

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

N° attribué par la bibliothèque

□□□□□□□□□□

T H E S E

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'INPG

Spécialité : Signal, Image, Parole, Télécommunications

préparée au laboratoire Mouvement et Perception, UMR 6152 (CNRS / Univ. de la Méditerranée, Marseille)

dans le cadre de l'Ecole Doctorale ***Electronique, Electrotechnique, Automatique, Télécommunications, Signal***

présentée et soutenue publiquement

par

Franck RUFFIER

le 6 Septembre 2004

Titre :

PILOTE AUTOMATIQUE BIOMIMETIQUE

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

Directeur de thèse :

Nicolas FRANCESCHINI

JURY

M. G. BOUVIER
M. D. FLOREANO
M. R. ZAPATA
M. N. FRANCESCHINI
M. B. ESPIAU
M. S. THORPE

, Président
, Rapporteur
, Rapporteur
, Directeur de thèse
, Examineur
, Examineur

« Le savoir humain sera rayé des archives du monde avant que nous ayons le dernier mot d'un moucheron. »

Jean Henri Fabre (1823-1915)
Entomologiste français

« On peut espérer que, lorsqu'ils seront les maîtres du monde, les insectes se souviendront avec reconnaissance que nous les avons plutôt bien nourris lors de nos pique-niques. »

Colette (1873-1954)
Journaliste et écrivain française

Remerciements

Je tiens premièrement à remercier Nicolas Franceschini, Directeur de Recherche CNRS au laboratoire Mouvement et Perception, pour m'avoir permis de réaliser ce travail de thèse au sein de l'équipe Biorobotique, pour m'avoir communiqué ses idées et enfin pour m'avoir transmis sa passion pour l'inspiration biologique.

Je remercie tous les membres du jury, le président, les rapporteurs et les examinateurs pour avoir accepté d'évaluer ce travail :

- M. Gérard Bouvier, Professeur à l'Institut National Polytechnique de Grenoble, président du jury,
- M. René Zapata, Maître de conférences à l'Université de Montpellier II, rapporteur,
- M. Dario Floreano, Professeur à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, rapporteur,
- M. Bernard Espiau, Directeur de Recherche à l'INRIA-Rhône-Alpes, Grenoble, examinateur,
- M. Simon Thorpe, Directeur de Recherche CNRS au Centre de Recherche Cerveau et Cognition (CERCO), Toulouse, examinateur,

Je tiens aussi à remercier l'ensemble des personnes avec lesquelles j'ai travaillé ou que j'ai côtoyées au laboratoire, pour les moments agréables passés ensemble : S. Amic, F. Aubépart, B. Besson, A. Boyer, M. Boyron, S. Cour, M. El Farji, N. Garnier, T. Mukai, J. C. Orsini, F. Paganucci, J. Perrin, M. Rigal, F. Roskam, S. Scotto, J. Serres, S. Viollet et P. Zunino.

Je tiens à remercier tout particulièrement Marc Boyron pour son aide technique inestimable (notamment en ce qui concerne le circuit DEM à base de composants à cellules analogiques programmables) et Stéphane Viollet pour les échanges fructueux entretenus pendant près de 4 ans qui m'ont aidés à mener à bien ce travail.

Je remercie également Stéphane Durant de Galatée Films pour ses données sur la migration des oiseaux, Julien Serres pour son expertise sur l'analyse mécanique du bras pantographique et pour ses commentaires pertinents sur le manuscrit, Stéphane Amic pour la conception du DEM mixte et enfin Mathieu Rigal pour la réalisation du boîtier d'isolation galvanique.

Enfin je remercie Katell Trego ainsi que ma famille et mes amis pour leur soutien sans faille.

