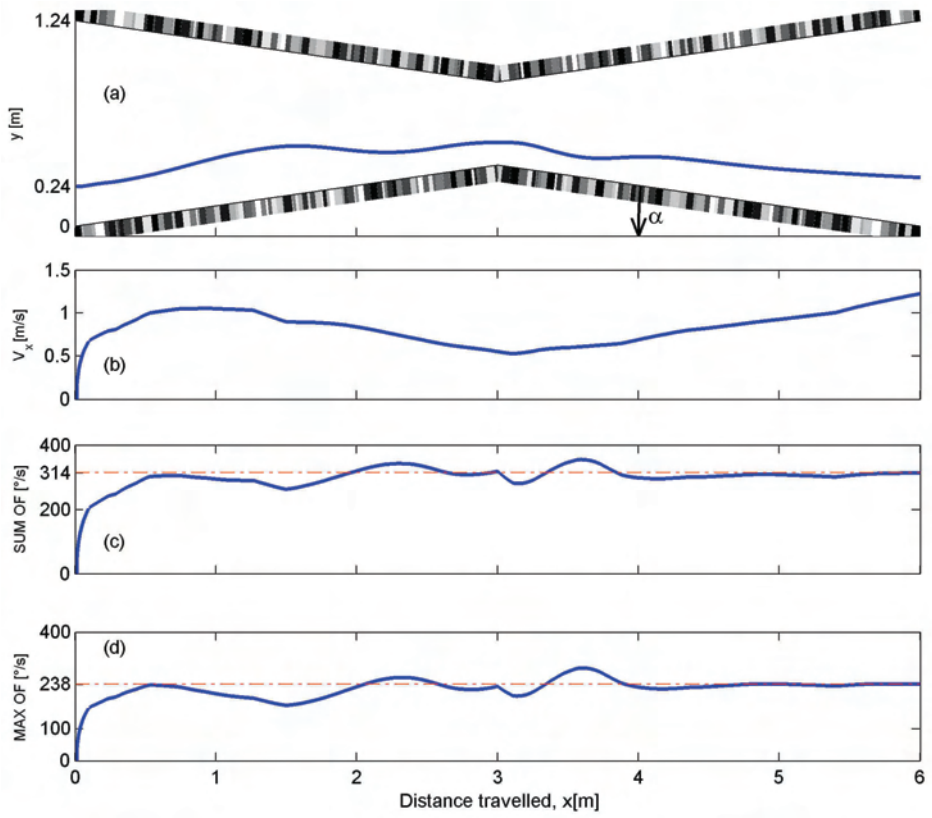

Fig. V.4.3.C. (a) Trajectoire simulée de l'aéroglisseur équipé de LORA III pour des consignes de flux optique : $\omega_{setSide} = 238$ °/s et $\omega_{setFwd} = 314$ °/s. L'engin est initialement placé en $y_0 = 0{,}24$ m. (b) Vitesse d'avance V_x. (c) Somme des flux optiques générés ($\omega_R + \omega_L$). (d) Maximum des flux optiques générés $max(\omega_R,\omega_L)$. (adapté de Dilly, 2007)

On constate que ces simulations, faites sous *Simulink* en utilisant directement les blocs IP de l'outil *System Generator* montrent des résultats assez semblables à ceux de la partie **V.2.4**. Cet outil de conception permettra donc, le moment venu, de tester le schéma de contrôle LORA III sur le robot LORA III rendu totalement autonome.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons construit en trois stades (de la version I à la version III) une boucle visuo-motrice, dénommée LORA, au moyen de simulations sous *Matlab™/simulink*. La construction de cette boucle est motivée par l'ensemble des résultats comportementaux qui ont pu être observés sur le vol libre de l'abeille (Chapitre **IV**). Le but de cette construction est de proposer un *schéma de contrôle explicite* exploitant seulement le flux optique latéral de translation. Cette construction montre qu'une *double régulation du flux optique latéral* permet :

- d'une part de contrôler la vitesse d'avance de l'agent proportionnellement à la largeur locale d'un corridor stationnaire,

- et d'autre part de contrôler la distance au mur le plus proche proportionnellement à la vitesse d'avance.

Une simple consigne de flux optique *bilatéral* (ω_{setFwd}) fixe le coefficient de proportionnalité entre la vitesse d'avance et la largeur locale du corridor, et une simple consigne de flux optique *unilatéral* ($\omega_{setSide}$) fixe le coefficient de proportionnalité entre la distance au mur le plus proche et la vitesse d'avance.

Les agents simulés (robot et abeille) équipés de la boucle visuo-motrice LORA III génèrent des trajectoires semblables à celles observées sur le vol libre de l'abeille, ce qui permet d'envisager l'hypothèse qu'une telle boucle visuo-motrice LORA III pourraît bien être mise en oeuvre dans le système nerveux de l'abeille. Pour évaluer les capacités de la boucle visuo-motrice LORA III en situation réelle, une étude amont a été réalisée pour son application sur une plate-forme robotisée autonome équipée d'un FPGA intégrant les modules de perception et de contrôle. Les résultats de cette étude ont permis de construire une carte électronique qui permettra de réaliser des essais en autonomie totale. Cette phase expérimentale nécessite une validation préalable de l'architecture complète de contrôle avant de la mettre en oeuvre sur FPGA. Pour ce faire, cette architecture sera développée au moyen d'une interface graphique *Matlab™/simulink via* une carte *dSpace™* et d'une plate-forme robotisée par un ombilic dédié à la transmission des commandes et des mesures. Le chapitre **VI** décrit la mise en oeuvre expérimentale de LORA III sur un aéroglisseur miniature rendu totalement actionné.

Chapitre VI. Le robot LORA : conception et réalisation

« It turns out to be better to use the world as its own model. Representation is the wrong unit of abstraction in building the bulkiest parts of the intelligent systems ».

Rodney Brooks [1954-], Roboticien américain

Résumé.....148

VI.1. Choix de la plate-forme robotisée : aéroglisseur totalement actionné.....149

VI.2. Le système visuel de LORA.....150

VI.2.1. L'optique de l'oeil composé élémentaire 4 facettes.....150

VI.2.2. Les angles inter-récepteurs Δφ.....151

VI.2.2.1. L'angle inter-récepteur Δφ pour les deux facettes à φ = ±90°.....151

VI.2.2.2. L'angle inter-récepteur Δφ pour les deux facettes à φ = ±45°.....152

VI.2.3. Les angles d'acceptance Δρ.....153

VI.2.4. Caractéristiques des lentilles et des photorécepteurs.....155

VI.2.5. Vérification expérimentale des caractéristiques optiques.....157

VI.2.6. Tableau récapitulatif des caractéristiques du système visuel de LORA III.....158

VI.3. Les capteurs de flux optique.....159

VI.3.1. Les étapes du traitement d'un DEM bio-inspiré.....159

VI.3.2. Améliorations apportées au DEM mixte.....162

VI.3.3. Modélisation des DEM.....165

VI.3.3.1. Présentation du modèle utilisé.....165

VI.3.3.2. Choix de la constante de flux optique ω_0.....165

VI.3.4. Validation expérimentale des DEM mixtes.....169

VI.4. Le banc d'essai en vol : données techniques.....171

VI.4.1. Le robot LORA III.....171

VI.4.1.1. La sustentation de LORA III 171

VI.4.1.2. Les propulseurs.....172

VI.4.1.3. La distribution de l'énergie.....173

VI.4.1.4. Les capteurs inertiels et angulaires.....173

VI.4.2. Le corridor expérimental.....175

VI.4.3. Câblage du banc de test.....176

VI.4.4. Le poste de commande.....177

VI.4.5. Stabilisation du cap de l'aéroglisseur.....179

VI.4.5.1. Identification de la dynamique en lacet.....179

VI.4.5.2. Boucle à verrouillage de cap.....180

Bilan de la réalisation.....182

Résumé

*Dans ce chapitre nous développerons le dernier volet de notre démarche biorobotique : après avoir observé et appris chez l'abeille (Chapitre **IV**), modélisé son comportement (Chapitre **V**), nous passerons à la réalisation du robot bio-inspiré permettant d'illustrer toutes les potentialités du pilote automatique LORA III en robotique mobile.*

Choix de la plate-forme robotisée

*Le choix s'est porté sur un aéroglisseur miniature que nous avons baptisé LORA III. L'intérêt de cette plate-forme est qu'elle permet de se rapprocher d'un véhicule aérien se déplaçant dans le plan horizontal, ce dernier ne requérant ni contrôle d'*altitude *ni contrôle d'*attitude*. Nous l'avons équipé de deux propulseurs latéraux, en plus des deux propulseurs arrière, afin d'obtenir les déplacements souhaités (deux translations indépendantes dans le plan horizontal).*

Equipements de LORA III

Nous décrirons successivement :

- *Le système visuel équipé constitué seulement de quatre facettes.*
- *Les capteurs de flux optique basés sur des microcontrôleurs dsPIC™,*
- *La plate-forme robotisée LORA III,*
- *Le banc d'essai en vol du robot.*

Chapitre VI. Le robot LORA : conception et réalisation

VI.1. *Choix de la plate-forme robotisée : aéroglisseur totalement actionné*

Expression du besoin

Les objectifs de notre projet nous ont amenés à rechercher une plate-forme *aérienne* dont les degrés de liberté permettent deux translations indépendantes (x, y) dans le plan horizontal et une rotation autour de l'axe vertical (lacet Ψ).

Choix effectué

Nos investigations nous ont amené à choisir une plate-forme dans la famille des aéroglisseurs qui sont des *véhicules amphibies* se déplaçant en sustentation. Une des qualités caractéristiques des aéroglisseurs est qu'ils sont dotés d'une stabilisation intrinsèque en roulis et tangage, ce qui permet de s'affranchir d'un contrôle d'*attitude*.

La sustentation est assurée par un coussin d'air sous pression obtenu par une turbine à air, permettant ainsi de le libérer de tout contact avec la zone survolée. On peut ainsi considérer l'aéroglisseur comme un *véhicule aérien* « volant au ras du sol ».

L'aéroglisseur étant animé d'un mouvement plan sur plan est donc *holonome* parce qu'il est libre de se translater vers l'avant et latéralement (x, y), et de tourner autour de son axe vertical (lacet Ψ).

Il a fallu ensuite faire un choix parmi les différents types d'aéroglisseurs :

- aéroglisseur à un propulseur arrière plus gouverne,
- aéroglisseur à deux propulseurs arrière.

Nous avons retenu le type équipé de deux propulseurs pour sa capacité d'adaptation à notre problème spécifique (commande du lacet).

Modification du produit industriel

L'aéroglisseur retenu ne pouvant pas effectuer de déplacements purement latéraux, il a fallu procéder à l'ajout de deux propulseurs latéraux : latéral droit et latéral gauche.

Pour résumer, notre robot LORA III est un véritable micro-aéronef qui se rapproche au mieux de l'abeille en vol libre 2D dans le plan horizontal.

VI.2. *Le système visuel du robot LORA III*

VI.2.1. *L'optique de l'oeil composé élémentaire*

L'oeil composé élémentaire du robot LORA comporte quatre facettes orientées suivant les azimuts $\varphi \in \{-90°,-45°,45°,90°\}$ par rapport à l'axe de symétrie de l'aéroglisseur (Fig. VI.2.1.) dans le plan horizontal (élévation $\theta = 0$). Cet oeil composé, qualifié de minimaliste, comporte seulement 8 pixels qui sont reliés par paire à un circuit DEM biomimétique. Cet oeil composé est moins ambitieux que celui construit sur le *robot-mouche* en 1992 qui comportait quelques 118 pixels et 116 DEM (Franceschini et al., 1992). Le but de ce travail n'est pas de reproduire un *robot-mouche*, mais de construire un démonstrateur robotisé capable de reproduire des comportements élémentaires observés chez les insectes ailés et ainsi de mieux comprendre les boucles sensorimotrices équipant leur cockpit. Peu de pixels sont nécessaires à la compréhension de telles boucles, c'est pourquoi nous nous sommes limités à quatre facettes disposées selon la Fig.VI.2.1. :

- $\varphi = \pm 90°$ sont 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.
- $\varphi = \pm 45°$ sont les positions azimutales pour la détection du flux optique fronto-latéral. Ces positions azimutales sont les premières à détecter un flux optique à un seuil donné lors de l'approche frontale d'un obstacle (Fernandez Perez de Talens et Taddei Ferreti, 1975). Ces mesures seront exploitées dans la boucle d'évitement d'obstacles frontaux qui pilotera le lacet.
- Les lentilles du système visuel sont placées au plus proche de l'axe de rotation de la tête pour limiter le flux optique de translation intempestif produit par toute rotation de tête (volontaire ou involontaire).

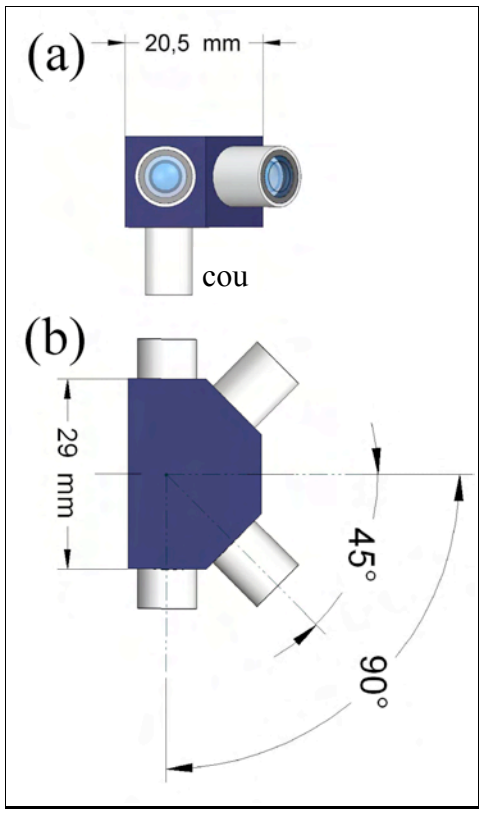

Fig. VI.2.1. Orientations azimutales des facettes de l'oeil composé équipant le robot LORA.
(a) Vue de côté de la tête avec une partie de son cou.
(b) Vue de dessus de la tête montrant l'oeil composé élémentaire à quatre facettes. L'ensemble de la tête, les fils électriques, et le tube creux en fibres de carbone réalisant le cou ne pèse que 12 g.

VI.2.2. *Les angles inter-récepteurs Δφ*

VI.2.2.1. *L'angle inter-récepteur Δφ pour les deux facettes à φ = ±90°*

Nous avons retenu un angle inter-récepteur[1] ***Δφ* = 3,5° pour les facettes à φ = ±90°.**

L'angle inter-récepteur *Δφ* fixe le pas d'échantillonnage angulaire entre deux photorécepteurs adjacents, le circuit DEM mesure le retard temporel **Δt** (mis en correspondance) entre ces deux voies photoréceptrices. Le flux optique ou vitesse angulaire ω est défini comme le quotient $\omega = \Delta\varphi / \Delta t$. C'est donc la plage de mesure des retards temporels **Δt** qui va conférer au circuit DEM sa plage de mesure de flux optique ω.

Justification du choix effectué

Des études neurophysiologiques précédemment conduites au laboratoire ont montré que le neurone H1 de la mouche domestique est sensible à des *mouvements apparents*[2] dans une plage de retards temporels comprise entre 10 ms ≤ Δt ≤ 230 ms (Franceschini, 1985).

Dans notre construction, le retard temporel minimal Δt_{min} **(**~10 ms) est fixé par la précision de la mesure numérique du retard temporel Δt, celle-ci dépendant de la fréquence d'échantillonnage du microcontrôleur (1 kHz, précision de 1ms; 2 kHz, précision de 0,5 ms). Le retard temporel maximal Δt_{max} (~3τ) est fixé par la constante de temps τ de la fonction exponentielle d'approximation[3] de la fonction inverse (pour le *robot-mouche* : Δt_{max} = 600 ms, τ = 0,20 s, vitesse: 0,5 m/s (Franceschini et al., 1992) ; pour le robot OCTAVE : Δt_{max} = 120 ms, τ = 0,04 s, vitesse: 0-3 m/s (Ruffier, 2004)).

Nous retenons ainsi un angle *Δφ* = 3,5° pour les deux facettes latérales orientées à φ = ±90°, qui est similaire à la valeur moyenne de l'angle inter-ommatidial dans les régions latérales d'un oeil composé d'abeille (Seidl, 1982). On disposerait donc d'une plage théorique de mesure de flux optique **15°/s ≤ ω ≤ 350°/s**, qui est une fonction hyperbolique du retard temporel Δt. Il est plus important de mesurer des retards temporels rapides plutôt que lents. De plus, doubler la plage de mesure des retards temporels ne double pas la plage de mesure du flux optique.

1 Voir III.2.1. et Fig. III.2.1.

2 Un *mouvement apparent* est créé par la stimulation optique séquentielle de deux photorécepteurs adjacents. Les neurones détecteurs de mouvement du monde animal répondent aussi bien à des mouvements apparents qu'à des mouvements réels. Mais la présentation de *mouvements apparents* est un moyen d'analyse puissant pour la compréhension du mécanisme sous-jacent.

3 Voir étape 9 du traitement DEM (VI.3.1.)

VI.2.2.2. *L'angle inter-récepteur $\Delta\varphi$ pour les deux facettes à $\varphi = \pm 45°$*

Nous avons retenu un angle inter-récepteur ***$\Delta\varphi$ = 2,5° pour les facettes à $\varphi = \pm 45°$.***

Justification du choix effectué

Lorsqu'on caractérise les angles inter-ommatidiaux $\Delta\varphi$ en fonction de l'orientation azimutale φ des facettes d'un oeil composé naturel, on observe que ceux-ci sont de plus en plus fins vers les pôles du flux optique (Seidl et Kaiser, 1981 ; Seildl, 1982). Cette observation reflète une règle de construction propre au système de détection du mouvement. En effet, le flux optique de translation est atténué par une fonction sinus (Eq. VI.2.2.2.A) vers les pôles du flux optique. Pour compenser cette dépendance, la variable d'ajustement devient l'angle inter-récepteur en fonction de la direction azimutale φ de mesure du flux optique $\omega(\varphi)$ (Equation VI.2.2.2.A), comme cela fut le cas dans l'oeil composé panoramique de 118 pixels du *robot-mouche* (Franceschini et al., 1992). L'ajustement de l'angle inter-récepteur $\Delta\varphi$ en fonction de la position azimutale φ permet ainsi d'utiliser les mêmes traitements temporels pour chacun des circuits DEM (soit 116 DEM identiques pour le *robot-mouche*)

$$\omega(\varphi) = \frac{\Delta\varphi(\varphi)}{\Delta t} = \frac{V}{D} \cdot \sin(\varphi) \qquad \text{Equation VI.2.2.2.A}$$

A partir de l'Eq. VI.2.2.2.A., on peut rendre la mesure du retard temporel Δt indépendante du flux optique latéral pour un quotient *vitesse/distance* (V/D) donné. Cela impose que le quotient $\Delta\varphi(\varphi)/\sin(\varphi)$ soit invariant en fonction de l'angle azimutal φ. Dans ces conditions, toutes les facettes verront *à la même distance D* pour une vitesse donnée V (définissant ainsi un « cercle de vision »). Ceci nous permet de calculer l'angle inter-récepteur $\Delta\varphi$ pour $\varphi = \pm 45°$ (Equation VI.2.2.2.B).

$$\Delta\varphi(45°) = \frac{\Delta\varphi(90°)}{\sqrt{(2)}} \qquad \text{Equation VI.2.2.2.B}$$

On en déduit que $\Delta\varphi(45°) = 2{,}5°$, ce qui est du même ordre de grandeur que l'angle inter-ommatidial dans les régions frontales d'un oeil composé d'abeille (Seidl, 1982).

VI.2.3. *Les angles d'acceptance Δρ*

Nous avons retenu des angles d'acceptance **Δρ = 3,5° pour les facettes à φ = ±90°**

Δρ = 2,5° pour les facettes à φ = ±45°

Justification des choix effectués

L'œil composé échantillonne spatialement l'image projetée sur la rétine entre deux axes optiques adjacents formant un angle inter-récepteur (ou inter-ommatidial) Δφ, la fréquence maximale d'échantillonnage spatial ν_s (Equation VI.2.3.A) est alors donnée par le critère de Nyquist :

$$\nu_s = 1/(2 \cdot \Delta\varphi) \qquad \text{Equation VI.2.3.A}$$

On montre que la courbe de sensibilité angulaire $A(\varphi)$ (Equation VI.2.3.B) d'une ommatidie (ou d'un photorécepteur) peut être approchée par une fonction gaussienne (Götz, 1964; Snyder, 1977).

$$A(\varphi) = A_{max} \cdot e^{-4 \cdot \ln(2) \cdot \left(\frac{\varphi}{\Delta\rho}\right)^2} \qquad \text{Equation VI.2.3.B}$$

Δρ représente la largeur à mi-hauteur de la gaussienne (Equation VI.2.3.B), appelée aussi *angle d'acceptance* de la gaussienne (Δρ est lié à l'écart-type de la gaussienne par la relation suivante : $\Delta\rho^2 = 8 \cdot \ln(2) \cdot \sigma^2$)

La transformée de Fourier d'une gaussienne étant une gaussienne (Equation VI.2.3.C), on peut définir la fréquence de coupure spatiale ν_{co} (Equation VI.2.3.D) comme étant la fréquence spatiale la plus élevée susceptible d'être transmise par une ommatidie (Götz, 1965).

$$TF\{A(\varphi)\}(\nu) = \Lambda_{max} \cdot e^{-\frac{\pi^2}{2 \cdot \ln(2)} \cdot \left(\frac{\nu}{\nu_{co}}\right)^2} \qquad \text{Equation VI.2.3.C}$$

$$\nu_{co} = 1/\Delta\rho \qquad \text{Equation VI.2.3.D}$$

Pour que l'information des photorécepteurs puisse être transmise sans être dégradée vers un circuit DEM, il faut nécessairement que la bande passante spatiale d'un photorécepteur ν_{co} soit supérieure à la fréquence d'échantillonnage spatiale ν_s de l'image projetée sur la rétine (Equation VI.2.3.E).

$$\nu_{co} \geq \nu_s \Leftrightarrow 0 < \Delta\rho/\Delta\varphi \leq 2 \qquad \text{Equation VI.2.3.E}$$

On définit ainsi le *facteur de recouvrement* Δρ/Δφ d'un DEM qui est alors majoré par la valeur 2.

Les mouvements propres de l'agent opère une transformation spatio-temporelle des fréquences spatiales d'un environnement texturé. Au niveau de chaque photorécepteur, les fréquences spatiales ν sont transformées (Equation VI.2.3.F) en fréquences temporelles *f* par le flux optique ω (Landolt et Mitros, 2001).

$$f_{[\mathrm{Hz}]} = \omega_{[°/s]} \cdot \nu_{[\mathrm{cycles}/°]} \qquad \text{Equation VI.2.3.F}$$

Les fréquences temporelles transmises au circuit DEM sont bornées par l'étape de filtrage passe-bande[1] [f_{min}=20Hz; f_{max}=30Hz] qui limite le spectre fréquentiel (Aubépart et Franceschini, 2007; Pudas et al., 2007). Pour une plage de mesure du flux optique telle que ω_{max} = 350°/s et ω_{min} = 15°/s, le circuit DEM est alors sensible à la plage de fréquences spatiales :

$$f_{min}/\omega_{max} \leq \nu \leq f_{max}/\omega_{min}$$

soit une plage de fréquences spatiales de 0,057 c/° ≤ ν ≤ 2 c/° du point de vue du circuit DEM. Cela imposerait un angle d'acceptance Δρ pour transmettre ces fréquences spatiales tel que :

$$0.5° \leq \Delta\rho \leq 17{,}5°$$

On en déduit donc la plage de facteur de recouvrement :

$$0.14 \leq \Delta\rho/\Delta\varphi \leq 5 \quad \text{pour } \Delta\varphi = 3{,}5°$$

L'étape de filtrage spatial nécessitait que $\Delta\rho/\Delta\varphi \leq 2$ (Equation VI.2.3.E) pour éviter tout phénomène de recouvrement de spectre. Cela montre que l'étape de filtrage spatial réalise un véritable *filtre*

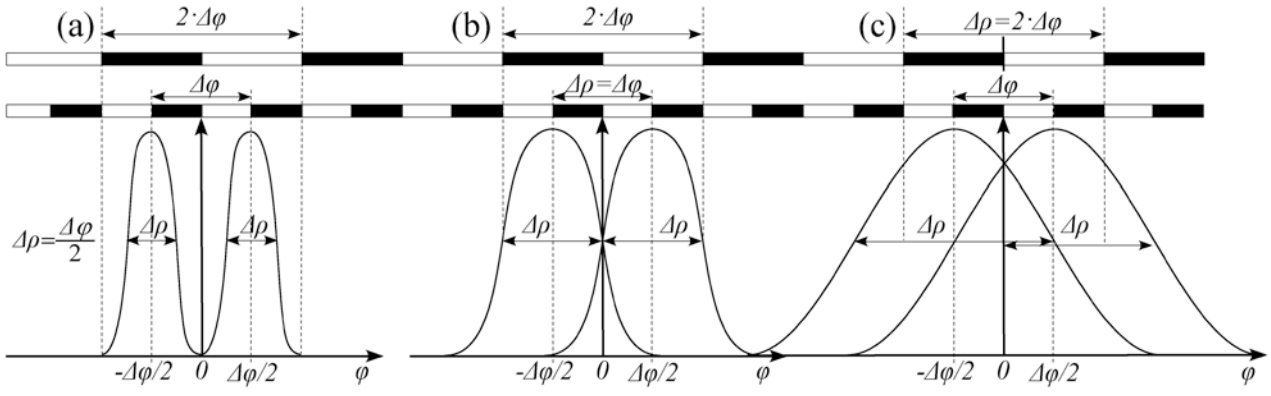

Fig. VI.2.3. Représentation de trois cas distincts de facteur de recouvrement *Δρ/Δφ*.

(a) *Δρ/Δφ*= 0,5 : il subsiste une zone morte entre les deux gaussiennes. Une situation qui généra des taux importants d'erreurs de correspondance du circuit DEM.

(b) *Δρ/Δφ* = 1: l'absence de zone morte entre les deux gaussiennes réduit le taux d'erreurs de correspondance.

(c) *Δρ/Δφ* = 2 : le filtrage spatial gaussien est trop important. Cela réduit les erreurs de correspondance mais dégrade la quantité d'informations utiles au circuit DEM.

1 Etapes 4 et 5 du traitement DEM, voir VI.3.1.

anti-repliement.

Un facteur de recouvrement unitaire (Fig. VI.2.3) satisfait aux contraintes du filtrage spatial ν_{co}=0,28 c/° pour $\Delta\rho$ = 3,5°. L'étape de filtrage spatial prépare l'étape de filtrage temporel et limite les erreurs de correspondance générant des mesures erronées de flux optique. Finalement, on filtre plus temporellement que spatialement. En effet, la fréquence temporelle maximale générée par la fréquence de coupure ν_{co} au niveau d'un photorécepteur est $f_{co} = \omega_{max}.\nu_{co}$ = 350/3,5 = 100 Hz alors que f_{max} = 30 Hz. Un facteur de recouvrement unitaire permettra ainsi aux deux photorécepteurs de détecter simultanément une mire de période angulaire donnée telle que $\Delta\rho = \Delta\varphi$ (Figure VI.2.3.(b)). La mire étant vue par les deux voies photoréceptrices dans la zone morte, cela réduit les erreurs de correspondance.

Götz a montré à partir d'expériences sur la *réaction optomotrice* (voir **III.3.1.**) de la *Drosophile* qu'un facteur de recouvrement $\Delta\rho/\Delta\varphi$ = 0,62 était optimum en se basant sur le modèle de détection du mouvement de Reichardt (Götz, 1965). L'oeil composé des insectes semble être construit tel que le facteur de recouvrement $\Delta\rho/\Delta\varphi$ soit maintenu constant en dépit des faibles angles inter-ommatidiaux occupant le champ visuel frontal, correspondant ainsi à une sorte de *fovea* (Franceschini, 1975). L'oeil composé minimaliste du robot LORA respecte donc cette construction avec un facteur de recouvrement unitaire relativement proche de celui des insectes ailés pour chacune de ses facettes.