Liste des abréviations

<i>Abréviation</i>	<i>Signification</i>
AFCS	« Automatic Flight Control System » (Système de contrôle automatique de vol)
BEES	« <u>B</u> io-inspired <u>E</u> ngineering of <u>E</u> xploration <u>S</u> ystems » (Programme financé par la NASA pour l'ingénierie bioinspirée des systèmes d'exploration spatiale)
c/°	Cycle par degré
CAG	Contrôle Automatique de Gain
CMS	Composant à Montage de Surface
DEM	Détecteur Élémentaire de Mouvement
DSP	« Digital signal Processors » (Processeur de signaux numériques)
ESA	« European Space Agency » (Agence spatiale européenne)
FPAA	« Field-Programmable Analog Array » (composant à cellules analogiques programmables)
FPGA	« Field-Programmable Gate Array » (Composants à cellules logiques programmables)
GPS	« Global Positioning System » (Système de position par satellite)
H1	L'un des neurones à large champ de la mouche (à sensibilité au mouvement horizontal)
ILS	Instrument Landing System » (Système de guidage au sol pour l'atterrissage des aéronefs)
JPL	Jet Propulsion Laboratory : Laboratoire de la NASA travaillant notamment sur l'exploration spatiale à l'aide de robots
LTCC	« Low Temperature Co-fired Ceramic » (Céramiques co-cuites à basse température)
MAV	« Micro-Air Vehicle » (micro-aéronef <i>ou</i> microdrone)
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsions
NASA	« <u>N</u> ational <u>A</u> eronautics and <u>S</u> pace <u>A</u> gency » (Agence spatiale des États-Unis)
NOE	Nap Of the Earth (Suivi de Terrain)
OCTAVE	« Optical flow Control sysTEM for Aerial Vehicles » (Système de contrôle d'aéronefs par le flux optique)
OFF	Front de contraste Noir-Blanc
ON	Front de contraste Blanc-Noir
OSCAR	« Optical Scanner for the Control of Autonomous Robots » (Capteur optique à balayage pour le contrôle de robots autonomes)
PID	« Proportional-Integral-Derivative » (Contrôleur à action proportionnelle, intégrale et dérivée)

<i>Abréviation</i>	<i>Signification</i>
R	Rhabdomère
UAV	« Unmanned Aerial Vehicle » (Aéronef sans pilote <i>ou</i> Drone)
VLSI	« Very Large Scale Integration » (Miniaturisation à grande échelle de transistors sur silicium)
VS1	L'un des neurones à large champ de la mouche (sensible au mouvement vertical)
VTOL	« Vertical Take-Off and Landing » (Aéronef à décollage et à atterrissage vertical)

Liste des notations

<i>Notation</i>	<i>Signification</i>	<i>Unité</i>
$A(\varphi)$	Fonction de sensibilité de type gaussien des photodiodes	
$C_{\text{rotor}}(p)$	Correcteur de la boucle de vitesse rotor	
C_S	Couple stabilisant	N.m
$C_{\omega}(p)$	Correcteur de la boucle visuo-motrice	
E_p	Énergie potentielle	J
f	Distance focale	m
$\vec{f}_v$	Force liée aux frottements visqueux selon z	N
$\vec{F}_{\text{Centrifuge Aéronef}}$	Force centrifuge liée à la masse de l'aéronef	N
$\vec{F}_{\text{Centrifuge Bras}}$	Force centrifuge liée à la masse des bras	N
$\vec{F}_{\text{Centrifuge Contrepoids}}$	Force centrifuge liée aux contrepoids du bras pantographique	N
F_N	Amplitude de la force de poussée	N
$\vec{F}_S$	Force de sustentation	N
$G_{\text{ph}}(p)$	Fonction de transfert de l'étage photorécepteur	
$G_{\text{rotor}}(p)$	Fonction de transfert du rotor	
$G_S(v)$	Fonction de transfert du filtre spatial	
$G_{\text{vair}}(p)$	Fonction de transfert de déplacement entre la commande du servomoteur de tangage, $u_{\text{servoTangage}}$ [V] et la vitesse de l'air, v_{air} [m/s]	
$G_z(p)$	Fonction de transfert d'élévation	
$G_{\omega}(p)$	Fonction de transfert entre la vitesse rotor et le flux optique ventral	
h	Hauteur locale par rapport au sol, couramment appelée hauteur sol	m
$H_{\text{rotor}}(p)$	Fonction de transfert du capteur de vitesse rotor	
I	Luminance	-
K_Z	Gain de la fonction de transfert d'élévation	-
l	Hauteur du train d'atterrissage	m
N_{biais}	Biais de compensation ajouté à la commande rotor pour compenser le poids de l'aéronef	Tours par minutes
$\vec{P}_{\text{aéronef}}$	Poids de l'aéronef	N
$Ph(t)$	Sortie photorécepteur	V
R_{rotor}	Consigne de vitesse du rotor	Tours par minutes