VI.2.4. *Caractéristiques des lentilles et des photorécepteurs*

Nous avons retenu une focale ***f* = 6,4 mm pour les facettes à φ = ±90°**

***f* = 10 mm pour les facettes à φ = ±45°**

Justification des choix effectués

L'espacement entre deux photorécepteurs (entraxe photorécepteur *d*) placés dans le plan focal d'une lentille (focale *f*) détermine l'angle inter-récepteur $\Delta\varphi$. Ensuite, pour réaliser la sensibilité gaussienne de chaque photorécepteur, on pratique une légère défocalisation Δd (Netter et Franceschini, 1999). Comme $\Delta d << f$ et $\Delta\varphi$ est un angle de faible valeur (seulement quelques degrés), on obtient :

$$\Delta\varphi = \frac{d}{f}$$ Equation VI.2.4.A

L'Equation VI.2.4.A permet alors de calculer la focale des lentilles coiffant chacune des facettes à partir de l'entraxe photorécepteur *d* et de l'angle inter-récepteur Δφ.

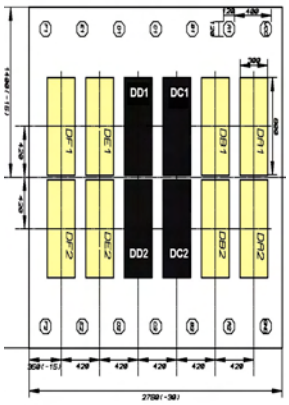

Fig. VI.2.4. Configuration de la surface photosensible de la puce **iC-HAUS LS2C**. Seules les 4 photodiodes centrales sont utilisées et regroupées 2 par 2 (DD1+DD2 et DC1+DC2) pour créer des pixels de 300x1600 µm.

Seules les quatre photodiodes centrales du photocapteur **iC-HAUS LS2C** sont utilisées (Fig. VI.2.4.), les photodiodes DC1 et DC2 sont mises en série pour former le premier photorécepteur, puis les photodiodes DD1 et DD2 sont mises en série pour former le second photorécepteur (Fig. VI.2.4.). Les caractéristiques optiques et géométriques des photodiodes sont décrites dans le Tableau VI.2.4.

La photoconduction est linéaire, le photocapteur **iC-HAUS LS2C** possède un gain en courant interne de 200 (46 dB). La photoconduction linéaire est privilégiée par rapport à celle logarithmique afin d'avoir le meilleur gain possible dans la gamme de luminance utile liée à des expériences conduites en intérieur couvrant deux décades de luminance.

Tab. VI.2.4. Caractéristiques optiques, électriques, et géométriques du capteur **iC-HAUS LS2C**.

Hauteur de la surface photosensible	800 µm
Largeur de la surface photosensible	300 µm
Espacement entre deux photorécepteurs horizontalement verticalement	 200 µm 40 µm
Entraxe inter-récepteur horizontal (pitch)	*d* = 420 µm
Surface photosensible de chaque photodiode groupée deux à deux	0,24 mm² 0,48 mm²
Sensibilité spectrale S(λ) Maximum de sensibilité	400 nm - 950 nm 680 nm
Courant d'obscurité	2,5 nA
Courant maximal	200 nA
Taille de la barrette	2x6

Le nombre d'ouverture est plus élevé pour les facettes orientées à φ = ± 45° que celles orientées à φ = ± 90° du fait du plus faible diamètre de leur lentille par rapport à leur focale. La conséquence est que les photorécepteurs orientés à φ = ± 45° recevront ~5 fois moins de photons ($(f/\Phi)^2 = 5{,}17$) que ceux placés à φ = ± 90° ($(f/\Phi)^2 = 1$). De ce fait, on peut prévoir que la gamme de luminance sera également affectée d'un facteur ~5 entre les facettes latérales et celles fronto-latérales. Les mesures d'éclairement sont réalisées sous éclairage naturel au moyen d'un luxmètre numérique RO1332. La gamme de luminance des facettes à φ = ± 90° est relativement étroite (3,4 lux – 340 lux) avec une résistance de transimpédance, notée R_1 et R_2, de 82 kΩ sur le schéma électrique du DEM mixte (Fig. VI.3.2.C). La résistance de transimpédance des facettes à φ = ± 45° est ajustée $R_1 = R_2 = 470$ kΩ (soit ~5x82 kΩ pour compenser le facteur ~5 introduit par le carré du *f-number*) pour obtenir une même gamme de luminance que les facettes à φ = ± 90°.

Pour remédier à cet inconvénient majeur, l'oeil à facettes des insectes semble être construit de manière à augmenter le diamètre des micro-lentilles proportionnellement à l'augmentation de leur focale lorsque celle-ci se rapproche de la *fovea* (Land, 1981). Ainsi le nombre d'ouverture se conserve malgré les faibles angles inter-ommatidiaux de la *fovea*. La gamme d'éclairement utile serait ainsi quasiment constante sur tous les photorécepteurs d'un oeil composé naturel.

VI.2.5. *Validation expérimentale des caractéristiques des optiques*

Il est nécessaire de valider les choix effectués (Δρ et Δφ) en mesurant, suivant un protocole expérimental décrit ci-après, la sensibilité angulaire des photorécepteurs utilisée dans le système visuel.

Protocole expérimental

La sensibilité angulaire des photorécepteurs est mesurée au moyen d'une source lumineuse ponctuelle blanche placée à un mètre du foyer optique de la facette testée. La facette était entraînée en rotation autour d'un axe vertical par un moteur pas à pas de haute résolution. La résolution angulaire du moteur utilisé en mode micro-pas (soit 3200 pas/tour) a été choisie de telle sorte à avoir une résolution angulaire 30 fois plus faible que l'angle inter-récepteur Δφ = 3,5°, soit 0,11°. La commande du moteur est effectuée par une interface *Matlab*™/*dSpace*™.

Sensibilité angulaire pour les facettes orientées à φ = ±90°

Les lentilles en verre optique BK7 (Newport™ – Micro-Contrôle – Ref. KPX010) de type plan-convexe ont une distance focale $f = 6{,}4$ mm. Elles assurent une bande passante optique de 380 nm à 2100 nm, avec un traitement antireflet large bande (AR.16) et un coefficient de réflexion inférieur à

0.5%. Le tirage de cette lentille est de 2,85 mm. Les meilleurs réglages de défocalisation de la lentille ont conduit aux facteurs de recouvrement : $\Delta\rho/\Delta\varphi = 1{,}2$ et $\Delta\rho/\Delta\varphi = 1$ (Fig. VI.2.5.(a)).

Sensibilité angulaire pour les facettes orientées à $\varphi = \pm 45°$

Les lentilles en plastique de type asphérique (Thorlabs Inc. – Ref. CAX100) ont une distance focale $f = 10$ mm. Leur pic de transmission spectrale se situe à 670 nm (valeur proche du maximum de sensibilité des photocapteurs, Tab. VI.2.4.). Le tirage de ces lentilles est de 8,33 mm. Les meilleurs réglages de défocalisation de la lentille ont conduit aux facteurs de recouvrement : $\Delta\rho/\Delta\varphi = 1{,}1$ et $\Delta\rho/\Delta\varphi = 1$ (Fig. VI.2.5.(b)).

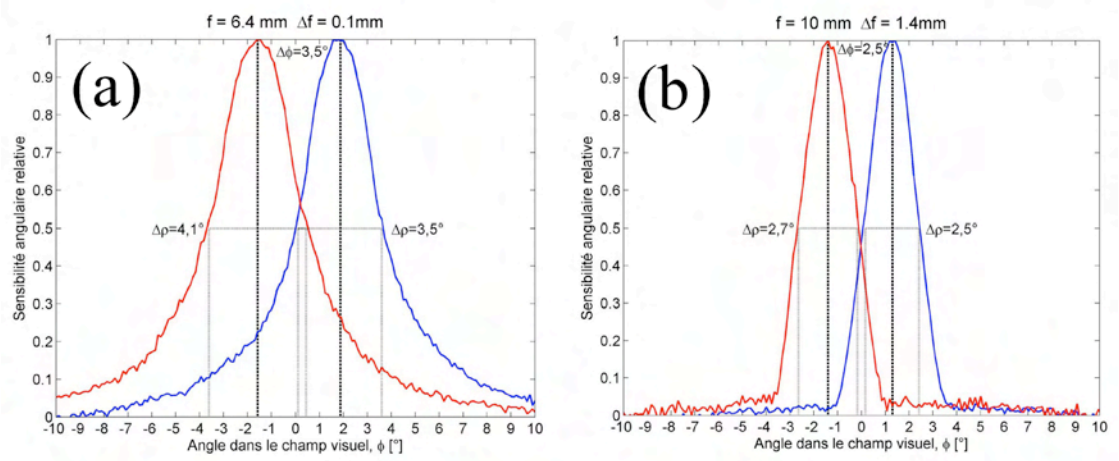

Fig. VI.2.5. Sensibilité angulaire gaussienne des ensembles lentille-photodiodes.
(a) Pour les facettes orientées à $\varphi = \pm 90°$. (b) Pour les facettes orientées à $\varphi = \pm 45°$.

Technologiquement, on ne peut obtenir une égalité parfaite des deux facteurs de recouvrement pour chaque photorécepteur d'une même facette puisqu'on ne peut pas régler indépendamment la défocalisation de la lentille pour chacun d'eux.

VI.2.6. *Tableau récapitulatif des caractéristiques du système visuel de LORA III*

Tableau VI.2.6. Caractéristiques des deux types de facettes.

Orientation azimutale des ensembles lentille-photodiodes	$\varphi = \pm 90°$	$\varphi = \pm 45°$
Angle inter-récepteur $\Delta\varphi$	3,5°	2,5°
Angle d'acceptance $\Delta\rho$	3,5°	2,5°
Distance focale f	6,4 mm	10 mm
Diamètre de la lentille Φ boîtier+lentille	6,35 mm	4,4 mm 6,3 mm
Nombre d'ouverture (*f-number* = f/Φ)	1	2,27
$(f/\Phi)^2$	1	5,17

VI.3. *Les capteurs de flux optique*

Le premier circuit analogique DEM fut conçu en 1986 (Blanes, 1986; Franceschini et al., 1986) et réalisé en technologie CMS. Le principe de ce capteur opto-électronique de vitesse angulaire était inspiré des résultats obtenus à cette époque sur les neurones détecteurs de mouvement de la mouche domestique. La réponse de ces neurones, enregistrée par une microélectrode sur le neurone H1, avait été obtenue lors de micro stimulations optiques de deux cellules photoréceptrices adjacentes à l'intérieur d'une même ommatidie (Franceschini, 1985; Franceschini et al., 1989). Ce DEM constitue une variante du corrélateur de Reichardt (Reichardt, 1957, 1969), et relève davantage d'une opération de mise en correspondance de « faits saillants », sur les deux voies d'un DEM, de transitions lumineuses consécutives (« token-matching scheme » selon la classification d'Ullman, 1981). Ce circuit DEM a été « redécouvert » 10 ans plus tard par une équipe américaine de l'Institut de Technologie de Californie (CALTECH) et dénommé « facilitate-and-sample motion sensor » (Kramer et Koch, 1997).

Nous avons retenu des DEM de type *mixte* (analogique/numérique) basés sur un microcontrôleur dsPic30F2010 de Microchip™, associés à une électronique analogique décrite sur la Fig. VI.3.2.C.

VI.3.1. *Les étapes du traitement d'un DEM bio-inspiré*

Les neuf étapes du traitement DEM ont été largement détaillées dans la thèse de Franck Ruffier (Ruffier, 2004). Ces travaux font état de l'évolution du DEM analogique initialement conçu en 1986 (Blanes, 1986; Franceschini et al., 1986) vers un DEM analogique-numérique, dit *DEM mixte*, conçu en 2002 (Amic, 2002). Nous reprendrons ci-dessous la numérotation des étapes du traitement DEM décrites dans la thèse de Franck Ruffier (Ruffier, 2004).

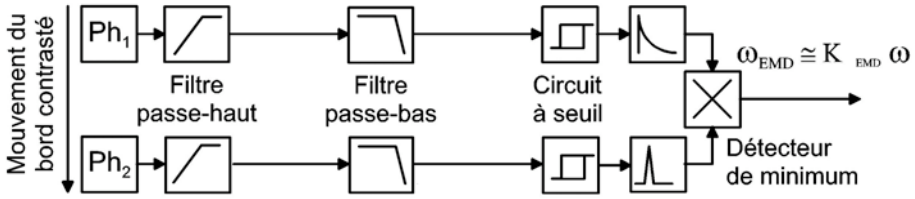

Fig. VI.3.1.A. Version initiale du circuit DEM *analogique*. Il estime le flux optique ω_{DEM} à partir de deux photodiodes PIN (Ph1 et Ph2) qui se trouvent naturellement retardées d'un temps Δt. La sortie résulte de la multiplication d'une exponentielle de longue durée générée sur la voie Ph1 (approchant une fonction inverse) par une brève impulsion générée sur la voie Ph2 (d'après : Viollet et Franceschini, 1999 ; Ruffier et al., 2003).

Le traitement du signal dans un circuit DEM se déroule en neuf étapes décrites ci-après.

***Etape 1*. Echantillonnage spatial** (caractérisé par l'angle inter-récepteur Δφ) :
Deux photorécepteurs (i.e., deux pixels) dont les axes optiques font un angle Δφ, échantillonnent l'espace visuel.

***Etape 2*. Filtrage spatial passe-bas (**caractérisé par l'angle d'acceptance Δρ) :
La défocalisation des deux photorécepteurs derrière une même lentille leur confère une sensibilité angulaire gaussienne caractérisée par une largeur à mi-hauteur Δρ, une fréquence de coupure angulaire ν_{co}=1/Δρ, et une atténuation de 31dB pour $\nu = \nu_{co}$ (Eq. VI.2.3.C).

Les étapes 3 et 4 sont réalisées en électronique analogique :

***Etape 3*. Phototransduction (**caractérisée par la fonction de transfert des photorécepteurs) :
La phototransduction est linéaire et couvre deux décades de luminance. Celle-ci était logarithmique dans le DEM originel (1986), ce qui permettait de couvrir une gamme plus large de trois décades. Récemment, une collaboration avec le département d'Electronique du Centre de Physique des Particules de Marseille (CNRS – CPPM), nous a permis de concevoir un étage de photoconduction logarithmique basé sur une cellule de Delbrück (Aubépart et al., 2007). Celle-ci permet de couvrir une gamme de luminance de sept décades.

***Etape 4*. Filtrage temporel passe-haut (**caractérisé par la fréquence de coupure) :
Ce filtre est un passe-haut du 1er ordre qui agit comme un dérivateur avec une fréquence de coupure de 20 Hz. Cette étape a pour fonction de supprimer la composante continue d'éclairement sur les deux voies photoréceptrices. Elle permet également de maximiser la plage de conversion analogique-numérique (CAN) des entrées du DEM (Fig. VI.3.1.B).

Les étapes 5 à 9 sont réalisées en électronique numérique :

***Etape 5*. Filtrage temporel passe-bas** (caractérisé par la fréquence de coupure)
Ce filtre est un filtre passe-bas du 4ème ordre caractérisé par une fréquence de coupure de 30 Hz. Cette étape a pour fonction de supprimer tout type de parasites susceptibles d'affecter la mesure du DEM : le 50 Hz des alimentations électriques (atténuation 18 dB), le 100 Hz du papillotement de l'éclairage artificiel (atténuation 42 dB), et le 160 Hz de la rotation à 9600 tpm de la turbine à air de l'aéroglisseur (atténuation 58 dB).

***Etape 6*. Seuillage** (caractérisé par la valeur des seuils haut V_{SH} et bas V_{SB}) :
Cette étape sépare les fronts de contraste noir-blanc (appelés « fronts ON ») des fronts blanc-noir (appelés « fronts OFF »). Elle rend la sortie DEM indépendante des fréquences spatiales et du contraste. La sortie DEM ne dépend alors plus que du retard temporel Δt entre les changements

d'états consécutifs et de même nature des deux voies photoréceptrices.

***Etape 7*. Génération, sur la voie 1, d'une impulsion de démarrage du comptage temporel** (caractérisée par les durées minimale Δt_{min} et maximale Δt_{max} du retard Δt) :
Cette première impulsion amorce le début du comptage du temps Δt, soit de façon analogique comme sur le DEM originel par déclenchement d'une exponentielle décroissante de longue durée (Fig. VI.3.1.A), soit de façon numérique comme sur le DEM mixte par démarrage d'un compteur (Fig. VI.3.1.B).

***Etape 8*. Génération, sur la voie 2, d'une impulsion d'arrêt du comptage temporel** :
Cette seconde impulsion se trouve naturellement retardée d'une durée Δt du fait du décalage angulaire $\Delta\varphi$ par rapport à la voie 1 et de la vitesse angulaire ω (i.e., flux optique) par l'équation suivante :

$$\Delta t = \frac{\Delta \varphi}{\omega} \qquad \text{Equation VI.3.1.}$$

***Etape 9*. Estimation de la vitesse angulaire** :
Dans le DEM *originel*, l'exponentielle décroissante de longue durée générée par la voie 1 était échantillonnée par une impulsion générée sur la voie 2 (Fig. VI.3.1.A). La sortie DEM résultait de la multiplication de ces deux voies analogiques. L'exponentielle décroissante de longue durée jouait ici un rôle double, d'une part elle déclenchait le comptage du retard Δt, d'autre part par sa forme et son échantillonnage par la voie 2, elle donnait une image analogique du retard Δt. Sa forme était donc une réelle « table de correspondance analogique » entre le retard temporel Δt et la vitesse angulaire ω (Fig. VI.3.1.A). Dans le DEM *mixte*, cette table de correspondance *analogique* est remplacée par une table de correspondance *numérique* chargée dans la mémoire du microcontrôleur (Fig. VI.3.1.B). Un compteur mesure le temps écoulé Δt entre les deux voies, la vitesse angulaire est ensuite lue dans une table de correspondance $\omega_{DEM}(\Delta t)$.

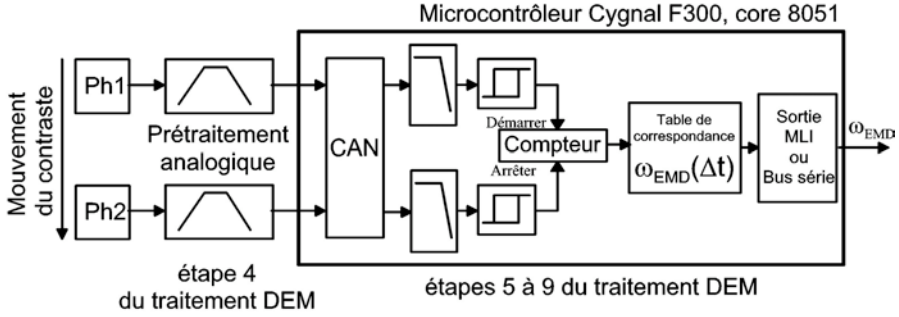

Fig. VI.3.1.B. Dans le DEM *mixte*, les étapes 5 à 9 avec un microcontrôleur de type Cygnal™ C8051F300. On utilise un filtre passe-bas anti-repliement du 1er ordre et de fréquence de coupure 130Hz (Amic 2002, Ruffier et al. 2003).

VI.3.2. *Améliorations apportées au DEM mixte*

Nous avons amélioré le DEM mixte (Amic 2002, Ruffier et al. 2003) en utilisant un microcontrôleur Microchip™ dsPIC30F2010 (Fig. VI.3.2.A-B) pour s'affranchir d'un certain nombre d'inconvénients liés à l'utilisation du microcontrôleur Cygnal™ C8051F300 (résolution temporelle insuffisante sur la mesure de Δt, erreur numérique globale en sortie DEM, etc...). La nouvelle version du DEM mixte est décrite à la Fig. VI.3.2.A et les caractéristiques sont répertoriées

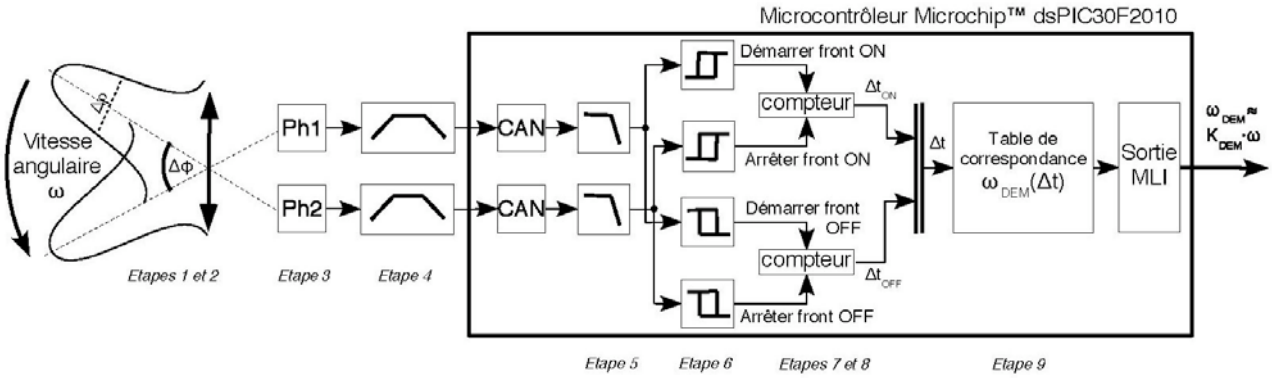

Fig. VI.3.2.A. Schéma fonctionnel d'un DEM mixte nouvelle version. L'étape 6 sépare la mesure des retards dûs aux fronts de contraste ON des OFF. Ces deux retards sont ensuite confondus pour seulement prendre en compte la valeur la plus récente des deux, raffraîchissant ainsi plus fréquemment l'estimation du flux optique.
dans le tableau VI.3.2.A.

Les seuils des comparateurs à hystérésis (étape 6, Fig. VI.3.2.A) sont symétriques et égaux à $V_{SH} = -V_{SB} = 63$ mV. La voie Ph1 déclenche la lecture du compteur libre (16 bits) selon la nature du front de contraste. La voie Ph2 déclenche une nouvelle lecture de ce compteur libre. Le retard Δt est déduit par soustraction des deux valeurs précédentes. Le DEM est redéclenchable, c'est-à-dire que toute impulsion sur la voie Ph1 réinitialise le comptage de la durée Δt. Nous avons également indroduit une logique qui met à jour Δt si et seulement si l'impulsion sur la voie Ph2 est précédée d'une impulsion sur la voie Ph1.

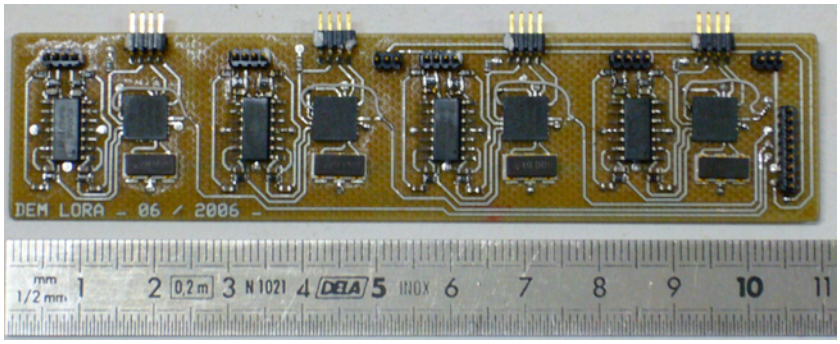

Fig. VI.3.2.B. Photographie de la carte intégrant les 4 DEMs sur 4 µC indépendants. Cette carte d'une dimension de 110x25 mm pèse 8 g. Elle est réalisée sur un circuit imprimé double face de 400 µm d'épaisseur.

Cela évite de mettre à jour Δt lorsque deux impulsions consécutives sont détectées sur la voie Ph2. Les deux valeurs des retards Δt_{ON} et Δt_{OFF} sont fusionnées en prenant en compte la valeur la plus récente des deux. Seuls les retards compris entre 5 ms et 140 ms initient une mesure de flux optique à travers la table de correspondance $\omega_{DEM}(\Delta t)$ (étape 9 du traitement DEM).

Les avantages du DEM mixte utilisé

L'utilisation d'un microcontrôleur dsPIC30F2010 a permis d'améliorer :

1. la précision du calcul du retard temporel Δt, d'un facteur 2 ;

2. l'erreur numérique gobale de la sortie DEM (Tab. VI.3.2.A), d'un facteur 2 (0,5% de la tension de sortie contre 1% avec le microcontrôleur C8051F300) ;

3. les temps de calcul grâce à une multiplication cablée sur 16 bits. Cette multiplication *hardware* lui confère les mêmes capacités de traitement du signal en *nombre flottant* qu'un DSP (*Digital Signal Processor*). Le temps de calculs nécessaire au dsPIC représente 84% (de 0,5 ms) et pourrait être réduite en programmant l'étape de filtre passe-bas (étape 5 du traitement DEM) en virgule fixe, ce qui permettrait encore d'augmenter l'ordre du filtre de l'étape 5 du traitement DEM (Fig. VI.3.2.A).

Ceci permet de réaliser l'étape de filtrage passe-bas d'ordre 4 (étape 5 du traitement DEM) en calcul flottant en utilisant une cellule d'ordre 4 au lieu de cascader deux cellules d'ordre 2. L'utilisation de la boîte à outils Filter Design Toolbox (Version 3.1) de Matlab™ (Version 7.0.1, R14SP1) par la commande : `[B,A] = butter(4,30/(2000/2),'low')` *permet de synthétiser avec une fréquence d'échantillonnage F_e = 2 kHz un filtre numérique passe-bas de Butterworth d'ordre 4, de fréquence de coupure 30 Hz.*

Microcontrôleur ou FPGA	C8051F300	dsPIC30F2010	Virtex- 4 4XC4FX12
Erreur de quantification B_q Tension d'alimentation U CAN	13 mV 3,3 V 8 bits	5 mV 5 V 10 bits	3 mV 1,2 V ; 2,5 V ; 3,3 V 10 bits
Résolution temporelle T_e Fréquence échantillonnage F_e	1 ms 1 kHz	0,5 ms 2 kHz	0,4 ms 2,5 kHz
Erreur d'estimation de ω_{DEM} : B_e $B_e = U \cdot e^{-\frac{\Delta t_{min}}{\tau}} \cdot (1 - e^{\frac{1}{2 \cdot F_e \cdot \tau}})$	32 mV	27 mV	14 mV
Erreur numérique globale B_n $B_n = \sqrt{(B_q^2 + B_e^2)}$	34 mV	27 mV	15 mV
Superficie d'un DEM Taille DEM ou carte Taille µC ou FPGA	540 mm² 20 x 27mm 3 x 3 mm	675 mm² 28 x 25 mm 6 x 6 mm	Carte 4500 mm² 900 x 500 mm 17 x 17 mm
Masse d'un DEM	0,8 g	2 g	17,3 g (4 DEMs)
Consommation de puissance	40 mW	375 mW	500 mW (4 DEMs)

Tab. VI.3.2.A. Tableau comparatif des caractéristiques des microcontrôleurs Microchip™ dsPic30F2010 et Cygnal™ C8051F300, et du FPGA Virtex-4.

4. le temps de configuration et de programmation du microcontrôleur.

Le développement sous Simulink des étapes numériques du traitement DEM sous forme de schéma-blocs a utilisé la boîte à outils Embedded target for dsPIC conçue par Lubin Kerhuel (www.kerhuel.eu/RTWdsPIC). Cette méthode de développement graphique permet d'optimiser facilement les paramètres internes du DEM mixte (étapes 5 à 9 du traitement DEM). L'outil Simulink (Version 6.6 sous Matlab™ R2007a version 7.4) génère un fichier C au moyen des boîtes à outils Real-Time Workshop (Version 6.6) et RTW Embedded Coder (Version 4.6). Les fichiers C sont ensuite automatiquement compilés avec le compilateur C30 de Microchip™. Le fichier généré .hex est ensuite chargé dans le microcontrôleur au moyen de l'outil MPLAB™ IDE (Version 7.60) de Microchip™.

Les limitations du DEM mixte utilisé

On peut relever quelques limitations qui restent cependant acceptables au regard des améliorations apportées :

1. une consommation d'énergie plus importante (facteur 10) liée à la fréquence élevée (2,5 MHz) du microcontrôleur (Quartz : 10 MHz, voir Fig. VI.3.2.C) ;

2. une masse et une superficie plus importantes (facteur 2). Les contraintes d'encombrement ont été dictées par la place disponible à bord du robot plus que par des contraintes de charge utile. La masse d'un DEM est actuellement de 2 g et pourrait être réduite de 25% en optimisant le routage, ce qui représenterait toutefois un DEM deux fois plus lourd que la version antérieure (voir Tab. VI.3.2.A).

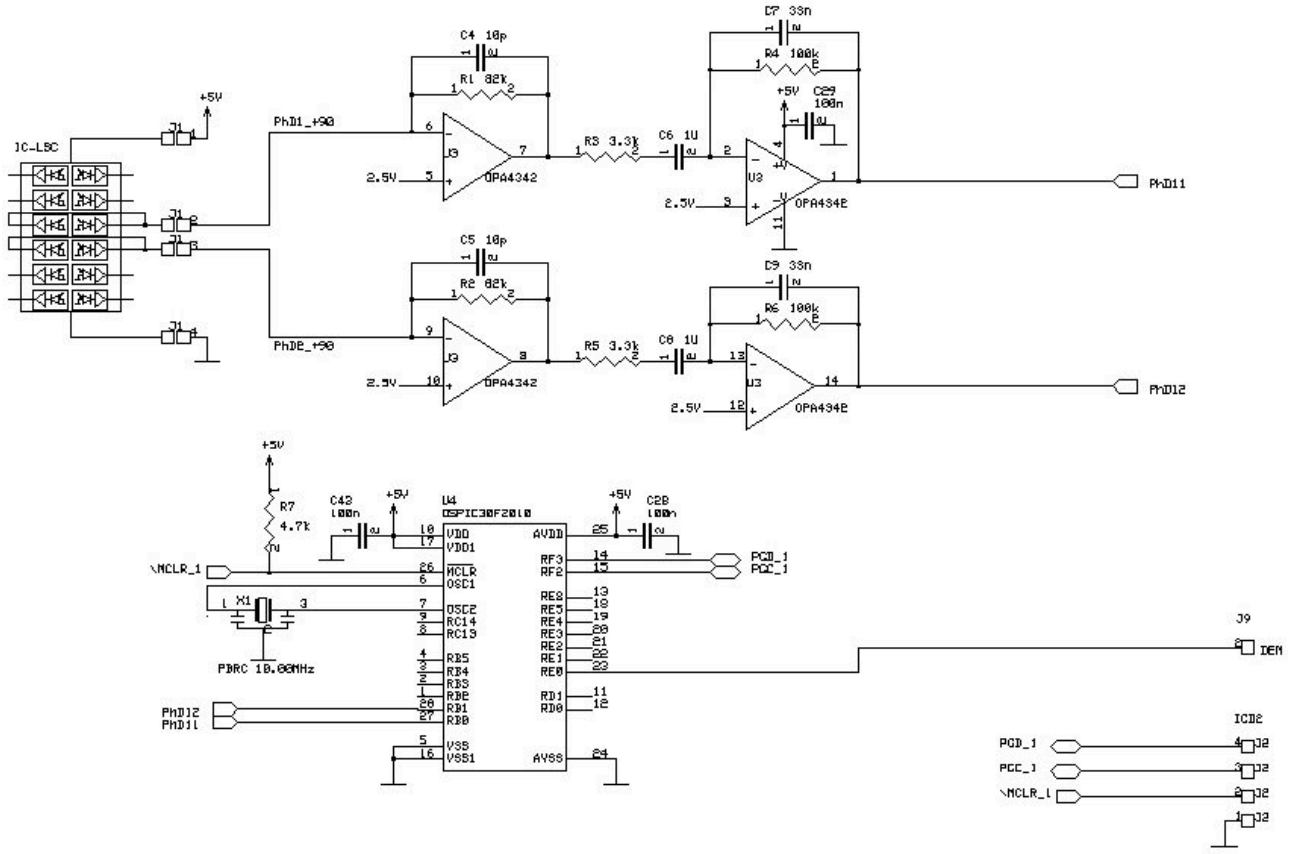

Fig. VI.3.2.C. Schéma électronique du DEM mixte avec son « *front-end* » analogique qui se compose d'un photocapteur IC-Haus, d'un montage transimpédance, et d'une cellule de filtrage passe-bande du premier ordre [20Hz ; 130 Hz].

VI.3.3. *Modélisation des DEM mixtes*

VI.3.3.1. *Présentation du modèle utilisé*

Le modèle associé aux DEM utilisés est celui retenu au laboratoire.
La sortie DEM ω_{DEM} (en volts) est une fonction non-linéaire monotone croissante du flux optique ω (en °/s) (Equation VI.3.3.A) du fait du choix de la fonction exponentielle décroissante pour approcher la fonction inverse reliant le flux optique au retard temporel : ω=(1/Δt)xΔφ. Cette fonction exponentielle était initialement présente dans le DEM purement analogique (Blanès, 1986 ; Franceschini et al., 1986). Cela évite les instabilités numériques pour les faibles retards temporels (lorsque $\Delta t \rightarrow 0$, $1/\Delta t \rightarrow +\infty$ alors que lorsque $\Delta t \rightarrow 0$, $e^{-\Delta t/\tau} \rightarrow 1$).

$$\omega_{DEM}(\omega) = U \cdot e^{\frac{-\Delta\varphi}{\omega \cdot \tau}} \approx K_{DEM} \cdot \omega$$

Equation VI.3.3.A

L'Equation VI.3.3.A peut se mettre sous la forme de l'Equation VI.3.3.B :

$$\omega_{DEM}(\omega) = U \cdot e^{-\frac{\omega_0}{\omega}} \quad ou \quad \omega_{DEM}(\Delta t) = U \cdot e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}$$

Equation VI.3.3.B

Avec $\boldsymbol{\omega_0 = \Delta\varphi / \tau}$ la constante de flux optique, $\boldsymbol{\tau}$ la constante de temps de la fonction exponentielle approchant une fonction inverse, et U = 5 V, la tension d'alimentation du microcontrôleur.

VI.3.3.2. *Choix de la constante de flux optique ω_0*

Pour mettre en oeuvre dans un microcontrôleur l'Eq. VI.3.3.B, il est nécessaire de déterminer la constante de flux optique $\boldsymbol{\omega_0}$. Il faut noter que cette constante dépend de la position azimutale de la facette. Ainsi, nous avons dû déterminer deux valeurs correspondant aux facettes à φ = ±45° et φ = ±90°.

Choix de la constante de flux optique pour φ = ±90°

Cette constante fixe la plage de mesure du flux optique via la constante de temps $\boldsymbol{\tau}$. Au delà du flux optique $\omega_0/4$, la fonction exponentielle décrite par l'Eq. VI.3.3.B ne varie plus (voir Tab. VI.3.3.A). La constante de flux optique $\boldsymbol{\omega_0}$ représente la valeur du flux optique à 63% de la plage de variation de la fonction exponentielle (Tab. VI.3.3.A), ce qui représente environ le point milieu de fonctionnement du DEM. C'est la raison pour laquelle cette même constante positionnera la valeur

de *la consigne du régulateur de flux optique unilatéral* $\omega_{setSide}$. Pour un aéroglisseur dont on souhaite qu'il se déplace à une vitesse de 0,50 m/s à une distance aux murs de 0,3 m, cela conduit à prendre :

$\omega_{setSide} = \omega_0 = 100$ °/s, soit une constante de temps $\tau_{90°} = 35$ ms pour $\Delta\varphi_{90°} = 3{,}5°$

La plage de mesure de flux optique exploitable pour $\Delta\varphi_{90°} = 3{,}5°$ est alors [$\omega_{min} = \omega_0/4 = 25$°/s pour Δt_{max}; $\omega_{max} = 4\cdot\omega_0 = 400$°/s pour Δt_{min}]. Cette plage est codée par pas de 0,5 ms pour des retards temporels compris entre $\Delta t_{min} = 5$ ms et $\Delta t_{max} = 140$ ms (soit 270 valeurs). Il faut ainsi coder les valeurs de flux optique de la table de correspondance $\omega_{DEM}(\Delta t)$ sur 16 bits (Fig. VI.3.3.A.(a)).

Tab. VI.3.3.A. Choix de la constante de flux optique ω_0 en fonction des variations de la fonction d'approximation exponentielle $\omega_{DEM}(\omega)$ (Equation VI.3.3.B).

Flux optique ω Retard temporel Δt	% variations de l'exponentielle
$\omega = \omega_0$ $\Delta t = \tau$	63 %
$\omega = \omega_0 / 2$ $\Delta t = 2 \cdot \tau$	86 %
$\omega = \omega_0 / 3$ $\Delta t = 3 \cdot \tau$	95 %
$\omega = \omega_0 / 4$ $\Delta t = 4 \cdot \tau$	98 %

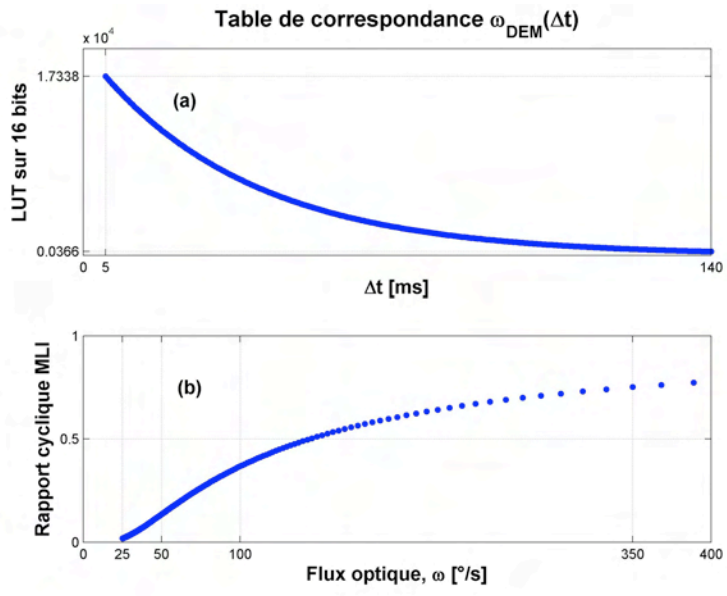

Fig. VI.3.3.A. (a) Table de correspondance du circuit DEM codée sur 16 bits. Les retards temporels inférieurs à 5 ms et supérieurs à $4\cdot\tau = 140$ ms sont inhibés en amont.

(b) Le rapport cyclique de la MLI codant la sortie numérique DEM varie de 2% à 87%. Le flux optique est mesuré sur une plage de 25°/s à 400°/s (soit environ une décade). Le point 50°/s ($\Delta\varphi/(2.\tau)$) correspond au point d'inflexion de la caractéristique où la sensibilité ($\partial\omega_{DEM}/\partial\omega$) est maximale.

La tension de sortie DEM ω_{DEM} est modulée en largeur d'impulsions (type MLI) d'amplitude $U = 5V$ et de fréquence porteuse f_{MLI} = 2 kHz. La plage de rapport cyclique est comprise entre 2% (Δt_{max} = 140 ms, soit U_{min} = 0,1 V) et 87% (Δt_{min} = 5 ms, soit U_{max} = 4,33 V) (Fig. VI.3.3.A.(b)). La sortie MLI est ensuite filtrée passe-bas à 40 Hz (2nd ordre) pour l'interfacer sur un CAN de la carte dspace1104.

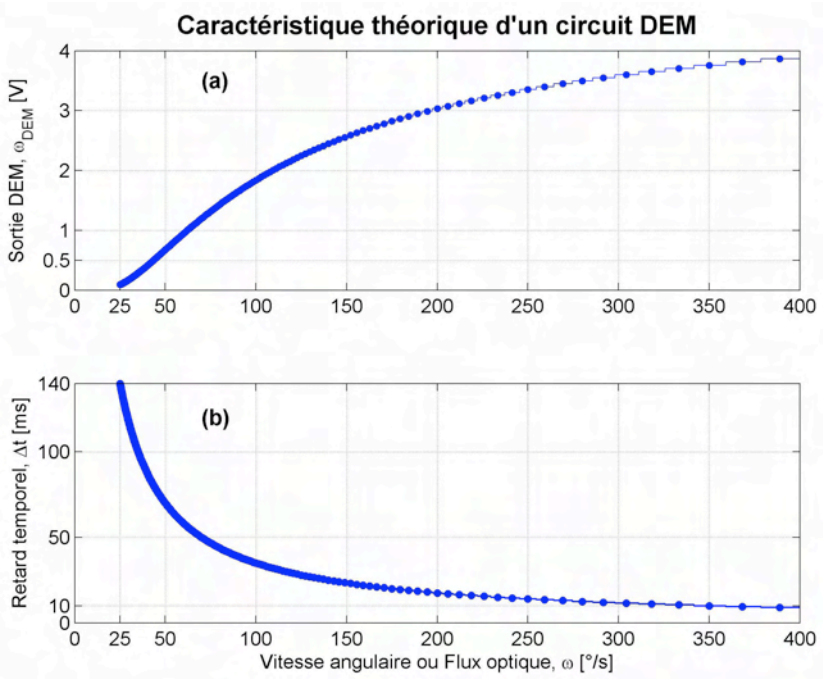

Fig. VI.3.3.B. (a) Caractéristique théorique de la réponse d'un DEM. Le circuit DEM mesure le flux optique sur une plage de 25°/s à 400°/s. Le point 50°/s ($\Delta\varphi/(2.\boldsymbol{\tau})$) correspond au point d'inflexion de la caractéristique où la sensibilité ($\partial\omega_{DEM}/\partial\omega$) est maximale.

(b) Les points bleus représentent les points de calcul discrétisés du flux optique par pas de 0,5 ms, par conséquent plus les retards temporels sont faibles plus la précision de l'estimation du retard temporel Δt est faible. Pour Δt = 10 ms ; le retard est mesuré avec une précision de 5% (fréquence d'échantillonnage photorécepteur F_e = 2kHz, donc T_e = 0,5ms), alors qu'elle est de 0,4% pour Δt_{max} = 140ms.

Choix de la constante de flux optique pour $\varphi = \pm 45°$

Lors d'une tâche de suivi de paroi (Fig. VI.3.3.C), la distance des facettes au mur ne sont pas indépendantes les unes des autres et sont liées par l'Eq. VI.3.3.C :

$$D(\varphi) = D \cdot \sin(\varphi) \qquad \text{Equation VI.3.3.C}$$

Le flux optique dans la direction azimutale φ en fonction du flux optique latéral à l'aplomb du mur s'écrit :

$$\omega(\varphi) = \frac{v}{D(\varphi)} \cdot \sin(\varphi) = \frac{v}{D} \cdot \sin^2(\varphi)$$

donc $$\boxed{\omega(\varphi) = \omega_{90°} \cdot \sin^2(\varphi)} \qquad \text{Equation VI.3.3.D}$$

pour φ = 45°, il vient que $\omega_{45°} = \frac{\omega_{90°}}{2}$ et pour $\omega_{setSide} = \omega_{90°} = 100$ °/s, on en déduit que $\omega_{45°} = 50$ °/s. Cette valeur correspond au flux optique que doit réguler une facette à φ = ± 45°, i.e. le point de fonctionnement ω_0.

Ici $\omega_0 = \omega_{45°} = \Delta\varphi_{45°} / \tau_{45°}$, on calcule alors une constante de temps $\tau_{45°} = 50$ ms pour $\Delta\varphi_{45°} = 2{,}5°$.

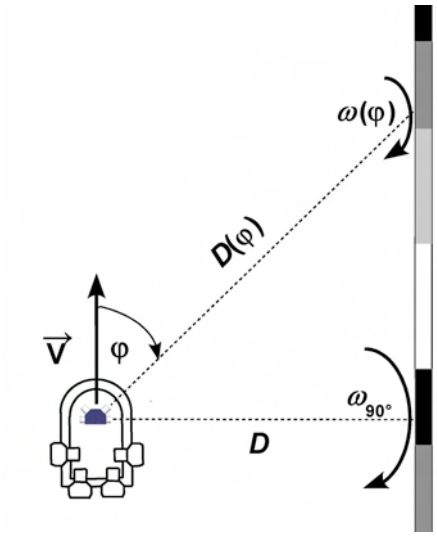

Fig. VI.3.3.C. Flux optiques latéraux lors d'une tâche de suivi de paroi. Le flux optique latéral est, par définition, égal au quotient de la vitesse *V* par la distance *D* à l'aplomb du mur $\omega_{90°} = V/D$. Lorsque le flux optique latéral est régulé, ce sont tous les flux optiques ipsilatéraux qui sont maintenus constants mais à des valeurs plus faibles (Eq. VI.3.3.D) : d'une part à cause de la position azimutale φ de la facette (Eq. VI.3.3.D), et d'autre part à cause de la distance $D(\varphi)$ (Eq. VI.3.3.C).

Le système visuel ipsilatéral de LORA utilise un *plan de vision* qui se superpose à la paroi suivie (Fig. VI.3.3.C) au lieu d'utiliser un *cercle de vision* comme ce fut le cas dans la conception du robot Mouche (Franceschini et al., 1992).

Intégration sensorielle ou action par anticipation ?

Des travaux antérieurs de simulation initiés par Fabrizio Mura sur un suivi de terrain (Mura et Franceschini, 1994; Mura 1995) réalisaient une intégration sensorielle de 49 DEM couvrant un champ visuel ventral de 130°. Pour rendre plus réactive sa boucle de contrôle, la région postérieure était pondérée plus favorablement que la région antérieure (par une fonction en cosinus surélevé). Des travaux plus récents basés sur la *régulation du flux optique ventral* (Ruffier et Franceschini, 2008) plutôt que sur la *régulation d'altitude* (Mura et Franceschini, 1994) ont montré que l'on pouvait utiliser le flux optique fronto-ventral pour incorporer une action par anticipation dans la chaîne directe du régulateur du flux optique. Cette anticipation permet d'améliorer la régulation du

flux optique lors du survol d'un terrain accidenté.

L'intégration sensorielle que nous proposons pour le pilote automatique LORA III vise à améliorer la qualité des flux optiques latéraux mesurés ω_{Rmeas} et ω_{Lmeas} en réduisant leur variabilité (notamment due aux erreurs de correspondance des DEM). Les mesures ipsilatérales de flux optique sont fusionnées en pondérant par un facteur 0,75 le flux optique $\omega_{90°}$ et par un facteur 0,25 le flux optique $\omega_{45°}$ (cette pondération dépend linéairement de la position azimutale de la facette, voir Eq. V.19, voir aussi Dray, 2006, p. 50). Avec un temps de réponse en boucle fermée du contrôle d'avance d'environ une seconde et une consigne de flux optique $\omega_{setSide}$ = 100 °/s, l'aéroglisseur serait capable de franchir des corridors fuselés d'angle $\alpha \approx 30°$ (voir **V.2.4.7**, et Eq. V.16). L'ajout ultérieur d'une action par anticipation dans le pilote automatique LORA III pourrait accroître ses capacités d'évitement d'obstacle (voir Ruffier et Franceschini, 2008).

VI.3.4. *Validation expérimentale des DEM mixtes*

Protocole expérimental

Pour mesurer la caractéristique des DEM, nous stimulons les capteurs de flux optique par une mire aléatoire (Fig. VI.3.4.A.) tapissée de bandes verticales dont les niveaux de gris couvrent 1,7 décades de fréquences spatiales (de 0,008 cycle/° à 0,4 cycle/° lues à une distance de 11,5 cm perpendiculairement au mur) et une décade de contraste optique (de 0,4% à 40%). Cette bande est entraînée linéairement par des rouleaux motorisés (Dray, 2006). La vitesse linéaire V_P de la bande augmente progressivement de 6 cm/s, 8 cm/s, 10 cm/s, puis de 12 cm/s à 76 cm/s par pas de 4 cm/s. La durée de chacun des pas est calculée de telle manière que les capteurs sont stimulés durant deux tours complets de la mire aléatoire (longueur 3,6 m).

La distance de la facette perpendiculairement au mur est fixée à 11,5 cm, ce qui permet de stimuler les capteurs sur une plage de flux optique de 0°/s à 400°/s. L'éclairement de la mire est maintenu à 150 lux de manière à caractériser les DEM au milieu de la plage de phototransduction (voir **VI.2.4.**).

Fig. VI.3.4.A. Mire aléatoire utilisée pour stimuler les capteurs de flux optique.

Résultats expérimentaux

La Figure VI.3.4.B.(a) représente la réponse des DEM en fonction du flux optique latéral à l'aplomb $\omega_{90°}$. L'abscisse porte le flux optique latéral $\omega_{90°}$ car, lors des mesures, le plan de symétrie de la tête du robot est placée parallèlement au mur (Fig. VI.3.3.C). Les deux sorties DEM (90° et 45°) ont donc été enregistrées simultanément. Pour déduire le flux optique $\omega_{45°}$, il suffit de diviser l'axe des abscisses par un facteur 2 (Eq. VI.3.3.D). Le choix de cette représentation a été dicté par le fait que l'oeil à 45° ne travaillera pas à la perpendiculaire du mur lors des expérimentations. C'est la raison pour laquelle, celui-ci a été caractérisé en situation réelle de suivi de paroi.

Les seuils du comparateur à hystérésis du DEM à 45° ont été ajustés à $V_{SH} = -V_{SB} = 83$ mV (étape 6 du traitement DEM) pour obtenir sur les deux DEM ipsilatéraux un même écart-type moyen de 0,11 V entre 30°/s et 400°/s (i.e., une décade de flux optique). La sortie DEM fusionnée réduit cet écart-type à 0,09 V. Cette intégration sensorielle améliore ainsi le rapport signal-sur-bruit du flux optique latéral mesuré dans la direction à 90°. Cette mesure est donc plus robuste sur la plage de 30°/s à 400°/s (Fig. VI.3.4.B.(b)).

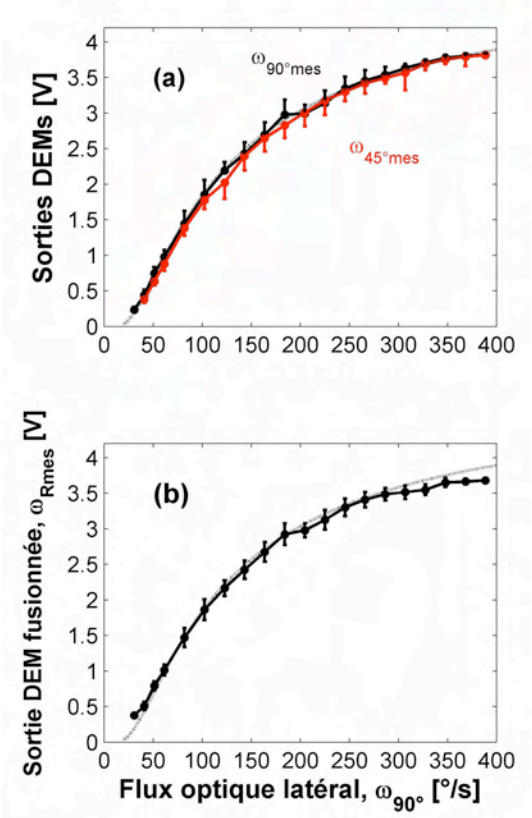

Fig. VI.3.4.B. Caractéristiques des DEMs. La courbe en pointillés représente le profil théorique de réponse des DEM.
(a) Réponse du DEM à 90° (courbe noire) et du DEM à 45° (courbe rouge) en fonction du flux optique latéral $\omega_{90°}$. Le flux optique $\omega_{45°}$ est à lire en divisant par un facteur 2 les valeurs indiquées en abscisse (Eq. VI.3.3.D). L'écart-type moyen sur les deux courbes est de 0,11 V entre 30°/s et 400°/s.
(b) Sortie DEM après intégration sensorielle par une pondération de 0,75 pour le DEM à 90° et de 0,25 pour le DEM à 45°. L'écart-type moyen sur la sortie DEM fusionnée est de 0,09 V entre 30°/s et 400°/s, soit une amélioration de 18% de la mesure du flux optique latéral.

VI.4. *Le banc d'essai en vol : données techniques*

VI.4.1. *Le robot LORA III*

Pour mettre en pratique le principe de guidage du pilote automatique LORA III (voir Chapitre **V**) sur un véhicule aérien, nous avons modifié un aéroglisseur miniature radiocommandé (Taiyo Toy Ltd., Typhoon T-3 : 36 x 25 x 14 cm, Fig. VI.4.1) tant du point de vue sustentation que du point de vue des actionneurs. Deux accumulateurs ont été placés à bord : un accumulateur de puissance pour alimenter les actionneurs (tension : 7,4 V, capacité : 2200 mAh, type : LiPo PolyFlash 2200-2S 15C, courant de décharge max 22 A en pointe, dimensions : 96x34x17 mm, masse : 108 g), et un accumulateur de faible puissance pour l'électronique embarquée (tension : 7,4 V, capacité : 310 mAh, type : 2 éléments LiPo WES-Technik 310, dimensions : 52x25x15 mm, masse : 17 g). Ces accumulateurs permettent à l'aéroglisseur miniature de voler de façon autonome pendant ~20 minutes. Une fois robotisée, la plate-forme pèse 825 g dont 125 g de batteries (LiPo).

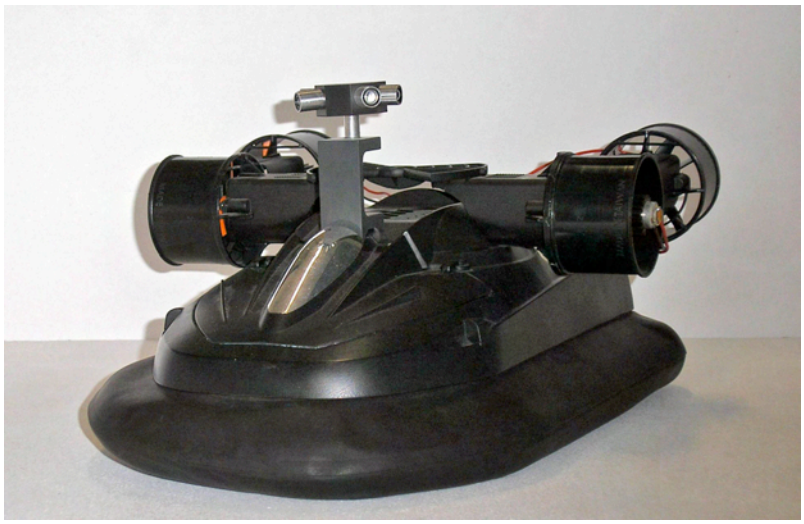

Fig. VI.4.1. L'aéroglisseur miniature robotisé : robot LORA III (dimensions : 36 x 25 x 14 cm, masse totale 0,82 kg). Le robot est rendu *totalement actionné* par l'ajout de deux propulseurs latéraux en plus des deux arrière. Le robot est équipé d'un système visuel *minimaliste* comprenant quatre facettes.

VI.4.1.1. *La sustentation de l'aéroglisseur*

La turbine de sustentation gonfle le coussin d'air de l'aéroglisseur, ce qui lui permet de se sustenter à une hauteur sol d'environ ~2 mm. L'axe de la turbine est placé au centre de gravité G de l'aéroglisseur. La turbine est motorisée par un moteur *brushless* (Tab. VI.4.1.1.). Ce moteur est piloté par un variateur commandé par une tension analogique de 2,5 V, ce qui entraîne la turbine à 8000 tours/min par un courant de 4 A sous 7,4 V. Cette fréquence de rotation génère des vibrations

à 133 Hz. Les mesures de flux optique ne seront pas affectées par ces vibrations du fait de l'étape de filtrage passe-bas (ordre 4) des signaux photorécepteurs à 30 Hz (étape 5 du traitement DEM, voir **VI.3.1.**).