<i>Notation</i>	<i>Signification</i>	<i>Unité</i>
m	Valeur de contraste	-
t_s	Temps de stabilisation	s
u_{rotor}	Commande rotor	V
$u_{\text{servoTangage}}$	Tension de commande du servomoteur de tangage	V
$\vec{v}$	Vecteur vitesse de l'aéronef	m/s
v_{air}	Vitesse de l'air	m/s
v_{vent}	Vitesse moyen du vent	m/s
$\vec{v}_{\text{app}}$	Vecteur de vitesse apparente, vue de l'œil	m/s
v_x	Composante horizontale de la vitesse v de l'aéronef, appelée couramment vitesse sol	m/s
v_z	Composante verticale de la vitesse v de l'aéronef	m/s
x	Position azimutale du bord contrasté par rapport à l'axe optique du photorécepteur considéré	m
x_i	Largeur d'un secteur associé à un niveau de gris	m
z	Altitude de référence de l'aéronef	m
z_{relief}	Altitude du relief	m
$(O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$	Repère absolu	-
$(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$	Repère local dont le centre est l'œil de l'agent	-
δt	Pas de temps élémentaire	s
$\delta \phi$	Pas élémentaire spatial	$^\circ$ rad
Δt	Retard entre impulsions ou signaux lumineux	s
$\Delta \phi$	Angle interommatidial de l'œil de la mouche	$^\circ$ rad
$\Delta \rho$	Largeur à mi-hauteur du diagramme de sensibilité directionnelle du photorécepteur (sensibilité angulaire de type gaussien)	$^\circ$ rad
Φ	Angle d'élévation du point P par rapport à la direction de déplacement $\vec{v}$	$^\circ$ rad
λ	Angle d'élévation du point P de l'environnement par rapport à l'axe (axe autour duquel l'environnement subit une rotation)	$^\circ$ rad
ν_i	Fréquence spatiale d'un contraste	$c/^\circ$ c/rad
ν_{co}	Fréquence de coupure spatiale	m^{-1}
ϕ	Angle sous-tendu par un point P par rapport à l'axe optique	$^\circ$ rad
Θ	Angle de tangage de l'appareil	$^\circ$ rad
τ	Constante de temps du circuit photorécepteur	s

<i>Notation</i>	<i>Signification</i>	<i>Unité</i>
ω	Vitesse angulaire ou flux optique	$^{\circ}/s$ rad/s
ω_c	Consigne de flux optique	V
ω_{DEM}	Estimation du flux optique réalisée par le Détecteur Élémentaire de Mouvement	V
ω_r	Vitesse angulaire d'un point P de l'environnement visuel vue du centre optique de l'œil lors d'une rotation	$^{\circ}/s$ rad/s
Ω_j	Vitesse de rotation de l'environnement autour de l'axe	$^{\circ}/s$ rad/s

Table des matières

I. Introduction.....	17
<i>I.1. Préambule.....</i>	18
<i>I.2. Différentes approches en robotique.....</i>	19
I.2.1. L'approche traditionnelle modélisation/élaboration.....	19
I.2.2. L'approche par interaction prioritaire (« subsumption architecture »)	20
I.2.3. L'approche bio-inspirée ou bio-mimétique.....	20
<i>I.3. Pourquoi robotiser un aéronef ?.....</i>	21
<i>I.4. La robotique aérienne classique.....</i>	23
<i>I.5. Pourquoi choisir les insectes en général et la mouche en particulier comme modèle biologique pour concevoir des micro-aéronef ?.....</i>	24
I.5.1. Pour les prouesses qu'elle réalise.....	24
I.5.2. Pour les capteurs qu'elle utilise.....	25
I.5.3. Pour la connaissance précise de son optique et de sa neuroanatomie...	26
<i>I.6. Projets de robotique aérienne d'inspiration biologique.....</i>	27
II. Le guidage visuel par flux optique : inspiration biologique.....	29
<i>II.1. Définition du flux optique.....</i>	30
<i>II.2. Expression du flux optique généré lors d'un déplacement.....</i>	31
II.2.1. Cas d'une translation pure.....	31
II.2.2. Cas d'une rotation pure.....	32
<i>II.3. Le guidage visuel chez les insectes ailés (approche comportementale)</i>	34
II.3.1. Privilégier un mouvement de translation.....	34
II.3.2. Maintenir un flux optique préféré.....	38
II.3.3. Modalités de propulsion des insectes.....	41
<i>II.4. La détection des mouvements pour l'évaluation du flux optique (approche neurophysiologique).....</i>	42
II.4.1. La structure d'un œil composé.....	42
II.4.2. Le système visuel de la mouche : du photorécepteur au neurone détecteur élémentaire de mouvement.....	44
II.4.3. Les neurones détecteurs de mouvement à large champ de la mouche..	46
III. La clé du guidage visuel : une régulation de flux optique par commande de la force de sustentation.....	49
<i>III.1. Hypothèses sur le problème de guidage de l'aéronef.....</i>	50
<i>III.2. Système de forces associé à un aéronef libre</i>	52
<i>III.3. Principe du pilote automatique OCTAVE.....</i>	53
<i>III.4. Les paramètres d'OCTAVE pour contrôler la hauteur de sécurité</i>	