Micro Rex 220/3-3200 Flyware™	Motorisation	Moteur DC *Brushless* à 10 paires de pôles (moteur synchrone triphasé à cage tournante)
	Variateur	Flyware™ **Sinus 6A** BEC 1,5 W 18x24x3.5 mm ; 7 g
	Voltage	7,4 V
	Résistance d'induit	260 mΩ
	Courant maximal	5 A
	Vitesse de rotation	3200 (tours/min)/V
	Masse	11 g
	Ø x *h*	22x15 mm

Tab. VI.4.1.1. Caractéristiques du moteur de la turbine de sustentation de l'aéroglisseur miniature Fig. VI.4.1.

VI.4.1.2. *Les propulseurs*

Quatre nouveaux propulseurs (turbines carénées) identiques ont été installés (deux propulseurs latéraux ajoutés et deux propulseurs arrière remplacés) (Tab. VI.4.1.2). Deux propulseurs placés à l'arrière du véhicule permettent de le translater vers l'avant (commande en mode commun) ou de l'entraîner en rotation autour de son axe vertical (commande en mode différentiel), le bras de levier entre une turbine et le centre de gravité étant de 9,5 cm. Deux propulseurs ont été placées latéralement et orthogonalement aux précédents pour permettre au véhicule de translater de côté (vers tribord ou bâbord). Ces deux turbines sont commandées de façon alternée. La direction de poussée des turbines latérales est alignée sur le centre de gravité G de l'aéroglisseur.

	Motorisation	Moteur DC CN12-RXC (17 g) (moteur à courant continu)
	Voltage	7,2 V
	Courant maximal	3,4 A
	Puissance max.	24,5 W
	Force de poussée maximale	0,72 N (72 g)
	Profil de l'hélice	Non symétrique (poussée unidirectionelle)
	Vitesse de rotation	3540 (tours/min)/V
	Masse turbine	30 g
GWS™ EDF-50	Ø x *h*	51x46 mm

Tab. VI.4.1.2. Caractéristiques des turbines carénées GWS EDF-50 (http://www.gws.com.tw) dont quatre exemplaires (masse totale 120 g) ont été montés à bord de l'aéroglisseur miniature Fig. VI.4.1.

VI.4.1.3. *La distribution de l'énergie*

L'énergie électrique est fournie par des accumulateurs LiPo. L'accumulateur de puissance est relié à la carte moteur (Fig. VI.4.1.3). Un microcontrôleur code en PPM (*Pulse Position Modulation*) la tension analogique de commande de la turbine de sustentation pilotant le variateur du moteur *brushless* (voir Tab. VI.4.1.1.). Les turbines latérales sont pilotées en MLI par des hacheurs simples quadrants (quadrant I dans le plan tension-courant conduisant à un sens unique de rotation du moteur). Les propulseurs arrière sont pilotées en MLI par des hacheurs doubles quadrants (quadrants I et III dans le plan tension-courant pour un double sens de rotation du moteur). Un signal logique commande l'inversion du sens de rotation des turbines postérieures. Le profil de l'hélice étant non symétrique, l'inversion de la poussée des turbines manque cruellement d'efficacité, ce qui nécessite de mettre les gaz au maximum pour observer un faible freinage. Pour y remédier, on peut aussi imaginer un couplage avec la commande de la turbine de sustentation lors des phases de freinage (en la réduisant) pour augmenter le coefficient de frottements visqueux avec le sol, ce qui améliorerait efficacement le freinage du véhicule.

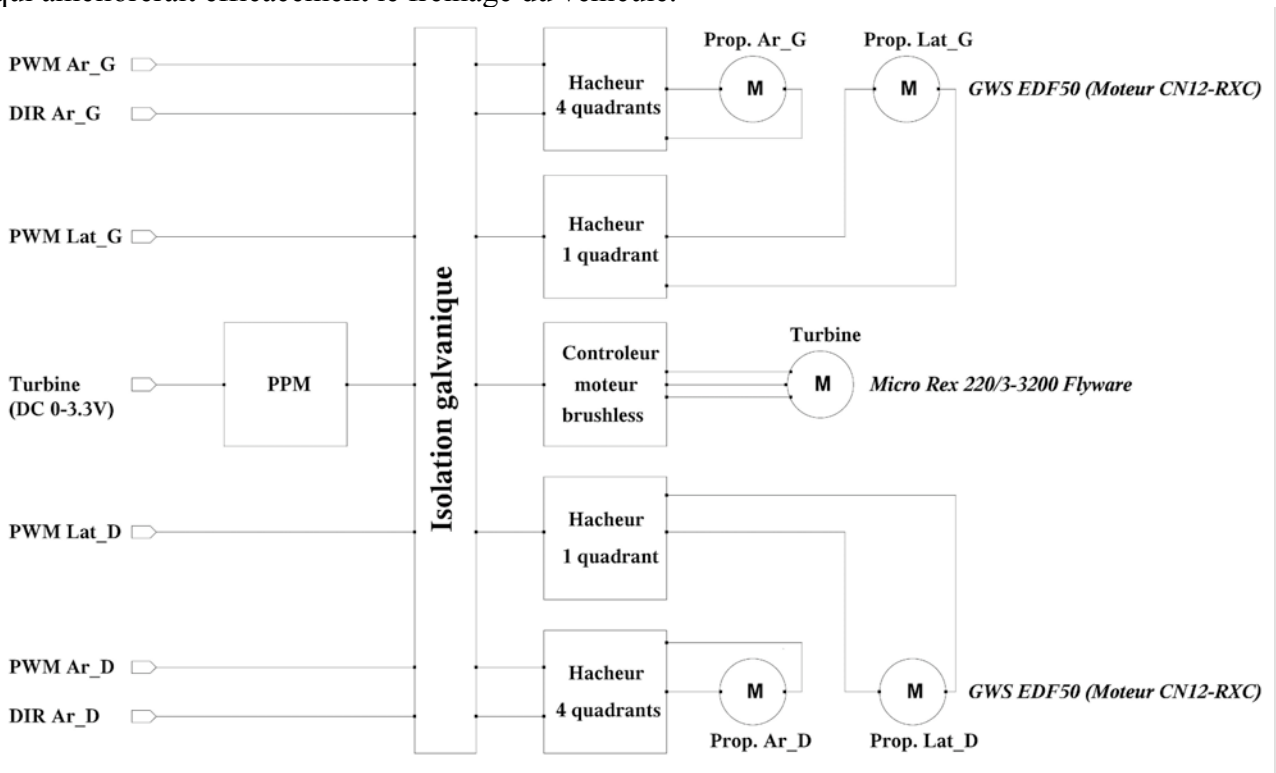

Fig. VI.4.1.3. Carte moteur distribuant l'énergie électrique aux cinq actionneurs du robot LORA.

VI.4.1.4. *Les capteurs inertiels et angulaires*

Les différents capteurs sont :

- un micro gyromètre (*Analog Devices*™, type ADXRS300, voir Tab. VI.4.1.4.A), dont les caractéristiques ont été identifiées dans Kerhuel et al. (2007), et dont la sortie est analogique, mesure la vitesse de rotation du véhicule autour de son axe vertical (axe de lacet). Ce micro gyromètre est utilisé dans la boucle de stabilisation de cap de l'aéroglisseur (voir **VI.4.5.2**).

Vitesse de rotation	± 300 °/s
Bande passante	40 Hz
Sensibilité	K_g = 5 mV/(°/s)
Voltage	5 V (ref. 2,5 V)
Courant consommé	6 mA
Amplification de sortie	3,33
Masse	0,5 g
Dimensions	7x7x3 mm

Tab. VI.4.1.4.A Caractéristiques du micro gyromètre **ADXRS300** de *Analog Devices*™.

- un micro accéléromètre analogique (*VTI Technologies*™, type SCA600-C21H1G, voir Tab. VI.4.1.4.B) a été monté à bord du robot pour observer son accélération longitudinale.

Accélération	± 1 g_n 1 g_n = 9,81 m/s^2
Bande passante	50 ± 20 Hz
Sensibilité	K_a = 2 V/g_n
Voltage	5 V
Courant consommé	2 mA
Tension de référence	2,5 V
Masse	1 g
Dimensions	11x9x5 mm

Tab. VI.4.1.4.B Caractéristiques du micro accéléromètre **SCA600-C21H1G** de *VTI Technologies*™.

- un micro compas magnétique (*Honeywell*™, type HMC6052 associé à deux ponts de Wheastone magnétorésistifs, voir Tab. VI.4.1.4.C) mesure la position angulaire azimutale absolue de l'aéroglisseur (axe de lacet). Cette information permettra au robot de maintenir son cap de manière robuste.

Angle	360°
Précision	0,3°
Sortie	Numérique sur 10 bits
Sensibilité	K_{compas} = 9,17 mV/°
Voltage	3,3 V
Courant consommé	20 mA
Masse	2 g
Dimensions	24x18 mm

Tab. VI.4.1.4.C. Caractéristiques du micro compas magnétique.

VI.4.2. *Le corridor expérimental*

Le robot LORA III est testé dans le même corridor que celui dédié aux enregistrements des trajectoires d'abeilles (voir Chapitre **IV**). Le corridor forme une arène rectangulaire de 3x0,95 m, la caméra numérique *Prosilica*© EC1280 est placée à 1,6 m au dessus du corridor (Fig. VI.4.2), celle-ci est équipée d'un objectif (*Pentax*©, 4,8 mm) dont le champ est de 96°. Elle permet de filmer l'ensemble de la surface de l'arène. Le corridor est équipé de rouleaux motorisés générant, le long des 1,5 m de la partie centrale du mur droit, une vitesse relative -1,5 m/s $\leq V_p \leq$ +1,5 m/s (Dray, 2006). Les rouleaux motorisés permettent de tester le robot dans un corridor non-stationnaire, en introduisant une perturbation sur le pilote automatique LORA III par des échelons positifs ou négatifs de flux optique (voir **V.2.4.6**). Les murs sont tapissés de bandes verticales de période spatiale λ = 10 cm et de contraste m = 0,68 (mesuré dans la zone de sensibilité optimale des photorécepteurs, i.e, en proche IR). Ces bandes verticales sont relativement étroites avec un fort contraste optique, ce qui permet de rafraîchir efficacement la mesure du flux optique, et conférant ainsi au pilote automatique LORA III un bon rapport signal-sur-bruit.

Les axes visuels du robot LORA III se situent à 15 cm au dessus du sol, ce qui est en adéquation avec une hauteur des murs de 25 cm (Fig. VI.4.2). En effet, le champ de vue des facettes latérales est de 15° (10° pour celles fronto-latérales) et se projette sur une hauteur maximale de 10 cm lorsque le robot longe de façon rasante l'un des deux murs. Les yeux du robot ne perçoivent donc que les contrastes présents sur les deux murs, durant les expérimentations, et aucunement les contrastes situés hors du corridor dans la salle d'expérimentation.

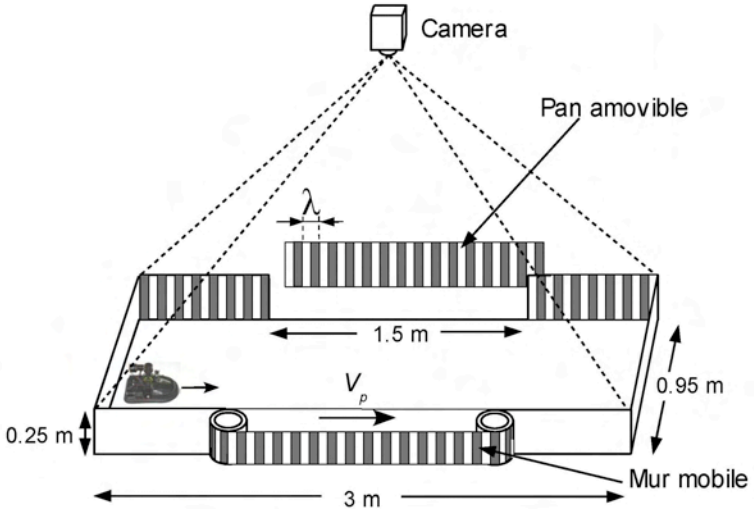

Fig. VI.4.2. Corridor expérimental servant à tester le robot LORA III est identique à celui utilisé pour filmer le vol des abeilles. Il incorpore ici des rouleaux motorisés permettant de générer des perturbations de flux optique, sous la forme de mouvements relatifs (progressifs ou régressifs à une vitesse V_p) le long des 1,5 m de la partie centrale du mur droit (Dray, 2006). L'environnement visuel est le même que celui utilisé pour filmer les abeilles dans un corridor non-stationnaire (Ogier, 2007), il se compose de bandes verticales de période λ = 10 cm et de contraste m = 0,68. La partie centrale du mur gauche est amovible sur une longueur de 1,5 m pour tester l'effet d'une absence unilatérale de flux optique. La caméra numérique équipée d'un objectif grand angle (96°) est placée à 1,6 m au dessus du corridor.

VI.4.3. *Câblage du banc de test*

Un collecteur tournant 24 voies (courant maximal par voie : 2 A) est installé au sommet d'un mât de 1,4 m de hauteur (Fig. VI.4.3). Un bras articulé, construit en tubes de carbone pultrudé, porte l'ombilic aérien qui permet d'acheminer vers le robot les signaux de commande, et de récupérer les mesures visuelles et inertielles issues de l'aéroglisseur (Tab. VI.4.3, Fig. VI.4.3). L'électronique embarquée est alimentée par un accumulateur LiPo (7,4 V/ 310 mAh) relié à un régulateur de tension LM1117 (5 V/ 0,8 A) et la partie puissance par un accumulateur LiPo (7,4 V/ 2200 mAh). Pour l'électronique de commande de la puissance, deux isolations galvaniques sont nécessaires :

- des amplificateurs linéaires d'isolement et des magnétocoupleurs pour isoler la carte dSpace,
- des magnétocoupleurs pour isoler l'électronique de commande de la carte moteur.

Nb. fils	Brochage dSpace	Type de signal
8	-	Nombre de fils restants disponibles
1	GND	Masse électronique
Signaux descendants		
4	PWM1-4	Commande des propulseurs (type MLI 1 kHz)
2	S1 et S3	Sens des propulseurs arrière (logique)
1	DAC1	Commande de la turbine de sustentation (analogique)
1	DAC2	Commande d'un éventuel actionneur de tête du robot
Signaux montants		
4	ADC1-4	Capteurs de flux optique (MLI 2 kHz filtré passe-bas)
1	ADC5	Gyromètre ADXRS300
1	ADC6	Accéléromètre SCA600-C21H1G
1	ADC7	Compas magnétique HMC 6052

Tab. VI.4.3. Signaux électriques descendants et montants acheminés à travers un collecteur tournant 24 voies.

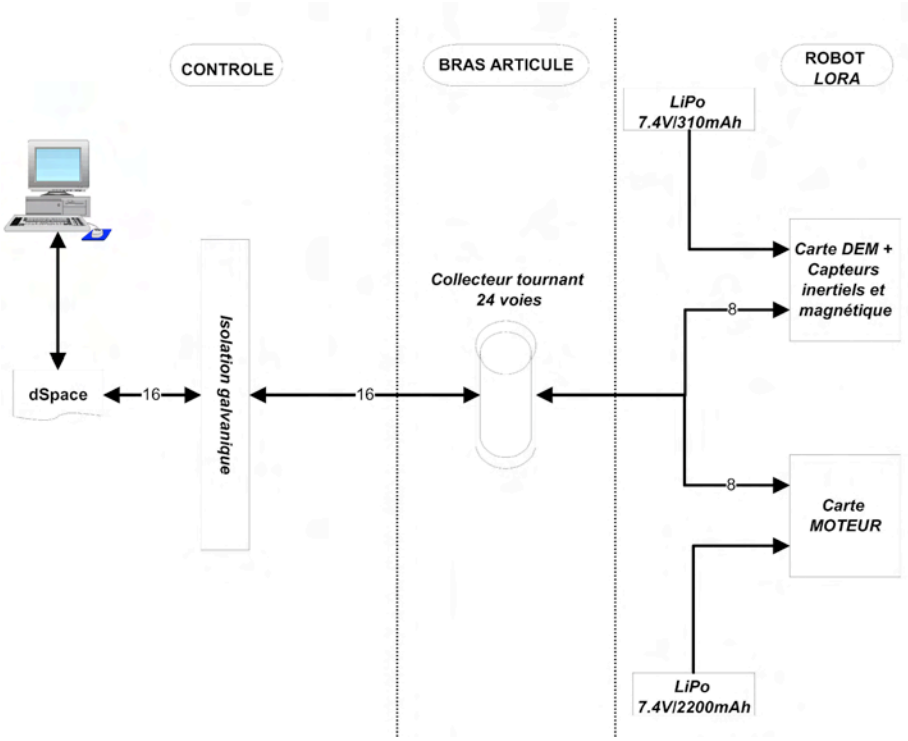

Fig. VI.4.3. Le robot embarque deux accumulateurs LiPo pour ses besoins en énergie. Une isolation galvanique protège la carte dSpace vis-à-vis du robot, une autre isole l'électronique de commande de la partie puissance au niveau de la carte moteur du robot (Fig. VI.4.1.3.). Un collecteur tournant 24 voies, dont les frottements et l'inertie sont faibles, assure l'acheminement des signaux électriques.

VI.4.4. *Le poste de commande*

Un PC équipé d'une carte d*Space*™ DS1104, équipée d'entrées/sorties analogiques et numériques, du logiciel *Matlab*™/*Simulink* avec l'interface graphique développée sous *Simulink* permet de contrôler la sustentation et les quatre actionneurs équipant le robot (Fig. VI.4.4).

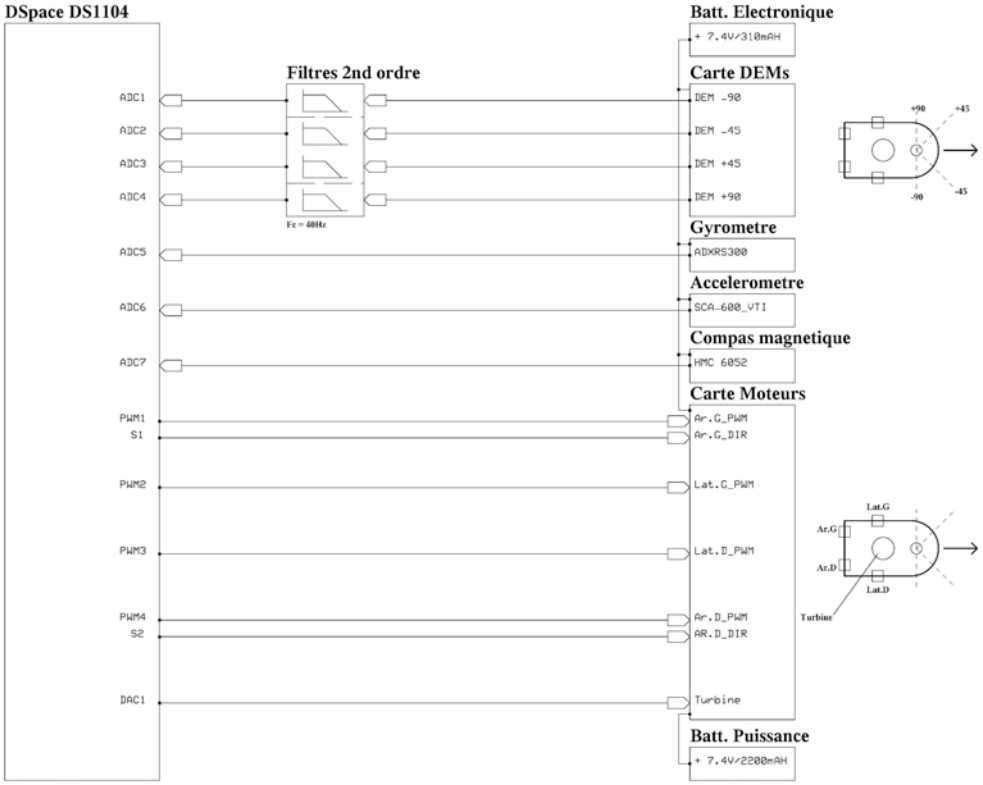

Fig. VI.4.4. Schéma de liaison entre les cartes et le boîtier d'isolement galvanique de dSpace. Des cellules passe-bas à 40Hz du 2nd ordre filtrent les signaux MLI (5V/ 2 kHz) issus de la carte DEM avant numérisation.

VI.4.5. *Stabilisation du cap de l'aéroglisseur*

VI.4.5.1. *Identification de la dynamique en lacet*

L'identification de la dynamique en lacet de l'aéroglisseur a été faite en commandant les deux propulseurs arrière différentiellement par une tension sinusoïdale d'amplitude 4,68 V (rapport cyclique MLI : α_0 = 0,6) modulée en fréquence de 0,15 Hz à 8 Hz pendant 50 s. La vitesse de rotation en lacet de l'aéroglisseur a été enregistrée par le micro gyromètre (voir Tab. VI.4.1.4.A) avec une période d'échantillonnage de 2 ms. La sortie du gyromètre a été pré-filtrée par un filtre passe-bande de type Butterworth d'ordre 5 [0,01Hz ; 8Hz]. La fonction de transfert $G_\Psi(p)\bullet K_g$ (Eq. VI.4.5.1.A) a été estimée au moyen de la boîte à outils *System Identification* (Version 6.1) de *Matlab*™. La meilleure concordance de modèle (variance expliquée 72%) est obtenue avec un filtre passe-bas du premier ordre avec une constante de temps de τ_Ψ = 188,2 ms et un gain statique de H_Ψ = 0,4354 V (gain K_g du gyromètre inclus).

$$G_\psi(p)\cdot K_g = \frac{V_g(p)}{\alpha(p)} = \frac{H_\psi}{1+\tau_\psi \cdot p} = \frac{0{,}4354}{1+0{,}1882\cdot p} \qquad \text{Equation VI.4.5.1.A}$$

Cette identification confirme la nature des frottements visqueux ($\propto$ dΨ/dt) avec le sol dont on peut faire le rapprochement avec les paramètres physiques du modèle (Eq. VI.4.5.1.B).

$$J\cdot d\dot{\psi}/dt + \zeta_\psi \cdot \dot{\psi} = 2\cdot r\cdot K_T \cdot U_0 \cdot \alpha(t) \qquad \text{Equation VI.4.5.1.B1}$$

$$V_g(p) = K_g \cdot \dot{\psi}(p) \qquad \text{Equation VI.4.5.1.B2}$$

- J = 0,0125 kg.m^2 : le moment d'inertie autour de l'axe vertical (Seguchi et Ohtsuka, 2003),
- ζ_Ψ : le coefficient de frottement visqueux en rotation,
- r = 9,5 cm : le bras de levier des propulseurs arrière (x2 à cause du couple mécanique)
- K_T = 0,10 N/V : gain force-voltage des propulseurs (Jin et al., 2004),
- U_0 = 7,2 V : tension d'alimentation de la carte moteur,
- K_g = 0,005 V/(°/s) : gain du gyromètre (à multiplier par 180/π).

La constante de temps identifiée $\tau_\psi = \frac{J}{\zeta_\psi} = 0{,}19$ s permet d'estimer le coefficient de frottement visqueux en rotation : ζ_Ψ = 0,066 kg.m^2/s. La fonction de transfert liant la commande α à la mesure du gyromètre V_g s'écrit :

$$G_\psi(p)\cdot K_g = \frac{V_g(p)}{\alpha(p)} = \frac{2\cdot r\cdot U_0\cdot K_T K_g/\zeta_\psi}{1+\tau_\psi\cdot p} \quad \text{donc} \quad H_\psi = \frac{2\cdot r\cdot U_0\cdot K_T K_g}{\zeta_\psi}$$

H_Ψ = 2·0,095·7,2·0,1·0,005·180/π/0,0664 = 0,59 V, valeur proche de celle identifiée (0,44 V avec une variance expliquée de 72%).

Même si la dynamique en lacet peut être modélisée par un système du premier ordre, l'état de gonflement du coussin d'air de l'aéroglisseur et la surface du sol influencent fortement la valeur du coefficient de frottement visqueux, et donc la dynamique. La constante de temps (0,19 s) que nous avons identifiée n'est donc valable que si le coussin d'air est correctement gonflé (i.e., un courant dans la turbine de sustentation de 4 A) et si l'appareil navigue au dessus d'une surface plane en bois peint, donc relativement lisse.

VI.4.5.2. *Boucle à verrouillage de cap*

Le robot LORA III est doté d'une boucle à verrouillage de cap (Fig. VI.4.5) basée sur une boucle interne intertielle (Fig. VI.4.5.2.(b)) utilisant un micro gyromètre (Tab. VI.4.1.4.A) et sur une boucle externe utilisant un micro compas magnétique (Tab. VI.4.1.4.C).
Cette stabilisation en cap est indispensable au fonctionnement du pilote automatique LORA III, car elle permet au robot de se déplacer seulement en translation (vers l'avant et par glissades de côté). Dès lors, les capteurs de flux optique reliés aux yeux mesurent que la composante translationnelle du flux optique (la seule à dépendre de la distance aux obstacles, voir Chapitre **II**). La composante rotationnelle du flux optique est considérée ici comme une perturbation dont il faut s'affranchir (voir Chapitre **II**).

Un correcteur proportionnel-intégral (PI) $C_\Psi(p)$ est introduit dans la boucle interne (Fig. V.4.5.(b)) pour compenser le pôle dominant (aéro-mécanique) de l'aéroglisseur (Eq. VI.4.5.2) et pour réduire la constante de temps en boucle fermée d'un facteur 1,2 (rapidité accrue de 20% en boucle fermée). L'action intégrale permet d'annuler l'erreur statique et de rejeter toute perturbation en rotation.

$$C_\psi(p) = 10\cdot\frac{1+0{,}20\cdot p}{p} \qquad \text{Equation VI.4.5.2.}$$

Un correcteur proportionnel de gain K_Ψ = 1 est indroduit dans la boucle externe de position angulaire (Fig. VI.4.5.(a)). L'action intégrale étant naturellement présente entre la vitesse angulaire et la position angulaire, l'erreur statique de position angulaire s'annule également.

En vol d'intérieur au dessus d'une surface horizontale lisse, l'aéroglisseur n'est soumis à aucune turbulence. Par contre, la rotation même de la turbine de sustentation génère un couple moteur qui par réaction tend à faire tourner le châssis de l'aéroglisseur en sens opposé. La boucle à verrouillage de cap (Fig. VI.4.5) rejette, par le choix des correcteurs qui ont été fait, cette perturbation *constante* de couple.

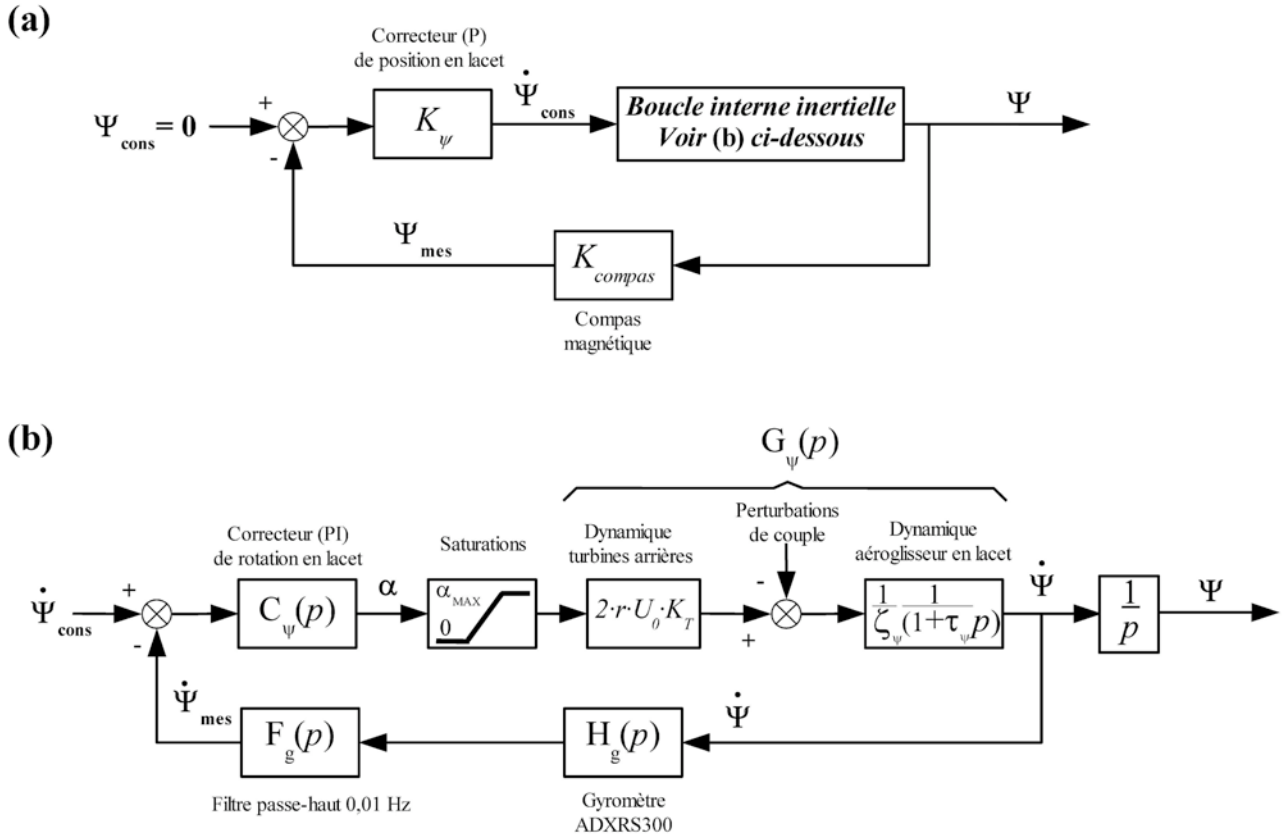

Fig. VI.4.5. Boucle à verrouillage de cap du robot LORA III.

(a) Boucle externe de position angulaire basée sur un micro compas magnétique. Un correcteur proportionnel est introduit pour augmenter sensiblement la rapidité.

(b) Boucle interne inertielle basée sur un micro gyromètre (sensibilité 5 mV/(°/s), bande passante 40 Hz). La sortie de ce capteur est filtrée par un filtre passe-haut du premier ordre de fréquence de coupure 0,01 Hz pour limiter les effets de la dérive du gyromètre. Un correcteur proportionnel-intégral est introduit dans la boucle pour rejeter les perturbations et améliorer de 20% la rapidité.

Bilan de la réalisation

Dans ce chapitre, nous avons présenté un aéroglisseur miniature de construction soignée, dénommé **LORA III** (pour *Lateral Optic flow Regulation Autopilot*, version 3). Cet aéroglisseur possède la particularité d'être *totalement actionné* par l'ajout de deux propulseurs latéraux, il se rapproche ainsi du mode de propulsion d'un hélicoptère ou d'une abeille dont les dynamiques d'avance et latérale sont découplées (voir **VI.1.**). Le **robot LORA III** est équipé d'un système visuel minimaliste comportant seulement deux facettes par oeil dont les caractéristiques sont extrêmement proches de celles de l'abeille (voir **VI.2.**). Les photorécepteurs du système visuel sont reliés à des capteurs de flux optique (DEM) capables de mesurer le flux optique sur une décade (de 30°/s à 400°/s) (voir **VI.3.**). Les caractéristiques de ces capteurs sont remarquablement similaires à celles enregistrées dans les neurones VT détecteurs de mouvement de l'abeille (voir **III.2.3.1.**). Le **robot LORA III** est un modèle satisfaisant d'une abeille sur le plan sensorimoteur, toutefois sa masse est 8250 fois plus élevée que celle d'une abeille, son système visuel comporte 1143 fois moins de facettes que celui d'une abeille, sa vitesse est 8 fois plus faible que celle d'une abeille. Dans un futur proche, nous testerons le **robot LORA III** dans des corridors droits (stationnaires ou non-stationnaires) et fuselés.

Chapitre VII. Discussion

« Tout d'abord poussé par ce qui se fait en aviation, j'ai appliqué aux insectes les lois de la résistance de l'air, et je suis arrivé avec M. André Sainte-Lague à la conclusion que leur vol est impossible. »

Auguste Magnan, Entomologiste français, extrait de *la locomotion chez les animaux* (1934)

Résumé**.....184**

VII.1. Expérimentations : de l'établissement à la validation du modèle**.....185**

VII.1.1. Centrage dans un corridor étroit**.....186**

VII.1.2. Décentrage de l'abeille dans un corridor non-stationnaire**.....187**

VII.1.3. Décentrage de l'abeille dans un corridor présentant une absence de texture…188

VII.1.4. Suivi de paroi dans un corridor large**.....189**

VII.1.5. Contrôle de la vitesse d'avance dans des corridors fuselés ou non-stationnaires190

VII.1.6. Réaction au vent**.....193**

VII.1.7. Recherches connexes**.....194**

VII.3. Plausibilité d'une boucle visuo-motrice LORA III à bord de l'abeille ?.....197

VII.2. Une boucle visuo-motrice LORA III dans les robots de demain ?**.....198**

Conclusion**.....201**

Résumé

La boucle visuo-motrice LORA III et le prototype de robot éponyme sont le fruit des études conduites au long de ce projet de thèse.

Le schéma de contrôle de la boucle visuo-motrice LORA III résulte d'une part, des expérimentations comportementales que nous avons conduit chez l'abeille, et d'autre part, de l'exploitation des résultats de travaux antérieurs.

*La discussion résume l'apport de chacun de ces travaux à l'établissement et à la validation du modèle (**VII.1.**) et par suite de sa plausibilité biologique (**VII.2**). Elle montre ensuite l'intérêt de ce modèle, formuler sous la forme d'un schéma de contrôle, pour le guidage visuel de robots autonomes dans divers milieux (aérien, sous-marin, et spatial) (**VII.3.**).*

Chapitre VII. Discussion

VII.1. *Expérimentations : de l'établissement à la validation du modèle*

La Figure VII.1. reprend pour la discussion le schéma de contrôle de la boucle visuo-motrice LORA III. Ce schéma est le premier à décrire le contrôle conjoint de vitesse et d'évitement d'obstacles latéraux de l'abeille.

Aucun travail antérieur a décrit le comportement visuo-moteur de l'abeille sous la forme d'un schéma *explicite* de contrôle comme nous l'avons fait avec LORA. Les travaux antérieurs ont donc été principalement exploités pour les résultats comportementaux obtenus sur l'abeille mise dans diverses situations. Dans ce fait, on peut dire qu'ils ont surtout participé à la construction du modèle du point de vue des liens perception/action de l'abeille.

Nos expérimentations sont venues dans un premier temps compléter la construction du modèle pour ensuite le valider et l'affiner.

Chacun des résultats comportementaux obtenus intervient à un certain niveau fonctionnel du schéma de contrôle LORA III (Fig. VII.1.).

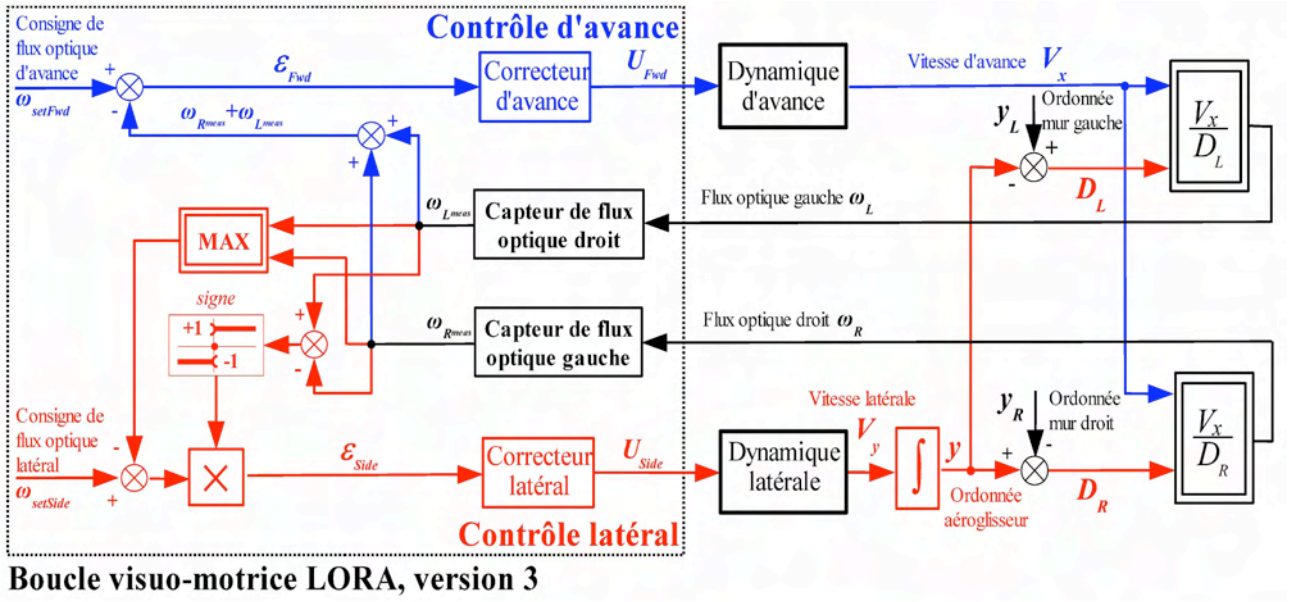

Fig. VII.1.Rappel du schéma de contrôle LORA III.

VII.1.1. *Centrage dans un corridor étroit*

Expérimentations et résultats des travaux de Kirchner et Srinivasan (1989), Srinivasan et al. (1991) (voir III.3.2.)

Le contexte de cette expérimentation était le suivant :
les abeilles traversent un corridor rectiligne étroit (stationnaire) de largeur D = 12 cm.

Les auteurs ont observé que :

- les abeilles adoptent systématiquement un comportement de *centrage ;*
- la vitesse moyenne d'avance des abeilles était de V_x=0,38 m/s (Srinivasan et al., 1991, page 526) ;
- la position latérale des abeilles par rapport aux murs était de $D_R = D_L = D/2 = 6$ cm.

Ils en ont déduit que :

- les flux optiques droit et gauche générés par les abeilles sont compris entre 200°/s à 800°/s (Srinivasan et al., 1991, page 526) ;
- les flux optiques *moyens* droit et gauche générés par les abeilles sont de 360°/s et minimaux le long de la ligne médiane.

Explication de ces résultats dans le cadre de LORA III :

En appliquant une consigne de flux optique *bilatéral* ω_{setFwd} = 720°/s et une consigne de flux optique *unilatéral* $\omega_{setSide} < \omega_{setFwd}/2$ (360°/s) au schéma de contrôle LORA III (Fig. VII.1.), une abeille, qui en serait équipée, adopterait un comportement de centrage dans un corridor étroit (largeur : 12 cm). En effet, nos résultats expérimentaux dans un corridor large (D = 0,95 m) (Tab. IV.2.2.1) montrent que la consigne de flux optique *unilatéral* de l'abeille se situerait entre 235°/s et 265°/s, des valeurs concordantes avec celles obtenues (comprises entre 215°/s et 320°/s) dans des corridors de largeur intermédiaire (D = 22 cm et D =32 cm) (Baird et al., 2005).

Le *centrage* observé chez l'abeille peut ainsi s'expliquer comme un *suivi de paroi alterné* des murs droit et gauche. La sélection du mur à suivre est modélisée par un critère *maximum* (fonction *max* en rouge sur la Fig. VII.1.), et le signe de la contre-réaction du contrôle latéral dépend du mur sélectionné (fonction *signe* en rouge sur la Fig. VII.1.).

Dans notre optique, les observations de Srinivasan et al. (1991) s'expliqueraient donc par le fait que les flux optiques latéraux (ω_R et ω_L) ne peuvent pas atteindre la consigne de flux optique $\omega_{setSide}$. L'erreur ε_{Side} produite par le régulateur de flux optique unilatéral devient alors minimale le long de la ligne médiane, et l'abeille devrait tendre à zigzaguer le long de la ligne médiane – une réaction bien visible sur certaines trajectoires extraites de Kirchner et Srinivasan (1989) (voir III.3.2.).

VII.1.2. *Décentrage de l'abeille dans un corridor non-stationnaire*

Expérimentations et résultats des travaux de Kirchner et Srinivasan (1989), Srinivasan et al. (1991) (voir III.3.2.)

Le contexte de cette expérimentation était le suivant :
les abeilles traversent un corridor rectiligne étroit (non-stationnaire) de largeur D = 12 cm dont l'un des murs est motorisé à une vitesse V_p.
Les auteurs ont observé que :
- les abeilles adoptent systématiquement un comportement de décentrage ;
- le décentrage était $\Delta y_{mes}=|y\text{-}D/2|$ = 1,7 cm par rapport à la ligne médiane du corridor pour une vitesse $V_p = \pm 20$ cm/s (voir III.3.2.) ;
- le décentrage était de $\Delta y_{mes}=|y\text{-}D/2|$ = 2,2 cm par rapport à la ligne médiane du corridor pour une vitesse $V_p = \pm 27{,}5$ cm/s (Srinivasan et al., 1991, Fig. 4).

Ils en ont déduit que pour $V_p = \pm 27{,}5$ cm/s :
- le flux optique provenant du mur stationnaire était compris entre 135°/s et 340°/s ;
- le flux optique provenant du mur non-stationnaire était de 105°/s lorsque celui-ci se déplace dans le même sens que le vol de l'abeille (Srinivasan et al., 1991, page 530) ;
- le flux optique provenant du mur non-stationnaire était de 325°/s lorsque celui-ci se déplace dans le sens contraire du vol de l'abeille (Srinivasan et al., 1991).

Explication de ces résultats dans le cadre de LORA III :
Un mur en mouvement affecte le flux optique *unilatéralement* (perturbation en échelon de flux optique). La sélection du flux optique unilatéral s'opère par un critère de type *maximum* sur le schéma de contrôle LORA III (Fig. VII.1.).
A partir de l'étude conduite au Chapitre **V** dans des corridors non-stationnaires, nous sommes à même d'estimer le décentrage théorique $\Delta y_{théo}$ (Eq. VII.1.B) qu'aurait une abeille équipée de LORA III à partir de son positionnement latéral théorique en régime permanent y_∞ (Eq. VII.1.A).

$$y_\infty = D_{R\infty} = \frac{(\omega_{setFwd} - \omega_{setSide})}{\omega_{setFwd}} \cdot D - \frac{1}{\omega_{setFwd}} \cdot V_p \qquad \text{Equation VII.1.A}$$

$$\Delta y_{théo} = \frac{|V_p|}{\omega_{setFwd}} \qquad \text{Equation VII.1.B}$$

En appliquant une consigne de flux optique *bilatéral* ω_{setFwd} = 720°/s (12,6 rad/s) au schéma de contrôle LORA III (Fig. VII.1.), on peut estimer le décentrage théorique $\Delta y_{théo}$ qui résulterait de

LORA III : $\Delta y_{théo}=|V_p|/\omega_{setFwd}$=1,8 cm pour V_p = ±20 cm/s et Δy_{mes} =2,2 cm pour V_p = ±27,5 cm/s. Ces valeurs de décentrage théorique obtenues sont relativement proches des valeurs expérimentales chez l'abeille.

VII.1.3. *Décentrage de l'abeille dans un corridor présentant une absence de texture*

Expérimentations et résultats des travaux de Kirchner et Srinivasan (1989), Srinivasan et al. (1991) (voir III.3.2.)

Le contexte de l'expérimentation était le suivant :
les abeilles traversent un corridor rectiligne étroit (stationnaire) de largeur D = 12 cm dont l'un des murs est tapissé d'une teinte grise homogène (contraste $\boldsymbol{m}$ < 0,05).

Les auteurs ont observé que :

- les abeilles adoptent systématiquement un comportement de *décentrage ;*
- le décentrage est de $\Delta y_{mes}=|y-D/2|$ = 2 cm par rapport à la ligne médiane du corridor (Srinivasan et al., 1991, Fig. 2(d-e) et Fig. 11).

Ils en ont déduit que :

- l'abeille mesurerait un flux optique latéral biaisé dont l'origine est attribuée au mauvais rapport signal-sur-bruit au niveau des photorécepteurs.

Exploitation des résultats pour LORA III :

Une texture présentant un contraste extrêmement faible annule le flux optique *unilatéralement*. Le contrôle latéral de LORA III ne peut alors se fier qu'à un seul des deux flux optiques latéraux (boucle rouge sur la Fig. VII.1.). La sélection de l'un des flux optiques latéraux s'opère par un critère de type *maximum* sur le schéma de contrôle LORA III (Fig. VII.1.).

De nombreux travaux ont montré que les abeilles étaient incapables de discriminer des contrastes tels que $\boldsymbol{m}$ < 0,01 (Rev. Horridge, 2005). Le gris homogène en question ayant été imprimé au moyen d'une imprimante laser, on peut présumer que le contraste optique de cette texture se situe en limite de détectabilité des neurones détecteurs de mouvement de l'abeille.
Du point de vue de notre modélisation (Fig. VII.1.), un contraste extrêmement faible recouvrant une surface mettrait « hors service » la mesure du flux optique latéral[1] provenant de cette surface

1Cette situation est relativement similaire à celle d'une abeille volant au dessus d'une surface de type « eau dormante »

(ω_{Rmeas}=0 ou ω_{Lmeas}=0 sur la Fig. VII.1.). L'erreur ε_{Side} produite par le régulateur de flux optique unilatéral (boucle rouge sur la Fig. VII.1.1) peut alors s'annuler et le décentrage peut alors s'interpréter comme un *suivi de paroi* par rapport au mur opposé (contrasté). Le flux optique unilatéral perçu par l'abeille est de 272°/s (0,38/0,08=4,75 rad/s), valeur relativement proche de nos données expérimentales lorsque l'abeille effectue un suivi de paroi (Tab. IV.2.2.1).

VII.1.4. *Suivi de paroi dans un corridor large*

Expérimentations et résultats de nos travaux (voir Chapitre **IV**)

Le contexte de notre expérimentation était le suivant :
les abeilles traversent un corridor large (stationnaire) de largeur D = 95 cm dont l'un des murs (celui de gauche) pouvait être enlevé.

Nous avons observé que :

- lorsque l'ouverture et la récompense sont placées près d'un même mur, les abeilles adoptent systématiquement un comportement de suivi de paroi lorsque les deux murs sont présents ;
- lorsque l'ouverture et la récompense sont placées près du mur droit et que le mur gauche est enlevé, les abeilles adoptent le même comportement, que le mur gauche soit présent ou non ;
- la vitesse d'avance de l'abeille (voir Tab. IV.2.2.1) ;
- le positionnement latéral de l'abeille (voir Tab IV.2.2.1).

Nous en avons déduit que :

- les flux optiques droit et gauche (voir Tab.2.2.1) ;
- le flux optique unilatéral était maintenu constant pendant un suivi de paroi (Chapitre **IV**).

Explication de ces résultats dans le cadre de LORA III :

Pour effectuer un *suivi de paroi*, l'abeille sélectionne le flux optique latéral (droite ou gauche) qui est le plus élevé des deux et ne tient pas compte du plus faible. La sélection de l'un des flux optiques latéraux s'opère par un critère de type *maximum* sur le schéma de contrôle LORA III (Fig. VII.1.), et le signe de la contre-réaction du contrôle latéral dépend du mur sélectionné (fonction *signe* en rouge sur la Fig. VII.1.). La valeur du flux optique unilatéral, qui est maintenue constante, est imposée par la *consigne de flux optique unilatéral* $\omega_{setSide}$ du contrôle latéral (boucle rouge, Fig. VII.1.).

(voir **IV.1.4.,** Heran et Lindauer, 1963).

VII.1.5. *Contrôle de la vitesse d'avance dans des corridors fuselés ou non-stationnaires*

Expérimentations et résultats des travaux de Srinivasan et al. (1996) et rev. Srinivasan et Zhang (2004) (voir III.3.3)

Le contexte de l'expérimentation était le suivant :

les abeilles traversent un corridor fuselé convergeant d'une largeur de 38 cm à 12 cm, puis divergeant à nouveau jusqu'à 38 cm de largeur.

Les auteurs ont observé que :

- les abeilles adoptent systématiquement un comportement de centrage ;
- la vitesse d'avance de l'abeille est proportionnelle à la largeur locale du corridor (Srinivasan et al., 1996, Fig. 2C).

Ils en ont déduit que :

- l'abeille contrôle sa vitesse en maintenant le flux optique généré par les murs ;
- le flux optique généré par chacun des murs est de 320°/s.

Exploitation des résultats pour LORA III :

Le flux optique généré par les murs est modélisé dans le schéma de contrôle LORA III par la fonction *somme* (flux optique droit plus gauche) (boucle bleue, Fig. VII.1.). Cette somme, qui est maintenue constante, est imposée par la *consigne de flux optique bilatéral* ω_{setFwd} du contrôle d'avance (boucle bleue, Fig. VII.1.).

En appliquant une consigne de flux optique *bilatéral* ω_{setFwd} = 640°/s et une consigne de flux optique *unilatéral* $\omega_{setSide} = \omega_{setFwd}/2$ = 320°/s au schéma de contrôle LORA III (Fig. VII.1.), une abeille, qui en serait équipée, contrôlerait sa vitesse d'avance proportionnellement à la largeur locale du corridor fuselé (angle fuselant α = 14,5°), tout en adoptant un comportement de centrage. La pente de la droite observée dans le plan de phase (x, V_x=dx/dt) est alors égale à $\tan(\alpha)\cdot\omega_{setSide}$ =1,5 s^{-1} valeur très semblable à celle obtenue expérimentalement (Fig. III.3.3.).

Nous avons analysé en détail le régime transitoire d'une trajectoire d'abeille traversant un corridor fuselé (angle fuselant α = 14,5°) en la reconstruisant avec précision à partir des points de la Fig. 2B dans Srinivasan et al. (1996). On remarque dans la partie convergente du corridor (moitié gauche de la trajectoire Fig. VII.2.) que l'abeille maintient remarquablement constant un flux optique *unilatéral* de 320°/s (Fig. VII.2.(d)) et un flux optique *bilatéral* de 500°/s (Fig. VII.2.(c)). Ces valeurs permettent de calculer une pente théorique de -1,08 s^{-1} (pente = $\tan(\alpha)\cdot\omega_{setSide}$ dans Eq.

VII.1.C), qui est relativement proche de la pente expérimentale -0,82 s^{-1} (dans la partie convergente :Fig. VII.2.(b)) et de la pente expérimentale +1,5 s^{-1} (dans la partie divergente : Fig. VII.2.(b)).

$$\left\{\begin{array}{l} V_x(x)=2\cdot\tan(\alpha)\cdot\frac{\omega_{setSide}\cdot(\omega_{setFwd}-\omega_{setSide})}{\omega_{setFwd}}\cdot x+V_{x_0} \\ \omega_{setFwd}=2\cdot\omega_{setSide} \end{array}\right\} \Leftrightarrow \left\{\begin{array}{l} V_x(x)=\tan(\alpha)\cdot\omega_{setSide}\cdot x+V_{x_0} \\ \omega_{setFwd}=2\cdot\omega_{setSide} \end{array}\right\} \quad \text{Equation VII.1.C}$$

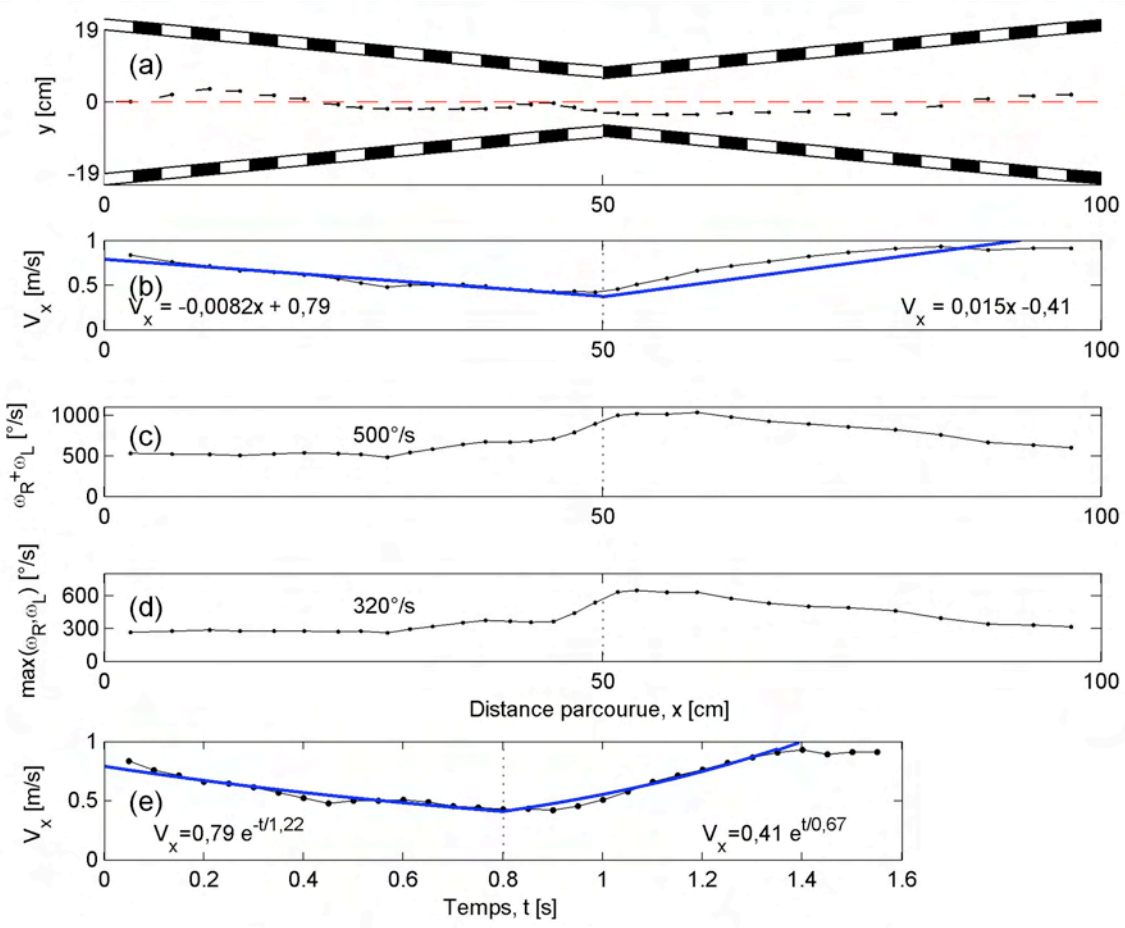

Fig. VII.2. (a) Trajectoire reconstruite à partir de la Fig. 2B de Srinivasan et al. (1996). (b) Profil de vitesse dans un corridor fuselé d'angle α = 14,5° à partir d'un filtre dérivé sur 4 points. (c) *Somme* des flux optiques latéraux. (d) *Maximum* des flux optiques latéraux. (e) Vitesse d'avance en fonction du temps, faisant apparaître un profil exponentiel de vitesse. (d'après Srinivasan et al., 1996)

L'équipe australienne a publié récemment de nouvelles expériences sur le contrôle de vitesse de l'abeille (Baird et al., 2005). Les auteurs de cette étude ont entraîné un groupe d'abeilles à traverser un corridor rectiligne *non-stationnaire* dont les *deux* murs étaient motorisés. Les motifs tapissant les deux murs étaient entraînés à une même vitesse V_p, générant ainsi ce que nous appellerions une

« *perturbation en échelon de flux optique bilatéral* ». Les résultats de cette étude montrent que l'abeille accélère lorsque les motifs se déplacent dans le sens du vol, et décélère lorsqu'ils se déplacent à contre-sens. Cette observation confirme le pilotage de la vitesse d'avance de l'abeille par son *flux optique bilatéral*. Toutefois, les observations montrent que l'abeille rejette de manière imparfaite cette perturbation car la pente de la caractéristique $V_x(V_p)$ est différente de l'unité : pente égale à 1,36 lorsque $V_p>0$, et 0,68 lorsque $V_p<0$ (Baird et al., 2005, Fig. 3), alors que la pente est de 0,64 sur la Fig. 4 de Baird et al. (2005).

Cette erreur moyenne importante de la vitesse d'avance (36%) traduit ce que nous appelons, l'*erreur statique* du régulateur de flux optique *bilatéral* (boucle bleue, Fig. VII.1.). Cette expérience révèle donc que le signal de rétroaction du contrôle de vitesse dans le « cerveau » de l'abeille est élaboré de façon plus complexe que celui de LORA III. On sait que son cerveau utilise également le flux optique *ventral* pour le contrôle de vitesse (Baird et al., 2006)[1].

Pour interpréter l'erreur de régulation, une piste consisterait à tenir compte du flux optique *ventral* dans le signal de rétroaction du contrôle de la vitesse. L'abeille pourrait, par exemple, maintenir constante la somme des flux optiques *latéraux* et du flux optique *ventral* (Eq. VII.1.D) :

$$\omega_{setFwd}=\frac{V_x-V_p}{D_R}+\frac{V_x-V_p}{D_L}+\frac{V_x}{h} \qquad \text{Equation VII.1.D}$$

pour une abeille centrée dans le tunnel $D_R=D_L=D/2$, il vient que (Eq. VII.1.E) :

$$\omega_{setFwd}=(V_x-V_p)\cdot\frac{4}{D}+\frac{V_x}{h} \qquad \text{Equation VII.1.E}$$

Puis en différenciant l'Eq. VII.1.E et en supposant que cette somme soit *parfaitement régulée*, on peut évaluer la sensibilité de V_x en fonction de V_p (Eq. VII.1.F):

$$\boxed{\frac{\partial V_x}{\partial V_p}=\frac{4\cdot h}{4\cdot h+D}} \qquad \text{Equation VII.1.F}$$

Avec une largeur de corridor D = 22 cm, et une hauteur sol maximale h = 20 cm (h non mesurée), on obtient une sensibilité $(\partial V_x/\partial V_p)$=0,64 pour h = 10 cm et $(\partial V_x/\partial V_p)$=0,78 pour h = 20 cm, deux valeurs qui sont relativement proches des valeurs expérimentales (Baird et al., 2005, Figs. 3&4).

La boucle visuo-motrice LORA III (Fig. VII.1.) exploite seulement le flux optique *bilatéral* pour le contrôle de vitesse alors que le contrôle de vitesse des insectes semble également exploiter le flux optique *ventral* (David, 1982 ; Baird et al., 2006). Cette dépendance est susceptible de créer un couplage entre l'évitement d'obstacles dans les plans horizontal et vertical. L'étude de ce couplage nécessiterait de fusionner les pilotes automatiques LORA III (Chapitre **V**) et OCTAVE (Ruffier,

1 Cette observation n'est pas confirmée chez les lépidoptères. En effet, une stimulation ventrale (ou dorsale) n'influencerait pas le contrôle du papillon (Preiss, 1987).

2004), ce qui dépasse le cadre de cette thèse.

VII.1.6. *Réaction au vent*

Des trajectoires d'insectes ailés enregistrées dans leur milieu naturel au moyen d'un radar harmonique (Riley et al., 1996, Riley et Osborne, 2001) ont révélé qu'elles n'étaient pas déviées dans le plan horizontal par des vents de face (bourdon : Riley et Osbone, 2001 ; papillon : Cant et al., 2005) et des vents latéraux (abeille : Riley et al., 2003). Ces observations montrent que les insectes ailés sont dotés d'une boucle à verrouillage de cap leur permettant de maintenir leur cap.

Pour comprendre cette remarquable insensibilité au vent, rappelons que la vitesse impliquée dans la définition du flux optique est la *vitesse sol* et non la *vitesse air*.
Or la vitesse sol $V_{Insecte/Sol}$ dépend conjointement de la vitesse air $V_{Insecte/Air}$ et de la vitesse du vent V_{Vent} (Eq. VII.1.6.A).

$$\boxed{\vec{V}_{Insecte\,/\,Sol} = \vec{V}_{Insecte\,/\,Air} + \vec{V}_{Vent}} \qquad \text{Equation VII.1.6.A}$$

Toutes choses étant égales par ailleurs, un vent de face (ou arrière) se comporte comme une perturbation en échelon affectant le flux optique de translation de façon *isotrope*, alors qu'un corridor non-stationnaire (e.g., Baird et al., 2005) se comporte comme une perturbation en échelon affectant le flux optique de translation de façon *anisotrope* (Eq. VII.1.6.B).

$$\boxed{\vec{V}_{Insecte\,/\,Sol} = \vec{V}_{Insecte\,/\,Mur} + \vec{V}_{p}} \qquad \text{Equation VII.1.6.B}$$

L'équipe australienne a publié récemment des expériences sur le contrôle de vitesse de l'abeille en présence de vents de face (Barron et Srinivasan, 2006). Un ventilateur pouvait générer des vents de face[1] jusqu'à 3,8 m/s et l'écoulement de l'air était relativement laminaire le long du corridor (largeur : 14 cm, hauteur : 20 cm, longueur : 5,48 m ou 7,18 m).
Les résultats montrent, que quelle que soit la vitesse du vent de face, l'abeille est capable de maintenir sa vitesse sol à peu près constante et égale à V_x=~0,4 m/s (Barron et Srinivasan, 2006). Or, nous pouvons prédire la vitesse sol de l'abeille centrée (D_R=D_L=D/2), sachant que sa consigne de flux optique bilatéral dans un corridor étroit (D =14 cm) est $\omega_{setFwdBee}$=2x$\omega_{setSideBee}$=640°/s. En appliquant l'Eq. IV.2.4.A, on obtient une vitesse calculée de 0,39 m/s, qui concorde donc bien avec celle mesurée en présence de vent (Barron et Srinivasan, 2006).
Un insecte ne s'épuise pas face au vent et l'on constate qu'il réduit sa hauteur sol de concert avec sa

1 De tels vents de face sont relativement modérés vis-à-vis de la vitesse habituelle d'une abeille. Dépourvue de pollen, elle vole à ~7 m/s en milieu naturel ouvert, i.e., sans obstacles latéraux et frontaux, et à ~5,3 m/s lorsqu'elle est chargée de nectar et retourne à sa ruche : Wenner, 1963 ; Riley et al., 2003.

vitesse sol ce qui est une conséquence directe du régulateur de flux optique ventral. Pareillement, on constate qu'un vent arrière leur fait augmenter leur hauteur sol de concert avec leur vitesse sol (Ruffier, 2004 ; Ruffier et Franceschini, 2005 ; Franceschini et al., 2007, voir aussi IV.1.3.).
Il semblerait également que les insectes ailés préfèrent voler face ou contre le vent plutôt que d'être victimes d'une dérive introduite par des vents latéraux. Cette condition expérimentale fut testée sur le criquet migrateur en le stimulant, non pas par un flux optique ventral *longitudinal*, mais par un flux optique ventral *transversal* (Preiss et Gewecke, 1991). Dans de telles conditions, on constate que le criquet initie une réaction typique de rotation en lacet dans un sens tel qu'il se voit ramené face au vent, comme s'il voulait privilégier le flux optique ventral longitudinal.

A l'instar du robot OCTAVE, le robot LORA III pourra être perturbé aussi bien par des vents de face (ou arrière) que par des vents latéraux. Nous disposons également au laboratoire d'équipements permettant de placer le robot LORA III dans des conditions expérimentales similaires à celles décrites chez l'abeille par Barron et Srinivasan (2006), ce qui permettra d'évaluer la robustesse du pilote automatique LORA III en présence de vent.

VII.1.7. *Recherches connexes*

Durant les années 1980/1990, des travaux initiés sur le papillon de nuit puis sur le criquet par des physiologistes de l'université de Hambourg, ont visé à formaliser l'hypothèse du « maintien du flux optique ventral » énoncée par Kennedy (1951) en se focalisant sur le contrôle de vitesse (Preiss et Kramer, 1983, 1984 ; Preiss et Gewecke, 1991 ; Preiss, 1992, 1993 ; Preiss et Spork, 1993, 1995). Ces travaux ont conduit à l'établissement d'un schéma de contrôle laborieux (Fig. VII.1.7.A) qui exigeait pas moins de trois régulations parallèles : une régulation de flux optique, une régulation de la vitesse par rapport à l'air, et une régulation de poussée (Fig. VII.1.7.A).

Les trois régulations invoquées requéraient évidemment trois types de capteurs : un capteur d'accélération (les antennes) pour la régulation de la poussée, un capteur de vitesse par rapport à l'air (les antennes et/ou les soies mécano-réceptrices recouvrant l'animal), et un capteur de flux optique (les neurones détecteurs de mouvement). Cette modélisation (Fig. VII.1.7.A), qui faisait donc appel à un grand nombre de capteurs, est restée confuse vis-à-vis des interactions existant entre les *trois régulations*. *Trois régulations* représentent des hypothèses fortes là où le pilote automatique LORA III ne requiert qu'une seule et unique régulation (de *flux optique*) pour contrôler à la fois la vitesse sol et la distance aux obstacles.

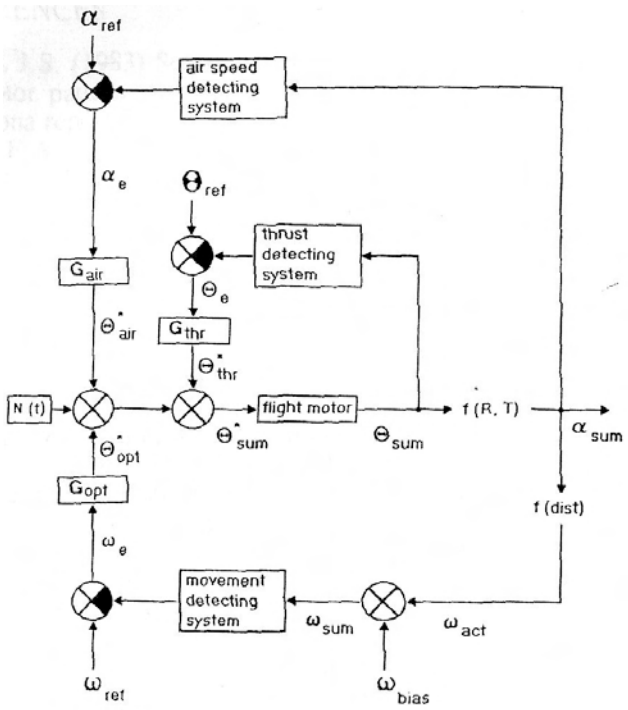

Fig. VII.1.7.A. Schéma de contrôle décrivant un modèle visuo-moteur basé sur trois régulations : une régulation de flux optique (consigne ω_{ref}), une régulation de vitesse par rapport à l'air (consigne α_{ref}), et une régulation de poussée (consigne Θ_{ref}). Chacune de ces régulations hypothétiques nécessiterait son propre capteur (représenté par chacun des trois blocs « *detecting system* »). Les auteurs semblent privilégier la vitesse par rapport à l'air (sortie α_{sum}) comme étant le paramètre de vol pertinent contrôlé par les trois régulations. (Preiss et Spork, 1993)

Dans le cadre du projet MFI (*Micromechanical Flying Insect*) conduit à l'université de Californie (Berkeley), plusieurs simulations d'insectes volant ont été réalisées (Fig. VII.1.7.B) dans des conditions similaires à celles qui prévalaient lors des enregistrements chez l'abeille (Wu, 2006, page 28-31).

Le but de ces simulations visait davantage à montrer la potentialité des capteurs de flux optique basés sur le corrélateur de Reichardt (Reichardt, 1957, 1969), qu'à établir un schéma de contrôle du vol de l'animal. Le système visuel de l'agent simulé incorpore un capteur de flux optique situé de part et d'autre de l'agent simulé et regarde perpendiculairement aux murs. L'élaboration de la simulation est relativement succincte car elle ne comprend que l'interaction capteur/environnement visuel, sans inclure aucune dynamique de l'agent :

- sur la Fig. VII.1.7.B.(a), on voit l'agent sauter de droite à gauche sans régime transitoire ; de plus, la vitesse d'avance semble être contrôlée en boucle ouverte ;
- sur la Fig. VII.1.7.B.(b), c'est le contrôle latéral qui semble être désactivé puisque l'agent vole rectilignement à travers le corridor à partir de sa position initiale centrée ; la dynamique de vitesse semble être dictée plus par la dynamique des capteurs de flux optique que par l'inertie de l'agent simulé.

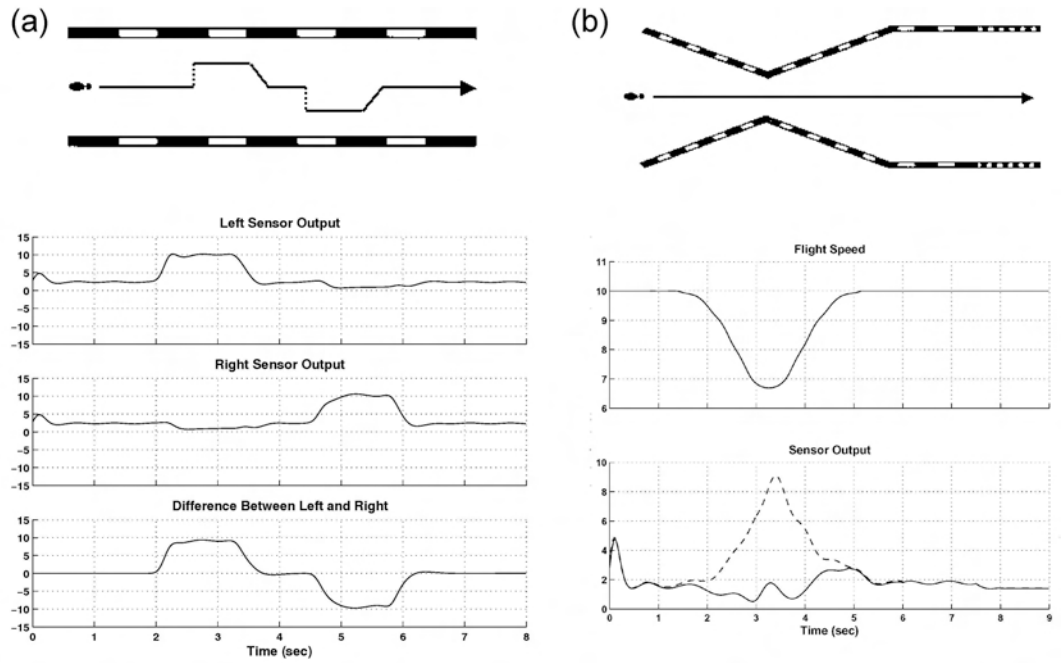

Fig. VII.1.7.B. Simulations de W-C Wu (2006).

(a) L'insecte simulé traverse un corridor rectiligne.

(b) L'insecte simulé traverse un corridor fuselé puis une partie rectiligne dont la période spatiale des motifs varie brusquement.

L'université de Sussex au Royaume-Uni développe actuellement des travaux de simulation intégrant un modèle d'abeille virtuelle dotée encore de détecteurs de mouvement de type « corrélateur de Reichardt », à base de trois entrées photoréceptrices (Riabinina et al., 2007). Cette triple entrée photoréceptrice vise à rendre les détecteurs de mouvement insensibles aux fréquences spatiales de l'environnement simulé (surtout aux faibles fréquences spatiales). Partant d'une position latérale décentrée, l'abeille simulée se centre dans un corridor fuselé d'angle $\alpha \approx 34°$ et ajuste sa vitesse d'avance en maintenant constante la vitesse angulaire des murs (Riabinina et al., 2007). Là encore, ces travaux visent plutôt à montrer l'efficacité d'un corrélateur de Reichardt à triple entrée plutôt qu'à établir un schéma de contrôle *explicite* du système visuo-moteur de l'animal.

Enfin, l'équipe américaine dirigée par M. Dickinson de l'Institut de Technologie de Californie (CALTECH) développe activement des simulations relativement élaborées du comportement visuo-moteur de la mouche du vinaigre (*Drosophila melanogaster*) (Dickson et al., 2006 ; Epstein et al., 2007). Même si ces travaux intègrent une modélisation morphologique et aérodynamique relativement fine de l'animal et une interaction oeil composé/environnement 3D, les bouclages sensorimoteurs proposés sont toutefois fortement critiquables sur le plan *biomimétique*. En effet, les auteurs établissent un schéma de contrôle pilotant deux degrés de liberté de l'animal (x et z) en

supposant que l'insecte obéit à *une consigne de vitesse et à une consigne d'altitude* (Dickson et al., 2006 ; Epstein et al., 2007) alors même qu'aucun capteur n'est connu chez l'insecte qui soit susceptible de le renseigner sur sa *vitesse sol* et sa *hauteur sol*. Enfin, la position latérale de l'agent simulé est reconstruite à partir de la réponse des neurones à large champ, avec comme pré-requis la connaissance de sa propre vitesse d'avance et de la largeur du corridor (Dickson et al., 2006, Eq. 37). De plus, cet estimateur de position latérale est le fruit d'une linéarisation de la réponse des neurones à large champ autour de la ligne médiane du corridor (Humbert et Frye, 2006).

Au contraire, les hypothèses de régulation (i) du flux optique *ventral* pour le contrôle d'altitude (Ruffier et Franceschini, 2005 ; Franceschini et al., 2007), (ii) du flux optique *bilatéral* pour le contrôle de vitesse (Serres et al., 2008), et (iii) du flux optique *unilatéral* pour le positionnement latéral (Serres et al., 2008), reposent sur des données biologiques existantes (les capteurs de flux optique). La boucle visuo-motrice LORA III telle que nous la proposons (Fig. VII.1.) est en accord avec l'approche écologique développée par Gibson (1950), dans laquelle la perception visuelle est censée piloter directement la locomotion sans cheminer par une *représentation* des paramètres d'état (observateur d'état) du système, contrairement aux boucles visuo-motrices préconisées par Humbert et Frye (2006), Dickson et al. (2006), et Epstein et al. (2007).

VII.2. *Plausibilité d'une boucle visuo-motrice LORA III à bord de l'abeille ?*

Cette question permet de lancer un débat sur l'opportunité du projet de thèse dans le contexte de la biorobotique. Nous savons qu'il doit exister des relations « d'aller-retour » entre les sciences du vivant et la robotique.

Ainsi, l'observation du comportement de l'abeille nous a permis d'élaborer un modèle de boucle visuo-motrice (Fig. VII.1.) transférable dans le domaine de la robotique. Le robot LORA III que nous avons construit en est le premier prototype.

En retour, notre questionnement est un appel à des expériences physiologiques qui pourront exploiter notre modèle pour guider ces investigations dans le fonctionnement interne du système nerveux de l'abeille.

Sur le plan physiologique, la chaîne de retour de la boucle visuo-motrice LORA III (Fig. VII.1) est constituée des yeux composés, de la rétine, des trois ganglions optiques reliés aux neurones détecteurs de mouvement de translation à large champ. Cette chaîne de mesure est maintenant bien mieux connue depuis la découverte des neurones VT dans la corde nerveuse descendante de l'abeille par Ibbotson (2001).

L'élaboration des signaux de commandes de la boucle visuo-motrice LORA III (Fig. VII.1) ne

nécessite que des traitements temporels (filtrage, seuillage) qui peuvent être facilement réalisés aux synapses des neurones. Toutefois, les neurones qui pourraient être impliqués dans ces traitements n'ont pas été encore identifiés, mais devraient être directement reliés aux neurones VT.
Enfin, les motoneurones commandant l'inclinaison du plan de battement d'ailes de l'abeille n'ont pas encore été identifiés, il serait également intéressant d'étudier les motoneurones commandant les muscles des ailes pour chercher un éventuel lien anatomique avec les neurones VT.

VII.3. *Une boucle visuo-motrice LORA III pour les robots de demain ?*

La réalisation du robot LORA III a permis de montrer que le modèle de la boucle visuo-motrice peut conduire à des réalisations de faibles coût, masse, encombrement, et peu consommatrices d'énergie.
Rappelons que l'ensemble des composants du pilote automatique LORA III ont été intégrés dans une carte prototype FPGA (voir Fig. V.4.2.B) d'une masse 17,3 g.
Vers quels types de robots de telles caractéristiques pourraient imposer cette solution ?
On peut répondre de manière évidente :
- les aéronefs pour la faible masse ;
- les micro-robots pour le faible encombrement et la consommation d'énergie (de l'ordre de 500 mW).

Bien évidemment, il appartiendra au roboticien d'identifier d'autres qualités permettant de retenir cette solution pour des problèmes spécifiques (microdrones et drones en environnements spécifiques...)
Ci-après nous examinons la portabilité du pilote automatique LORA III dans certains domaines de la robotique mobile.

Robotique aérienne

LORA III a été conçu pour des robots *totalement actionnés* dans le plan. Toutefois, nombreuses sont les plate-formes aériennes généralement *sous-actionnées* (voir **I.5.**). Néanmoins, dès lors que les angles de roulis et de tangage d'un aéronef à voilures tournantes (Fig. I.5.B) sont relativement faibles, les dynamiques d'avance et latérale peuvent être considérées comme découplées.

Le pilote automatique LORA III pourrait s'appliquer aux micro-aéronefs (microdrones) et aux aéronefs sans pilote (drones) destinées à voler en intérieur ou dans des canyons, naturels ou urbains.

De tels environnements, en effet, sont peu propices à une télé-opération par radiofréquences et à la réception du signal GPS. Procurer une certaine autonomie de vol aux micro-aéronefs, basée sur le pilote automatique LORA III, leur permettrait de franchir certains types de canyons sans supervision.

Robotique sous-marine

Les fonds marins possèdent des récifs encore mal cartographiés ainsi que de véritables canyons sous-marins. En milieu aquatique, les courants marins s'apparentent aux perturbations de vent du milieu aérien. Que ce soit en milieu aérien ou aquatique, les perturbations affectant le pilote automatique LORA III sont de même nature.

Les robots sous-marins ROV (*Remote Operated Vehicle*) sont généralement pilotés à distance et se déplacent à des vitesses relativement faibles (0,15 m/s à 0,7 m/s). Les ROV[1] sont *totalement actionnés* (e.g., Smallwood et Whitcomb, 2004) et équipés de puissants projecteurs pour réaliser des tâches de manutention téléopérées (rendant l'utilisation possible de photorécepteurs). La mise en oeuvre d'un pilote automatique LORA III permettrait aux ROV d'accroître leur capacité de travail à proximité des récifs (Creuze et Jouvencel, 2002).

Robotique spatiale et planétaire

La particularité du pilote automatique LORA III est qu'il nécessite seulement des capteurs de flux optique. De tels capteurs sont non-émissifs, donc économiques en énergie, et mesurent directement le quotient vitesse/distance. La mise en oeuvre de tels capteurs permettrait donc de s'affranchir des capteurs conventionnels de l'aérospatiale (télémètres, vélocimètres, GPS...) qui sont généralement encombrants et gourmands en énergie (Franceschini, 2008). Un aéronef martien équipé du pilote automatique LORA III pourrait pénétrer sans risque dans un canyon martien sans recourir ni à une cartographie préalable ni à un « GPS martien ». Sa *vitesse* et sa *distance* aux obstacles s'ajusteraient automatiquement à la *largeur locale* du canyon sans qu'aucune de ces trois informations ait besoin d'être connue à bord.

LORA III requiert peu de ressources calculatoires qui pourraient facilement être embarquées, excluant ainsi tout problème de télé-transmission électromagnétique lié aux pertes ou aux latences des communications (Franceschini, 2008).

Dès l'an 2000, la NASA a financé (via le projet BEES : *Bioinspired Engineering of Exploration*

1 Par exemple, le robot Hector : http://www.simec.technologies.com

Systems) plusieurs laboratoires comme le Jet Propulsion Laboratory (JPL), l'Institut des Technologies de Californie (CALTECH), l'Université Nationale Australienne (ANU), et l'Université de Californie (Berkeley), pour élaborer des principes de navigation inspirés des insectes et les appliquer à de futurs robots martiens (Chahl et Srinivasan, 2000 ; Thakoor et al., 2002, 2003, 2004). Les résultats obtenus sont plutôt mitigés, et sans doute est-ce l'une des raisons pour lesquelles ce programme de la NASA s'est arrêté en 2004. La vision assez « conventionnelle » du flux optique par ces auteurs ne leur a pas permis de résoudre le problème « de l'oeuf et de la poule » du flux optique, qui se formalise de la manière suivante : si l'on veut trouver la distance à partir du flux optique, il faut connaître sa vitesse, et s'il on veut trouver sa vitesse à partir du flux optique, il faut connaître la distance.

Les travaux réalisés dans cette thèse sur la modélisation du pilote automatique LORA III, inspirés des comportements observés chez l'abeille, montrent précisément qu'*il n'est nécessaire de connaître ni sa vitesse ni sa distance pour contrôler sa vitesse et éviter les obstacles latéraux*. C'est pour cette raison essentielle que LORA III pourra trouver des applications de premier plan dans le domaine de la robotique aérienne, sous-marine, et extraterrestre.

Conclusion

Ce travail de thèse a permis de synthétiser sous la forme d'un *schéma de contrôle explicite*, dénommé LORA III (LORA pour *Lateral Optic flow Regulation Autopilot*), une série de prouesses comportementales décrites depuis une vingtaine d'années chez l'abeille : la réaction de centrage dans un corridor étroit stationnaire (Kirchner et Srinivasan, 1989 ; Srinivasan et al., 1991), la réaction de décentrage dans un corridor étroit non-stationnaire (Srinivasan et al., 1991, 1993), le contrôle de vitesse mis en évidence dans des corridors fuselés ou non-stationnaires (Srinivasan et al., 1996 ; Baird et al., 2005, 2006), et le suivi de paroi dans un large corridor éventuellement jonché d'une ouverture latérale (Serres et al., 2008, Chapitre **IV**). Ce comportement de *suivi de paroi* est un nouveau comportement, qu'il faut ajouter à l'ensemble des comportements déjà observés (Rev. : Srinivasan et Zhang, 2004)

Le schéma de contrôle LORA III représenté sur la Fig. VII.1. se compose de *deux régulateurs de flux optique latéral* interdépendants, ne faisant appel qu'à des capteurs de flux optique (dont on sait qu'ils sont présents chez les insectes). Chacun des deux régulateurs possède sa propre consigne de flux optique comme décrit ci-dessous :

(i) un régulateur de flux optique *bilatéral* commande la force *propulsive*. Dans un corridor stationnaire, l'abeille en vient à afficher une vitesse automatiquement proportionnelle à la largeur locale du corridor *sans qu'elle ait à mesurer ni sa vitesse ni la largeur du corridor*. Cette propriété reste vraie quel que soit le positionnement latéral de l'abeille dans le corridor. Le paramètre essentiel et unique de ce premier régulateur est sa consigne de flux optique *bilatéral* ω_{setFwd}, qui n'est autre qu'un coefficient de proportionnalité liant la vitesse d'avance à la largeur du corridor ;

(ii) un régulateur de flux optique *unilatéral* commande la poussée *latérale*. Dans un corridor stationnaire, l'abeille se positionne à une distance d'un mur proportionnelle à la vitesse déterminée en (i) *sans qu'elle ait à mesurer cette distance*. Le paramètre essentiel et unique de ce second 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.

Au total, le *régulateur dual de flux optique* LORA III fait en sorte que l'abeille peut naviguer dans un corridor sans avoir à *mesurer* ni sa vitesse, ni sa distance aux murs, ni la largeur du corridor.

On peut imaginer qu'une abeille est dotée d'un pilote automatique du type LORA III pour les trois raisons suivantes :

1) on sait que l'abeille contrôle de manière découplée sa dynamique d'avance (par une commande en tangage de son plan de battement d'ailes) et sa dynamique latérale (par une commande en roulis de son plan de battement d'ailes) (voir III.1.5. et Zeil et al., 2008) ;

2) on sait que l'abeille possède des neurones détecteurs de mouvement robustes, c'est-à-dire relativement insensibles aux variations de fréquences spatiales et de contraste, et dont la réponse est une fonction monotone croissante du flux optique (neurones VT : Ibbotson, 2001 ; voir aussi **III.2.3.1.**). Puisque nous avons vu que l'abeille maintenait des flux optiques latéraux proches du milieu de la gamme de mesure de ces neurones VT, la dynamique requise pour ces neurones est faible : ils n'ont à mesurer, en effet, qu'un *écart* par rapport à leur consigne. Cette faible dynamique requise pour la mesure du flux optique est tout à fait compatible avec la dynamique des neurones VT ;

3) on sait aussi que l'abeille incorpore dans son système nerveux les principes de la régulation du flux optique, la preuve ayant été apportée par une démarche comportementale (Chapitre **IV**). Les neurones peuvent facilement réaliser, à leurs synapses, les quelques fonctions requises pour LORA III (Fig. VII.1.), telles que les comparateurs et les étapes de filtrage temporel du correcteur.

Le principe de guidage de LORA III est compatible avec une miniaturisation draconienne des systèmes de contrôle pour micro robots. Un premier prototype basé sur un aéroglisseur totalement actionné a été construit (masse totale : 0,82 kg) et l'ensemble des composants du pilote automatique LORA III ont été intégrés sur une carte prototype FPGA (masse : 17 g, consommation : 500 mW).
La démarche biorobotique, développée autour du pilote automatique LORA III, fait « d'une pierre deux coups ». Non seulement cette démarche permet de décrire le comportement de l'abeille en vol libre, mais elle apporte, en retour, une solution intéressante aux problèmes (non résolus à ce jour) du contrôle de la vitesse et de l'évitement d'obstacles latéraux pour micro-aéronefs, appareils dont la charge utile et l'énergie embarquée sont sévèrement limitées. LORA III ne requiert qu'un système visuel minimaliste, de résolution grossière, utilisant des capteurs non-émissifs et de faibles ressources calculatoires. LORA III est susceptible de s'appliquer à de nombreux véhicules autonomes (aériens, sous-marins, spatiaux...).

Références bibliographiques

Aguiar, A.P., Creman, L. and J.P. Hespanha. (2003). Position tracking for a nonlinear underactuated hovercraft: controller design and experimental results. In *proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control* (CDC), Maui, Hawai, USA.

Altshuler, D.L., Dickson, W.B., Vance, J.T., Roberts, S.P. And M.H. Dickinson. (2005). Short-amplitude high-frequency wing strokes determine the aerodynamics of honeybee flight. *PNAS* **102**(50), 18213-18218.

Amic, S. (2002). Intégration des fonctions de détection de mouvements par le traitement parallèle des signaux visuels. *Projet de fin d'études* (M.S. thesis), Ecole Nationale Supérieure d'Electronique et de Radioélectricité de Grenoble (ENSERG/INPG), Grenoble.

Ancona, N. and T. Poggio. (1993). *Optical flow from 1D correlation: application to a simple time-to-crash detector*. Memo no. 1375, AI Laboratory, MIT, Cambridge, MA,USA.

Argyros, A. A., Tsakiris, D.P., and C. Groyer. (2004). Biomimetic centering behavior for mobile robots with panoramic sensors. In K. Daniilides and N. Papakolopoulos (Eds.). *IEEE Robotics and Automation Magazine* **11,** Special issue on «Mobile robots with panoramic sensors », 21-30.

Aubépart, F. and N. Franceschini. (2005). Optic flow sensors for robots: elementary motion detectors based on FPGA. In *proceedings of the IEEE International Workshop on Signal Processing Signals*, (pp. 182-187), Athens, Greece.

Aubépart, F. and N. Franceschini. (2007). Bio-inspired optic flow sensors based on FPGA: application to micro-air vehicles. *Journal of Microprocessors and Microsystems* **31**(6), 408-419.

Aubépart, F., Menouni, M., Loubignac, T., Dinkenspiler, B. and N. Franceschini. (2007). Capteur de flux optique basé sur une rétine intégrée et un FPGA. *Acte du 4ème Colloque Interdisciplinaire en Instrumentation* (C2I), (17-19 oct.), Nancy, France.

Baird, E., Srinivasan, M.V., Zhang, S.W. and A. Cowling. (2005). Visual control of flight speed in honeybees. *Journal of Experimental Biology* **208**, 3895-3905.

Baird, E., Srinivasan, M.V., Zhang, S.W., Lamont R. and A. Cowling. (2006). Visual control of flight speed and height in the honeybee. In book: *From Animals to Animats 9*, S. Nolfi et al. (SAB 2006), LNAI 4095, pp. 40-51.

Baratoff, G., Toepfer, C. and H. Neumann. (2000). Combined space-variant maps for optical flow navigation. *Biological Cybernetics* **83**(3), 199-209.

Barron, A. and M.V. Srinivasan. (2006). Visual regulation of ground speed and headwind compensation in freely flying honey bees (*Apis mellifera L.*) . *Journal of Experimental Biology* **209**, 978-984.

Bermudez i Badia, S. and P.F.M.J. Verschure. (2007). The origin and role of non-linearities in the collision avoidance system of the locust. In *proceedings of the Flying Insects and Robots*

Symposium (FIR), (pp. 3-4), Monte Verità, Ascon, Switzerland.

Bermudez i Badia, S., Pyk, P. and P.F.M.J. Verschure. (2007). A fly-locust based neuronal control system applied to unmanned aerial vehicle: the invertebrate neuronal principles for course stabilization, altitude control and collision avoidance. *The International Journal of Robotics Research* **26**(7), 759-772.

Beyeler, A., Zufferey, J-C. and D. Floreano. (2007). 3D Vision-based navigation for indoor microflyers. In *proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation* (ICRA), (pp. 1336-1341), Roma, Italy.

Blanès, C. (1986). Appareil visuel élémentaire pour la navigation à vue d'un robot mobile autonome. *DEA de Neurosciences* (M.S. thesis), Université de la Méditerranée (Aix-Marseille II), Marseille.

Blanès, C. (1991). Guidage visuel d'un robot mobile autonome d'inspiration biologique, 2nd partie. *Thèse de doctorat* (PhD thesis), Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), Grenoble.

Blondeau, J. (1981). Aerodynamic capabilities of flies, as revealed by a new technique. *Journal of Experimental Biology* **92**, 155-163.

Bohorquez, F., Samuel, P., Sirohi, J., Pines, D., Rudd, L. and R. Perel. (2003). Design, analysis and hover performance of a rotary wing micro air vehicle. *Journal of the American Helicopter Society* **48**(2), 80-90.

Bouabdallah, S., Siegwart, R. and G. Caprani. (2006). Design and control of an indoor coaxial helicopter. In *proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (IROS) (pp. 2930-2935), Beijing, China.

Bouaddallah, S. (2007). Design and control of quadrotors with applications to autonomous flying. *Thèse de doctorat* (PhD thesis), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), N°3727, Laussanne, Suisse.

Bräuninger, H.D. (1964). Uber den einfluss meteorologischer faktoren auf die entfernungsweisung im tanz der bienen. *Zeitschrift für Vergleichende Physiologie* **48**, 1-130.

Brooks, R. (1986). A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE Journal of Robotics and Automation* **2**(1), 14-23.

Brooks, R. (1991). New approaches to robotics. *Science* **253**(5025), 1227-1232.

Buchner, E. (1984). Behavioural analysis of spatial vision in insects. In book: *Photoreception and vision in invertebrates*, M.A. Ali (Ed.), NATO ASI Series, Series A: Life Science, vol. 74, Plenum, pp. 561-621.

Cant, E.T., Smith, A.D., Reynolds, D.R. and J.L. Osborne. (2005). Tracking butterfly flight paths across the landscape with harmonic radar. In *proceedings of the Royal Society of London B* **272**(1565), 785-790.

Carelli, R. Soria, C., Nasisi, O. and E. Freire. (2002). Stable AGV corridor navigation with fused vision-based controls signals. In *proceedings the 28th IEEE Conference of Industrial Electronics Society* (IECON), (vol. 3, pp. 2433-2438), Sevilla, Spain.

Castillo, P., Lozano, R. and A. Dzul. (2005). Stabilization of a mini rotorcraft with four rotors. *IEEE Control Systems Magazine* **25**(6), 45-55.

Chahl, J.S. and M.V. Srinivasan. (2000). A complete panoramic vision system, incorporating imaging, ranging, and three dimensional navigation. In *proceedings of the IEEE Workshop on Omnidirectional Vision* (OMNIVIS), pp. 104-111.

Chittka, L. and H. Wells. (2004). Color vision in bees: mechanisms, ecology and evolution. In book: *Complex worlds from simpler nervous systems*, F.D. Prete (Ed.), MIT Press, Chap. 5, pp. 165-192.

Collett, T.S. and M.F. Land. (1975). Visual control of flight behaviour in the hoverfly *Syritta pipiens L*. *Journal of Comparative Physiology A* **99**(1), 1-66.

Collett, T.S. and L.I.K. Harkness. (1982). Depth vision in animals. In book: *Analysis of visual behavior*, D.J. Ingle, M.A. Goodale, and R.W.J. Mansfield (Eds.). Cambridge: The MIT Press, pp. 111-176.

Collins, S. (1998). Reconstructing the Visual Field of Compound Eyes. *Eurographics Rendering Workshop 1997*, pp. 81-92, New York City, NY, June 1997.

Coombs, D. and K. Roberts. (1992). Bee-bot: using peripheral optical flow to avoid obstacles. In *SPIE: Vol. 1825. Intelligent robots and computer vision XI* (pp. 714-721).

Creuze, V. and B. Jouvencel. (2002). Avoidance of underwater cliffs for autonomous underwater vehicles. In *proceedings of the IEEE International Conference on Intellignent Robots and Systems* (IROS) (pp. 793-798), Lausanne, Switzerland.

Darwin, C. (1859). L'origine des espèces par le moyen de la sélection naturelle, ou la préservation des races favorisées dans la lutte pour la vie. In book: *On the origin of species by means of naturel selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life*, London. Traduit de l'édition anglaise définitive (1896) par E.D. Barbier.

David, C. (1978). The relationship between body angle and flight speed in free-flying *Drosophila*. *Physiological Entomology* **3**, 191-195.

David, C. (1979). Height control by free-flying *Drosophila*. *Physiological Entomology* **4**, 209-216.

David, C. (1982). Compensation for height in the control of groundspeed by *Drosophila* in a new, 'barber's pole' wind tunnel. *Journal of Comparative Physiology A* **147**(4), 1485-1493.

David, C. (1985). Visual control of the partition between lift and thrust in free-flying *Drosophila*. *Nature* **313**, 48-50.

DeSouza, G.N. And A.C. Kak. (2002). Vision for mobile robot navigation: a survay. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence* **24**(2), 237-267.

Dev, A., Kröse, B. and F. Groen. (1997). Navigation of a mobile robot on a temporal development of the optic flow. In *proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (IROS) (pp. 558-563), Grenoble, France.

Dickinson, M. and K.G. Götz. (1996). The wake dynamics and flight forces of the fruit fly *Dosophila melanogaster*. *Journal of Experimental Biology* 199, 2085-2104.

Dickson, W., Straw, A., Poelma, C. and M. Dickinson. (2006). In *proceedings of the 44th American Institute of Aeronautics and Astronautics Aerospace Meeting and Exhibit* (AIAA), Reno, NV, USA.

Dilly, A. (2006). Intégration sur FPGA d'un boucle visuo-motrice. *Projet de fin d'études* (M.S. thesis), Institut Supérieur de l'Electronique et du Numérique (ISEN), Brest, France.

Douglas, J.K. And N.J. Strausfeld. (1996). Visual motion-detection circuits in flies: paralell direction-and-non-direction-sensitive pathways between the medulla and lobula plate. *Journal of Neuroscience* **16**, 4551-4562.

Dray, D. (2006). Etude et modélisation du vol de l'abeille (*Apis Mellifera*) en environnement non-stationnaire. *Projet de fin d'études* (M.S. thesis), Option Automatique et Conception des Systèmes, Ecole Supérieure d'Electricité (SUPELEC), Gif-sur-Yvette.

Duchon, A.P. and W.H. Warren. (1994). Robot navigation from a Gibsonian viewpoint. In *proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics* (SMC), (pp. 2272-2277), San Antonio, Texas, USA.

Dudley, R. (2000). The biomechanics of insect flight: form, function, evolution. *Princeton: Princeton University Press*.

Egelhaaf, M. and A. Borst. (1992). Is there a separate control system mediating a « centering response » in honeybees? *Naturwissenchaften* **79**, 221-223.

Eheim, W.P and R. Wehner. (1972). Die Sehfelder der zentralen Ommatidien in den Appositionsaugen von *Apis mellifica* und Cataglyphis bicolor (Apidae, Formicidae; Hymenoptera). *Kybernetik* **10**(3), 168-179.

Ellington, C.P. (1984). The aerodynamics of hovering insect flight. III. Kinematics. *Phi. Trans. Soc. Lond. B* **305**, 41-78.

Epstein, M., Waydo, S., Fuller, S.B., Dickson, W., Straw, A., Dickinson, M.H. and R.M. Murray. (2007). Biollogically inspired feedback design for Drosophila flight. In *proceedings of the American Control Conference* (ACC), (pp. 3395-3401), NY, USA.

Esch, H., Natchigall, W. and S.N. Kogge. (1975). Correlations between aerodynamic output, electrical activity in the indirect flight muscles and flight positions of bees flying in a servomechanically controlled flight tunnel. *Journal of Comparative Physiology* 100, 147-159.

Exner, S. (1891). *Die Physiologie der facettirten Augen von Krebsen und Insecten*. Wien: Franz Deuticke.

Fantoni, I. and R. Lozano. (2002). *Non-linear control for underactuated mechanical systems*. London: Springer.

Fernandez Perez de Talens, A. and C. Taddei Ferretti. (1975). Landing and optomotor responses of the fly Musca. In book: The compound eye and vision of insects, Ed. George Adrian Horridge, Oxford, Clarendon Press, ISBN: 0198573758, Chap. 22, pp. 490-501.

Franceschini, N. (1975). Sampling of the visual environment by the compound eye of the fly: fundamentals and applications. In book: *Photoreceptor optics*, S.A.W. and M.R. (Eds.), Berlin: Springer, pp. 98-125.

Franceschini, N. (1984). Chromatic organization and sexual dimorphism of the fly retinal mosaic. In book: *Photoreceptors*, A. Borsellino and L. Cerveto (Eds), Plenum: New York, pp. 319-350.

Franceschini, N. (1985). Early processing of colour and motion in a mosaic visual system. *Neurosci. Res. Suppl.* **2**, 517-549.

Franceschini, N. (1999). De la mouche au robot : reconstruire pour mieux comprendre. In book: *Cerveaux et Machines*, V. Bloch (Ed.), Paris: Hermès, 247-270.

Franceschini, N. (2008). Towards automatic visual guidance of aerospace vehicles: from insects to robots. In *proceedings of the ATC Workshop on Innovative Concepts – A Bridge to Space*, ESA-ESTEC 28-29 January 2008, Noordwijk, The Netherlands.

Franceschini, N., Blanes, C. and L. Oufar. (1986). Passive non-contact optical velocity sensor. *Technical Report* (in french), France: ANVAR/DVAR, N°51549, Paris.

Franceschini, N., Riehle, A. and A. Le Nestour. (1989). In book: *Facets of Vision*, D. Stavanga and R. Hardie (Eds.), Berlin, Springer, pp. 360-390.

Franceschini, N., Pichon, J.M. and C. Blanès. (1992). From insect vision to robot vision. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* **337**, 283-294.

Franceschini, N., Ruffier, F. and J. Serres. (2007). A bio-inspired flying robot sheds light on insect piloting abilities. *Current Biology* **17**, 329-335.

Franz, M.O. and H.A. Mallot. (2000). Biomimetic robot navigation. *Robotics and Autonomous Systems* **30**, 133-153.

von Frisch, K. (1914). Der Farbensinn und Formensinn der Biene. *Abteilung für allgemeine Zoologie und Physiologie der Tiere* **37**, 1–238.

Gibson, J.J. (1950). In book: *The perception of the visual world*, Boston: Houghton Mifflin.

Gibson, J.J. (1958). Visually controlled locomotion and visual orientation in animals. *British Journal*
of Psychology **49**, 182-194.

Ghysen, A., Jan L.Y. and Y.N. Jant. (1985). Segmental determination in *Drosophila* central

nervous system. *Cell* **40**, 943-948.

Guenard, N., Hamel, T. and R. Mahory. (2008). A practical visual servo control for an unmanned aerial vehicle. *IEEE Transactions on Robotics* **24**(2), 331-341.

Guerrero-Castellanos, J.F., Marchand, N. Lesecq, S. and J. Delamare. (2008). Bounded attitude stabililization: real-time application on four-rotor helicopter. In *proceeding of the 17th IFAC Wold Congress*, Seoul, Korea.

Götz, K.G. (1964). Optomotorische Untersuchung des visuellen systems einiger Augenmutanten der Fruchtfliege *Drosophila*. *Kybernetik* **2**, 77-92.

Götz, K.G. (1965). Die optischen Übertragungseigenschaften der Komplexaugen von *Drosophila*. *Kybernetik* **2**(5), 215-221.

Götz, K.G. (1968). Flight control in *Drosophila* by visual perception of motion. *Kybernetik* **4**, 199-208.

Götz, K.G. (1975). The optomotor equilibrium of the *Drosophila* navigation system. *Journal of Comparative Physiology A* **99**(3), 187-210.

Götz, K.G. and U. Wandel. (1984). Optomotor control of the force of flight in Drosophila and Musca. II. Covariance of lift ant thrust in still air. *Biological Cybernetics* **51**, 135-139.

Green, W.E., Oh, P.Y. and G. Barrows. (2004). Flying insect inspired vision for autonomous aerial robot near-Earth environments. In *proceeding of the IEEE Conference on Robotics and Automation* (ICRA), (pp. 2347-2352), New Orleans, USA.

Gribakin, F.G. (1975) Functional morphology of the compound eye of the bee. In book: *The compound eye and vision of insects*, G.A. Horridge (Ed.), Oxford: Clarendon Press, pp. 154–176.

Griffiths, S., Saunders, J., Curtis, A., Barber, B., McLain, T. and Beard, R. (2006). Maximizing miniature aerial vehicles – obstacle and terrain avoidance for MAVs. *IEEE Robotics and Automation Magazine* **13**, 34-43.

Haddad, D., Schaupp, F., Brandtm, R., Manz, G., Menzel, R. and A. Haase. (2004). NMR Imaging of the honeybee brain. *Journal of Insect Vision* **4**(7), 1-7.

Hardie, R.C., Franceschini, N. and P.D. McIntyre. (1979). Electrophysiological analysis of fly retina. *Journal of Comparative Physiology A* 133(1), 23-39.

Hardie, R.C. (1985). Functional organisation of fly retina. In book: *Progress in sensory physiology*, vol. 5, D. Ottoson (Ed.), Berlin: Springer.

Hausen, K. (1984). The lobula-complex of the fly: structure, function and signification in visual behaviour. In book: *Photoreception and vision in invertebrates*, M.A. Ali (Ed.), NATO ASI Series, Series A: Life Science, vol. 74, Plenum, pp. 523-559.

Hausen, K. and M. Egelhaaf. (1989). Neural mechanisms of visual course control in insects. In

book: *Facets of vision*, D.G. Stavenga and R.C. Hardie (Eds.), Springer-Verlag: Berlin Heidelberg New York, London, Paris, Tokyo, pp. 391–424.

von Helmholtz, H. (1867). *Handbuch der physiologischen Optik*. Leipzig: Leopold Voss. (Translated by Southall, J.P.C. (Ed.) 1925 *Helmoholtz's treatise on physiological optics*, Reprinted edition 1962). London: Dover Publications.)

Hengstenberg, R. (1988). Mechanosensory control of compensatory head roll during flight in the blowfly Calliphora erythrocephala Meig. *Journal of Comparative Physiology A* **163**, 151-165.

Hengstenberg, R. (2001). Pitch control and head posture in walking and flying Drosophila. In *proceeding of the International Conference on Invertebrate Vision* (ICIV), (pp. 224), Lund, Sweden.

Heran, P. and M. Lindauer. (1963). Windkompensation und seitenwindkorrektur der bienen flug über wassen. *Zeitschrift für Vergleichende Physiologie* **47**, 39-55.

Heusser, D. and R. Wehner. (2002). The visual centring response in deserts ants, *Cataglyphis fortis*. *Journal of Experimental Biology* **205**, 585-590.

Hoffmann, G.M., Huang, H., Waslander, S.L. and C.J. Tomlin. (2007). Quadrotor helicopter flight dynamics and control: theory and experiment. In *proceeding of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*, Hilton Head, South Carolina, USA.

Horn, E. (1975). The contribution of different receptors to gravity orientation in insects. *Fortschritte der Zoologie* **23**(1), 1-20.

Horn, E. and W. Kessler. (1975). The control of antennae lift movements and its importance on the gravity reception in the walking blowfly, Caliphora erythocephala. *Journal of Comparative Physiology A* **97**(3), 189-203.

Horn, B.K.P. and B.G. Schunck. (1981). Determining optical flow. *Artificial Intelligence* **17**, 185-203.

Horridge, G.A. (1977). Insects which turn and look. *Endeavour* **1**, 7-17.

Horridge, G.A. (1987). The evolution of visual processing and the construction of seeing systems. *Proceedings of the Royal Society of London B* **230**(1260), 279-292.

Horridge, G.A. (2003). Visual resolution of gratings by the compound eye of the bee *Apis mellifera*. *Journal of Experimental Biology* **206**, 2105-2110.

Horridge, G.A. (2005). The spatial resolutions of the apposition compound eye and its neuro-sensory feature detectors: observation versus theory. *Journal of Insect Physioloy* **51**, 243-266.

Hrabar, S. and G.S. Sukatme. (2004). A comparaison of two camera configurations for optic-flow based navigation of a UAV through urban canyons. In *proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (IROS) (pp. 2673-2680), Sendai, Japan.

Hrabar, S., Sukatme, G.S., Corke, P., Usher, K. and J. Roberts. (2005). Combined optic-flow

and stereo-based navigation of urban canyons for a UAV. In *proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intellignent Robots and Systems* (IROS) (pp. 3309-3316), Edmonton, Alberta, Canada.

Hrabar, S. and G.S. Sukatme. (2006) Optimum camera angle for optic flow-based centring response. In *proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation* (ICRA) (pp. 3922-3927), Beijing, China.

Hrncir, M., Jarau, S., Zucchi, R. and F.G. Barth. (2004). Thorax vibrations of a stingless bee (*Melipona seminigra*). I. No influence of visual flow. *Jounrnal of Comparative Physiology A* **190**(7), 539-548.

Humbert, J.S. (2006)**.** Bio-inspired visuomotor convergence in navigation and flight control systems. *PhD thesis*, California Institute of Technology (CALTECH), Pasadena, California, USA.

Humbert, J.S., Murray, R.M. and M.H. Dickinson. (2005). Sensorimotor convergence in visual navigation and flight control systems. In *proceedings of the 16th IFAC Wold Congress*, Prague, Czech Republic.

Humbert, J.S. and M.A. Frye. (2006). Extracting behaviorally relevent retinal image motion cues via wide-field integration. In *proceedings of the American Control Conference* (ACC).

Humbert, J.S., Hyslop, H. and M. Chinn. (2007). Experimental validation of wide-field integration methods for autonomous navigation. In *proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intellignent Robots and Systems* (IROS), (pp. 2144-2149), San Diego, USA.

Ibbotson, M.R. and L.J. Goodman. (1990). Response characteristics of four wide-field motion-sensitive descending interneurones in *Apis mellifera*. *Journal of Experimental Biology* **148**, 255-279.

Ibbotson, M.R. (1991). A motion-sensitive visual descending neurone in Apis mellifera monitoring translatory flow-fields in the horizontal plane. *Journal of Experimental Biology* **157**, 573-577.

Ibbotson, M.R. (1991). Wide-field motion-sensitive neurons tuned to horizontal movement in the honeybee. *Apis mellifera*. *Journal of Comparative Physiology A* **168**, 91-102.

Ibbotson, M.R. (2001). Evidence for velocity-tuned motion-sensitive descending neurons in the honeybee. *Proceedings of the Royal Society B* **268**(1482), 2195-2201.

Iidia, F. (2001). Goal-directed navigation of an autonomous flying robot using biogically inspired cheap vision. *Proceedings of the 32nd International Symposium on Robotics* (ISR), (pp. 1404-1409).

Jin, Z., Waydo, S. Wildanger, E.B., Lammers, M., Scholze, H., Foley, P., Held, D. and R.M. Murray. (2004). MVWT-II: the second generation Caltech multi-vehicle wireless testbed. In *proceedings of the American Control Conference* (ACC), vol. 6, pp. 5321-5326.

Kahlouche, S. and K. Achour. (2007). Optical flow based robot obstacle avoidance. *International Journal of Advanced Robotic Systems* **4**(1), 13-16.

Kaiser, W. and E. Liske. (1974) Die optomotorische Reaktionen von fixiert fliegenden Bienen bei Reizung mit Spektrallichtern. *Journal Comparative Physiology* **89**, 391–408.

Kasberger, G. (1990). The ocelli control the flight course in honeybees. *Physiological Entomology* **15**, 337-346.

Kennedy, J.S. (1939). Visual responses of flying mosquitoes. In *proceedings of Zoogical Society of London* **109**, 221-242.

Kennedy, J.S. (1951). The migration of the desert locust (Schistocerca gregaria Forsk.) I. The behaviour of swarms. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* **235**, 163-290.

Kerhuel, L., Viollet, S. and N. Franceschini. (2007). A sighted aerial robot with fast gaze and heading stabilization. In *proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intellignent Robots and Systems* (IROS), (pp. 2634-2641), San Diego, USA.

Kirchner, W.H. and M.V. Srinivasan. (1989). Freely moving honeybees use image motion to estimate distance. *Naturwissenchaften* **76**, 281-282.

Koenderink, J.J. (1986). Optic flow. *Vision Research* **26**(1), 161-79.

Koenderink, J.J. and A.J. van Doorn. (1987). Representation of local geometry in the visual system. *Biological Cybernetics* **55**(6), 367-375.

Kramer, J. and C. Koch. (1997). Pulse-based analog VLSI velocity sensors. *IEEE Transactions on Circuits and Systems-II: Analog and Digital Signal Processing* **44**(2), 86-101.

Krapp, H.G. and R. Hengstenberg. (1996). Estimation of self-motion by optic flow processing in single visual interneurons. **Nature 384**, 463-466.

Krapp, H.G., Hengstenberg, B. and R. Hengstenberg. (1998). Dendritic structure and receptive-field organization of optic flow processing interneurons in the fly. *Journal of Neurophysiology* **79**, 1902-1917.

Krapp, H.G. (2000). Neuronal matched filters for optic flow processing in flying insects. *Int. Rev. Neurobiol.* **44**, 93-120.

Kunze, P. (1961). Untersuchung des bewegungssehens fixiert fliegender bienen. *Zeitschrift für Vergleichende Physiologie* **44**, 656-684.

Labhart, T. (1980). Specialized photoreceptors at the dorsal rim of the honeybee's compound eye: Polarizational and angular sensitivity. *Journal of Comparative Physiology A* **141**(1), 19-30.

Labhart, T. (1988). Polarization-opponent interneurons in the insect visual system. *Nature* 331, 435-437.

Land, M.F. and T.S. Collett. (1974). Chasing behaviour of houseflies (*Fannia canicularis*). *Journal of Comparative Physiology* A **89**(4), 331-357.

Land, M.F. (1981). Optics and vision in invertebrates. In book: *Handbook of Sensory Physiology*, H. Autrum (Ed.), (vol. VII/6B, pp. 471-592), Berlin: Springer.

Landolt, O. and A. Mitros. (2001). Visual sensor with resolution enhancement by mechanical vibrations. *Autonomous Robots* **11**(3), 233-239.

Laughlin, S.B. and G.A. Horridge. (1971). Angular sensitivity of the retinula cells of dark-adapted worker bee. *Journal of Comparative Physiology A* **74**(3), 329-335.

Lewis, A. (1997). Visual navigation in a robot using a zig-zag behavior. In *proceedings of Neural Information Processing Systems* (NIPS), (vol. 10, pp. 822-828), MIT Press.

Lucas, D. and T. Kanade. (1981). An iterative image registration technique with an application to stereo vision. In *proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence* (IJCAI), (pp. 674-679), Vancouver, BC.

Martin, N. (1995). Application de la vision du mouvement au pilotage d'un robot mobile. *Thèse de doctorat* (PhD thesis), Université de Bordeaux I, Bordeaux, France.

Martin, N. and N. Franceschini. (1994). Obstacle avoidance and speed control in mobile vehicle equipped with a compound eye. In book: *Intelligent Vehicles*, N. Aoki and I. Masaki (Eds.), Cambridge: MIT Press, pp. 381-386.

Masson, G.P. (2006). Etude et modélisation des stratégies d'évitement d'obstacles latéraux chez l'abeille (*Apis Mellifera*) . *Projet de fin d'études* (M.S. thesis), Option Modélisation et Bioinformatique, Institut National des Sciences Appliquées (INSA), Lyon, France.

Menzel, R., and W. Backhaus. (1991). Color vision in insects. In book: *Vision and visual dysfunction the perception of color*, P. Gouras (Ed.), Macmillan: London, pp. 262–288.

Menzel, R., Blakers, M. (1976). Colour receptors in the bee eye - Morphology and spectral sensitivity. *Journal of Comparative Physiology* **108**, 11–33.

Menzel, R. and A.W. Snyder. (1974) Polarised light detection in the bee, *Apis mellifera*. *Journal of Comparative Physiology A* **88**, 247–270.

Mura, F. and N. Franceschini. (1994). Visual control of altitude and speed in a flying agent. In book: *From Animals to Animats III*, D. Cliff et al. (Eds), Cambridge: MIT Press, (pp. 91-99).

Mura, F. (1995). Contribution au guidage visuel d'agents mobiles d'inspiration bionique. *Thèse de doctorat* (PhD thesis), Université de Bordeaux I, Bordeaux, France.

Muratet, L., Doncieux, S., Briere, Y. and J-A. Meyer. (2005). A contribution to vision-based autonomous helicopter flight in urban environments. *Robotics and Autonomous Systems* **50**(4), 195-209.

Murray, D., Bradshaw, K., Mclauchlan, P., Reid, I. and P. Sharkey. (1995). Driving saccade to pursuit using image motion. *International Journal of Computer Vision* **16**, 205-228.

Nelson, R.C. and J. Aloimonos. (1989). Obstacle avoidance using flow field divergence. *IEEE*

Transactions Pattern Analysis and Machine Intelligence **11**(10), 1102-1106.

Netter, T. (2000). De la vision naturelle à la vision artificielle : application du contrôle visuo-moteur de la mouche au pilotage d'un robot réactif volant. *Thèse de doctorat* (PhD thesis), Université de Nice – Sophia Antipolis, Nice.

Netter, T. and N. Franceschini. (1999). Neuromorphic optical flow sensing for Nap-of-the-Earth flight. In *proceedings of SPIE*, vol. 3838, Mobile Robots XIV, D.W. Gage and H.M. Choset (Eds), pp. 208-216.

Netter, T. and N. Franceschini. (2002). A robotic aircraft that follows terrain using a neuromorphic eye. In *proceedings of the IEEE International Conference on Intellignent Robots and Systems* (IROS) (pp. 129-134), Lausanne, Switzerland.

O'Carroll, D.C., Barnett, P.D., Mah, E.L., Nordström, K. and R.S.A. Binkworth. (2006). In *proceedings of Brain Inspired Cognitive Systems* (BICS), Island of Lesvos, Greece.

Ogier, M. (2007). Etude du vol libre de l'abeille (*Apis mellifera*) dans un corridor non-stationnaire. Projet de fin d'études (M.S. thesis), Option Modélisation et Bioinformatique, Institut National des Sciences Appliquées (INSA), Lyon, France.

Pichon, J-M., Blanès, C. and N. Franceschini. (1989). Visual guidance of a mobile robot equipped with a network of self-motion sensors. In *proceedings of SPIE*, vol. 1195, Mobile Robots IV, W.J. Wolfe and W.H. Chun (Eds.), pp. 44-53.

Pichon, J-M. (1991). Guidage visuel d'un robot mobile autonome d'inspiration biologique, 1ère partie. *Thèse de doctorat* (PhD thesis), Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), Grenoble.

Pinel P., Thirion B., Meriaux S., Jobert A., Serres J., Le Bihan D., Poline J-B., and S. Dehaene. (2007). Fast reproducible identification and large-scale databasing of individual functional cognitive networks. *BMC Neuroscience* **8**(91).

Pines, D. and F. Bohorquez. (2006). Challenges facing future micro air vehicle development. *AIAA Journal of Aircraft* **43**(2), 290-305.

van Praagh, J. P., Ribi, W. Wehrhahn, C. and D. Wittmann. (1980). Drone bees fixate the queen with the dorsal frontal part of their compound eyes. *Journal of Comparative Physiology A* **136**(3), 263-266.

Preiss, R. (1987). Motion parallax and figural properties of depth control flight speed in an insect. *Biological Cybernetics* **57**, 1-9.

Preiss, R. (1992). Set point of retinal velocity of ground images in the control od swarming flight od desert locusts. *Journal of Comparative Physiology A* **171**, 251-256.

Preiss, R. (1993). Visual control of orientation during swarming flight of desert locust. In book: *Sensory Systems of Arthropods*, K. Wiese et al. (Eds.), Birkhäuser Verlag Basel, Switzerland.

Preiss, R. and Kramer, E. (1983). Stabilization of altitude and speed in tethered flying gypsy moth

males: influence (+) and (-) disparlure. *Physiological Entomology* **8**, 55-68.

Preiss, R. and Kramer, E. (1984). Control of flight speed by minimization of the apparent ground pattern movement. In book: *Localization and Orientation in Biology and Engineering*, D. Varju and H. Schnitzler (Eds.), Berlin Heidelberg: Springer Verlag.

Preiss, R. and M. Gewecke. (1991). Compensation of visually simulated wind drift in the swarming flight of the desert locust (*Schistocerca gregaria*). *Journal of Experimental Biology* **157**, 461-481.

Preiss, R. and P. Spork. (1993). Control of flight by means of lateral visual stimuli in gregarious desert locusts, *Schistocerca gregaria*. *Physiological Entomology* **18**, 195-203.

Preiss, R. and P. Spork. (1995). A model of the visual control of wind related orientation of the locust, *Schistocerca gregaria*. In *proceedings of the 22th Göttingen Neurobiology Conference*, (pp. 421). G. Thieme Verlag Stuttgart.

Preuss, T. and R. Hengstenberg. (1992). Structure and kinematics of the prosternal organs and their influence on head position in the blowfly Calliphora erythrocephala Meig. *Journal of Comparative Physiology A* **171**(4), 483-493.

Pudas, M., Viollet, S., Ruffier, F., Kruusing, A., Amic, S., Leppävuori, S. and N. Franceschini. (2007). A miniature bio-inspired optic flow sensor based on low temperature co-fired ceramics (LTCC) technology. *Sensors and Actuators A* **133**, 88-95.

Qiu, X., Vanhoutte, K.A.J., Stavenga D.G., Arikawa K. (2002). Ommatidial heterogeneity in the compound eye of the male small white butterfly, Pieris rapae crucivora. *Cell Tissue Res.* **307**, 371–379.

Reichardt, W. (1957). Autokorrelationsauswertung als funktionsprinzip des zentralnervensystems. *Zeitschrift Naturforschung* **12b**, 447-457.

Reichardt, W. (1969). Movement perception insects. In book: *Processing of Optical Data from Organisms and by Machines*, W. Reichardt (Ed.), New York: Academic Press.

Riabinina, O. and A.O. Philippides. (2007). Virtual bee in a virtual tunnel: modelling angular speed detection. In *proceedings of the Flying Insects and Robots Symposium* (FIR), (pp. 87-88), Monte Verità, Ascon, Switzerland.

Riley, J.R., Smith, A.D., Edwards, A.S., Osborne, J.L., Williams, I.H., Carreck, N.L. and G.M. Poppy. (1996). *Nature* **379**, 29-30.

Riley, J.R. and J.L. Osborne. (2001). Flight trajectories of foraging insects: observations using harmonic radar. In book: *Insect Movement: Mechanisms and Consequences*, D.R. Reynolds and C.D. Thomas (Eds.), (Chapter 7, pp. 129-157), CAD International.

Riley, J.R., Greggers, U., Smith, A.D., S. Stach, D.R. Reynolds, N. Stollhoff, Brandt, R., Schaupp, F. and R. Menzel. (2003). The automatic pilot of honeybees. In *proceedings of the Royal Society of London B* **270**, 2421-2424.

Romero, H., Salazar, S., Sanchez, A., Castillo, P. and R. Lozano. (2007). Modelling and real-time control stabilization of a new VTOL aircraft with eight rotors. *Proceedings of the IEEE/ RSJ International Conference on Intellignent Robots and Systems* (IROS) (pp. 147-152), San Diego, CA, USA.

Ruffier, F. (2004). Pilote automatique biomimétique ; Système générique inspiré du contrôle visuo-moteur des insectes pour: le décollage, le suivi de terrain, la réaction au vent, et l'atterrissage automatiques d'un micro-aéronef. *Thèse de doctorat* (PhD thesis), Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), Grenoble.

Ruffier, F., Viollet, S., Amic, S. and N. Franceschini. (2003). Bio-inspired optical flow circuits for the visual guidance of micro-air vehicles. In *proceedings the IEEE International Symposium on Circuits and Systems* (ISCAS), (Vol. III, pp. 846-849), Bangkok, Thaïland.

Ruffier, F. and N. Franceschini. (2004). Visually guided micro-aerial vehicle: automatic take off, terrain following, landing and wind reaction. In *proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation* (ICRA) (pp. 2339-2346), Nouvelle Orléans, USA.

Ruffier, F. and N. Franceschini. (2005). Optic flow regulation: the key to aircraft automatic guidance. *Robotics and Automomous Systems* **50**(4), 177-194.

Ruffier, F. and N. Franceschini. (2008). Aerial robot piloted in steep relief by optic flow sensors. In *proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intellignent Robots and Systems* (IROS), Nice, France.

Santos-Victor, J., Sandini, G., Curotto, F. and S. Garibaldi. (1993). Divergent stereo in autonomous navigation: learning from bees. In *proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (CVPR), (pp. 434-439), NY, USA.

Santos-Victor, J., Sandini, G., Curotto, F. and S. Garibaldi. (1995). Divergent stereo in autonomous navigation: from bees to robots. *International Journal of Computers Vision* **14**, 159-177.

Saager, F. and M. Gewecke. (1985). Die Heuschreckenantenne als Beschleunigungs-Sinnesorgan (The antenna of locusts as an acceleration sense organ). *Verh. Dtsch. Zool. Ges.* **78**, pp. 240.

Saager, F. and M. Gewecke. (1989). Antennal reflexes in the desert locust Schistocerca gregaria. *Journal of Experimental Biology* **147**, 519-532.

Sane, S.P., Dieudonné, A., Willis, M.A. and T.L. Daniel. (2007). Antennal Mechanosensors Mediate Flight Control in Moths. *Science* **315**(5813), 863-866.

Schiltra, C. and J.H. van Hateren. (1999). Blowfly flight and optic flow. I. Thorax kinematics and flight dynamics. *Journal of Experimental Biology* **202**, 1481-1490.

Seguchi, H. and T. Ohtsuka. (2003). Nonlinear receding horizon control of an underactuated hovercraft. *International Journal of Robust Nonlinear Control* **13**, 381-398.

Seidl, R. (1982). Die Sehfelder und Ommatidien-Divergenzwinkel von Arbeiterin, Konigin und Drohne der Honigbiene (*Apis mellifica*) . *PhD thesis*, Darmstadt: Technische Hochschule

Darmstadt, N°DO3046.

Seidl, R. and W. Kaiser. (1981). Visual field size, binocular domain and the ommatidial array of the compound eyes in worker honey bees. *Journal of Comparative Physiology A* **143**, 17-26.

Serres, J., Ruffier F. and N. Franceschini. (2005). Biomimetic visual navigation in a corridor: to centre or not to centre? In Proceedings of the International Mediterranean Modeling Multiconference (I3M, Oct. 20-22), (pp 91-97), Marseille, France.

Serres, J., Ruffier F. and N. Franceschini. (2006a). Two optic flow regulators for speed control and obstacle avoidance. In *proceedings of the first IEEE International Conference on Biomedical and Biomechatronics* (BIOROB) (pp. 750-757), Pisa, Italy.

Serres, J., Ruffier F., Viollet S. and N. Franceschini. (2006b). Toward optic flow regulation for wall-following and centring behaviours. *International Journal of Avanced Robotic Systems* **3**(2), 147-154.

Serres, J., Dray, D, Ruffier, F. and N. Franceschini. (2008). A vision-based autopilot for a miniature air vehicle: joint speed control and lateral obstacle avoidance. *Autonomous Robots* **25**, 103-122.

Serres, J., Masson, G, Ruffier, F. and N. Franceschini. (2008). Honeybee in the corridor: centering and wall-following. *Naturwissenchaften* (sous presse).

Sherman, A. and M.H. Dickinson. (2003). A comparaison of visual and haltere-mediated equilibrium reflexes in the fruit fly *Drosophila melanogaster*. *Journal of Experimental Biology* **206**, 295-302.

Snyder, A.W. (1977). Acuity of compound eyes: physical limitations and design. *Journal of Coomparative Physiology A* **116**(2), 161-182.

Smallwood, D.A. and L.L. Whitcomb. (2004). Model-based dynamic positioning of underwater robotic vehicles: theory and experiment. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* **29**, 169-186.

Spaethe, J. and A.D. Briscoe. (2005) Molecular chracterization and expression of the UV opsin in bumblebees: three ommatidial subtypes in the retina and a new photoreceptor organ in the lamina. *Journal of Experimental Biology* **208**, 2347–2361.

Spork, P. and R. Preiss. (1993). Control of flight by means of lateral visual stimuli in gregarous desert locusts, *Schistocerca gregaria*. *Physiological Entomology* **18**, 195-203.

Srinivasan, M.V. (1977). A visually evoked roll response in the housefly. *Journal of Comparative Physiology* **119**, 1-14.

Srinivasan, M.V. and M. Lehrer. (1988). Spatial acuity of honeybee vision and its spectral properties. *Journal of Comparative Physiology A* **162**(2), 159-172.

Srinivasan, M.V., Lehrer, M., Kirchner, W.H., and S.W. Zhang. (1991). Range perception through apparent image speed in freely flying honeybees. *Visuel Neuroscience* **6**, 519-535.

Srinivasan, M.V., Zhang, S.W. and Chandrashekara K. (1993). Evidence for two distinct

movement-detecting mechanisms in insect vision. *Naturwissenchaften* **80**, 38-41.

Srinivasan, M.V., Zhang, S.W., Lehrer, M. and T. Collett. (1996). Honeybee navigation en route to the goal: visual flight control and odometry. *Journal of Experimental Physiology* **199**, 237-244.

Srinivasan, M.V, Chahl, J.S., Weber, K., Venkatesh, S., Nagle, M.G., and S.W. Zhang. (1999). Robot navigation inspired by principles of insect vision. *Robotics and Autonomous Systems* **26**, 203-216.

S**rinivasan, M.V., Zhang, S.W., Chahl, J.S., Barth, E., and S. Venkatesh**. (2000). How honeybees make grazing landings on flat surface. *Biological Cybernetics* **83**, 171-183.

Srinivasan, M.V. and S.W. Zhang. (2004). Visual motor computations in insects. *Annual Review of Neuroscience* **27**, 679-696.

Stange, G. (1981). The occelar component of flight equilibrium control in dragonflies. *Journal of comparative Physiology* **141**, 237-244.

Steiner, G. (1953). Zur Duftorientierung fliegender insekten. *Naturwissenchaften* **19**, 514-515.

Strausfeld, N. (1976). Atlas of an insect brain. *Heidelberg: Springer*.

Strausfeld, N. (1989). Beneath the compound eye: neuroanatomical analysis and physiological correlates. In book: *Facets of Vision*, D. Stavanga and R. Hardie (Eds.), Berlin, Springer, pp. 317-359.

Taylor, C.P. (1981). Contribution of Compound Eyes and Ocelli to Steering of Locusts in Flight : II. Timing Changes in Flight Motor Units. *Journal of Experimental Biology* **93**, 19-31.

Thakoor, S., Chahl, J., Srinivasan, M.V., Young, L., Werblin, F., Bulter, H. and S. Zornetzer. (2002). Bioinspired engineering of exploration systems for NASA and DoD. *Artificial Life* **8**, 357-369.

Thakoor, S., Cabrol, N., Lay, Chahl, J., Soccol, D., Bulter, H. and S. Zornetzer. (2003). Review: the benefits and applications of bioinspired flight capabilites. *Journal of Robotic Systems* **20**(12), 687-706.

Thakoor, S., Morookian, J. M., Chahl, J., Bulter, H. and S. Zornetzer. (2004). BEES: explorating Mars with bioinspired technologies. *IEEE Computer Socitey* **37**(9), 38-47.

Ullman, S. (1981). Analysis of visual motion by biological and computer systems. *IEEE Computer* **14**(8), 57-69.

Vandenberg, J.D., Massie, D.R., Shimanuki, H., Peterson, J.R. And D.M. Poskevich. (1985). Survival, behavior and comb construction by honey bees, *Apis mellifera*, in zero gravity aboard NASA Shuttle mission STS-13. *Apidologie* **16**(4), 369-384.

Viola, P. (1989). Neurally inspired plasticity in oculomotor processes. In *proceedings of Neural Information Processing Systems* (NIPS), (pp. 290-297), Denver, Colorado, USA.

Viollet, S. and N. Franceschini. (1999). Visual servo system based on a biologically-inspired scanning sensor. In *proceedings of the SPIE Conference on sensor fusion and decentralized control on robotics II*, (Vol. 3839, pp. 144-155), Boston, USA.

Vogel, S. (1967). Flight in Drosophila I/ Flight performance of thetered flies. *Journal of Experimental Biology* **44**, 567-578.

Wakakuwa, M., Kurasawa, Giurfa, M. and K. Arikawa. (2005). Spectral heterogeneity of honeybee ommatidia. *Naturwissenchaften* **92**(10), 464-467.

Waterman, T.H. (1981). Polarization sensitivity. In book: *Handbook of sensory physiology* VII/6B, H. Autrum (Ed.), Springer-Verlag: Berlin Heidelberg New York, pp. 281–469.

Weber, K., Venkatesh, S. and M.V. Srinivasan. (1997). Insect inspired behaviours for the autonomous control of mobile robots. In book: *From living eyes to seeing machines*, M.V. Srinivasan and S. Venkatesh (Eds.), Oxford: Oxford University Press (Chap. 11, pp. 226-248).

Wehner, R., and S. Rossel. (1985). The bee's celestial compass: a case study in behavioural neurobiology. In book: *Experimental behavioral ecology and sociobiology : in memoriam Karl von Frisch, 1886-1982*, B. Holldobler and M. Lindauer (Eds.), Sunderland, Mass. (USA): Sinauer Associates, ISBN: 08-789-3460X, pp. 11-53.

Wehner, R. and S. Strasser. (1985). The POL area of the honeybee's eye: behavioural evidence. *Physiological Entomology* **10**(3), 337-349.

Wehrhahn, C. (1984). Ocellar Vision and Orientation in Flies. In *proceedings of the Royal Society of London B* **222**(1228), 409-411.

Wenner, A.M. (1963). The flight speed of honeybees: a quantitative approach. *Journal of Apicultural Research* **2**, 25-32.

Whiteside, T.C. and G.D. Samuel. (1970). Blur zone. *Nature* **225**, 94–95.

Williams, C.P. (1965). *Insect migration*. London: Collins, second edition.

Wu, W-C. (2006). Biomimetic sensor modeling and simulations for flight control of a Micromechanical Flying Insect (MFI). *PhD thesis*, University of California, Berkeley, USA.

Zhang, S.W., Wang, X.A., Liu Z.L., Srinivasan M.V. (1990). Visual tracking of moving targets by freely flying honeybees. *Visual Neuroscience* **4**(4), 379-86.

Zanker, J. (1985). On the mechanism of speed and altitude control in *Drosophila melanogaster*. *Physiological Entomology* **13**, 351-361.

Zeil, J., Boeddeker, N. and J.M. Hemmi. (2008). Vision and the organization of behaviour. *Current Biology* **18**(8), 320-323.

Zufferey, J-C. (2005). Bio-inspired vision-based flying robots. *Thèse de doctorat* (PhD thesis), Ecole Polytechnique de Lausanne (EPFL), Lausanne, Suisse.

Zufferey, J-C. and D. Floreano. (2005). Toward 30-gram autonomous indoor aircraft: vision-based

obstacle avoidance and altitude control. In *proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation* (ICRA) (pp. 2594-2599), Barcelona, Spain.

Zufferey, J-C. and D. Floreano. (2006). Fly-inspired visual steering of ultralight indoor aircraft. *IEEE Transactions on Robotics* **22**(1), 137-146.

Biographie

Né à Aix-en-Provence (Bouches-du-Rhône), j'ai reçu l'Agrégation de Sciences Physiques option Physique et Electricité Appliquées préparées à l'École Normale Supérieure Cachan en 2002 (ENS Cachan, promotion 1999). J'ai conjointement obtenu mon Master Recherche en Imagerie Médicale de l'Université de Paris XI (Orsay) et mon Magistère en Électronique, Électrotechnique, et Automatique de l'Université de Paris XI – École Normale Supérieure de Cachan (ENS Cachan) en 2003. J'ai effectué mon stage de Master Recherche au Service Hospitalier Frédéric Joliot d'Orsay, au sein de l'Unité de Neuro-Imagerie Anatomo-Fonctionnelle (UNAF) du CEA, durant lequel je me suis spécialisé dans l'optimisation des paradigmes expérimentaux dédiés à l'Imagerie par Résonance Magnétique nucléaire fonctionnelle (IRMf). En 2003, j'ai rejoint l'équipe de Biorobotique dirigée par Nicolas Franceschini à l'Institut des Sciences du Mouvement Etienne-Jules Marey (UMR 6233) au CNRS/Université de la Méditerranée, à Marseille, en tant que doctorant. Parallèlement en 2006, j'ai rejoint l'Académie de Lyon en tant qu'élève Professeur de Sciences Physiques Appliquées. En 2007, j'ai intégré l'Académie d'Aix-Marseille au Lycée Polyvalent M. Fourcade à Gardanne, au sein duquel j'ai actuellement une charge d'enseignement. Emerveillé par la Nature et les découvertes, je contemple, et quelques fois je découvre, les ingénieuses solutions développées par la Nature, qui sont tout autant de solutions raffinées, minimalistes, et optimales dont l'homme devrait s'inspirer pour concilier la difficile intégration de son activité avec les milieux naturels.

DE L'ABEILLE AU ROBOT : LA REGULATION DU FLUX OPTIQUE

Contrôle conjoint de vitesse et d'évitements d'obstacles latéraux pour véhicules totalement actionnés

RESUME : Nous avons conçu un pilote automatique, dénommé LORA (Lateral Optic flow Regulation Autopilot), qui s'inspire de la vision du mouvement des insectes ailés. Il se compose de *deux régulateurs de flux optique interdépendants*, chacun contrôlant un degré de liberté de translation : un régulateur de *flux optique bilatéral* contrôle la vitesse du robot, tandis qu'un régulateur de *flux optique unilatéral* lui permet d'éviter les obstacles latéraux. Des expériences de simulation montrent qu'un robot *totalement actionné*, équipé du seul pilote automatique LORA, franchit sans collision un corridor droit, fuselé, ou même non stationnaire. Le robot n'a besoin que d'une paire d'yeux latéraux mesurant les flux optiques droit et gauche et ne fait appel à aucun autre capteur, ni de vitesse, ni de distance. LORA est destiné à équiper un aéroglisseur miniature de 0,8 kg, doté de deux yeux élémentaires (à 2 pixels) et rendu totalement actionné par l'adjonction de deux propulseurs latéraux. Nous avons identifié tous les paramètres dynamiques de ce robot avant de les inclure dans les simulations. Ce travail constitue un premier pas vers un système de guidage agile et léger pour micro-aéronefs. La genèse du pilote automatique LORA a suivi trois étapes : LORA I, LORA II et LORA III, enrichies progressivement par l'analyse parallèle du comportement d'abeilles entraînées à pénétrer dans divers corridors pour y butiner un nectar artificiel. L'enregistrement vidéo à haute résolution et l'analyse statistique de trajectoires d'abeilles dans divers environnements ont permis de mettre à jour les ressorts du système visuo-moteur sous-jacent. Ainsi notre travail remet en question l'hypothèse d'« équilibrage des flux optiques latéraux », proposée voici 20 ans pour expliquer « la réaction de centrage » de l'abeille dans un corridor. Bien que ce comportement ait inspiré maints roboticiens dans le monde, il apparaît en fait comme un cas particulier d'un comportement beaucoup plus général de l'insecte : le suivi de paroi. Le va-et-vient permanent biologie-robotique qui a animé notre travail offre aujourd'hui des retombées dans les deux camps. Il permet de comprendre comment un insecte de 100 mg peut naviguer sans SONAR, ni RADAR, ni LIDAR, ni GPS, et offre aux véhicules autonomes la possibilité de se comporter pareillement, sans avoir à mesurer ni vitesse ni distance.

MOT-CLES : flux optique, abeille, vision, micro-aéronef, vol d'insecte, bionique, biorobotique, biomimétisme.

FROM BEE TO ROBOT : OPTIC FLOW REGULATION

Joint speed control and lateral obstacle avoidance for fully actuated vehicles

ABSTRACT: We developed an autopilot, called LORA (Lateral Optic flow Regulation Autopilot), which is inspired by motion vision in flying insects. It incorporates two interdependent optic flow regulators, each of which controls one translational degree of freedom: a bilateral optic flow regulator controls the robot's speed, while a unilateral optic flow regulator makes the robot avoid lateral obstacles. Simulation experiments show that a fully actuated vehicle, equipped solely with the LORA autopilot, is able to cross straight, tapered or even non stationary corridors. The robot needs only a pair of lateral eyes that measure the right and left optic flows, and requires no speed or range sensors. This autopilot is meant to equip a miniature seeing hovercraft (0.8 kg) equipped with two elementary (2-pixel) eyes and rendered fully actuated by two lateral thrusters. We identified experimentally all the robot's dynamical parameters and incorporated them into the simulation. This work is a first step toward a deft, lightweight and power-lean guidance system for micro-air vehicles (MAVs). Designing the autopilot involved three steps: LORA I, LORA II and LORA III that were progressively informed by the results of behavioural experiments carried out on bees trained to enter various corridors en route to an artificial nectar source. High resolution video recording and statistical analyses of the bees' trajectories in various environments allowed the underlying visuomotor control system to be deciphered. We challenge the "optic flow balance" hypothesis that was put forward 20 years ago to explain the bee's "centering reaction" in a corridor. Even though this behaviour has inspired the design of many robots eversince, it now appears as a degenerate case of the insect's "wall following behaviour". Our work involved constant plying between Biology to Robotics and provides spin-offs in both fields. It allows one to better understand how a 100mg insect can navigate without using any SONAR, RADAR, LIDAR or GPS, while offering autonomous vehicles an opportunity to behave the same way, without any needs to measure speed and range.

KEYWORDS: optic flow (OF), honeybee, vision, micro-air vehicles (MAV), insect flight, bionics, biorobotics, biomimetics.

DISCIPLINE : Systèmes Automatiques et Microélectroniques

LABORATOIRE :
Institut des Sciences du Mouvement Etienne-Jules Marey
CNRS/Université de la Méditerranée (UMR 6233)
Equipe Biorobotique
CP938
163, Avenue de Luminy
13288 Marseille cedex 09, FRANCE