.....	55
III.4.1. La consigne de flux optique, ω_c	55
III.4.2. L'amplitude de la force propulsive	55
III.5. Les perturbations affectant le pilote automatique OCTAVE.....	56
III.5.1. Le relief du terrain survolé.....	56
III.5.2. Le vent de face ou le vent arrière.....	56
III.6. Dépendance du point d'équilibre d'altitude et de vitesse en fonction du profil vertical du vent.....	57
III.7. Application à un aéronef à voilure tournante.....	59
III.7.1. Contrôle indépendant de l'altitude et de la vitesse par rapport à l'air.....	60
III.7.2. Le pilote automatique OCTAVE appliqué à un aéronef à voilure tournante.....	61
IV. Le Détecteur Élémentaire de Mouvement (DEM) : un capteur de flux optique.....	63
IV.1. Les modèles de la fonction détection du mouvement.....	64
IV.2. Position d'un bord contrasté et contraste.....	66
IV.3. Les étapes du traitement DEM originel.....	67
IV.4. Les bases neurophysiologiques du DEM originel.....	70
IV.5. Modifications apportées depuis le DEM originel.....	72
IV.6. L'ensemble lentille-photorécepteur (Étapes 1 à 3 du traitement DEM).....	73
IV.6.1. Les caractéristiques optiques de l'ensemble lentille-photorécepteur.....	73
IV.6.2. L'étage d'entrée : le montage photoconducteur.....	75
IV.6.3. Sensibilité angulaire des photodiodes.....	76
IV.7. Les circuits utilisés pour le traitement temporel (Étapes 4 à 9 du traitement DEM).....	79
IV.7.1. Le DEM analogique basé sur 2 FPAA's (composant à cellules analogiques programmables).....	79
IV.7.2. Le DEM mixte (combinant filtrage analogique et numérique).....	83
IV.7.3. Comparaison des différents circuits DEM.....	87
IV.8. Analyse expérimentale des signaux visuels filtrés passe-bande	88
IV.8.1. Effet d'un faible contraste.....	88
IV.8.2. Effet de diverses fréquences spatiales	89
IV.8.3. Effet du filtrage spatial	90
IV.8.4. Conclusion sur l'analyse des signaux visuels filtrés passe-bande.....	91
IV.9. Effet des vibrations sur la mesure DEM.....	92
V. Banc d'essai en vol.....	95
V.1. Le micro-aéronef.....	98

V.1.1. Les actionneurs de l'aéronef.....	98
V.1.2. Le capteur de vitesse de rotation du rotor de l'aéronef.....	100
V.2. Le système de commande et de visualisation.....	100
V.2.1. Carte d'entrée/sortie munie d'un DSP et environnement logiciel.....	100
V.2.2. Les capteurs pour la visualisation.....	101
V.2.3. La topologie du câblage et des alimentations du banc d'essai en vol. .	103
V.3. Asservissement de la vitesse de rotation du rotor de l'aéronef. .	104
V.3.1. Identification de la fonction de transfert de vitesse rotor.....	105
V.3.2. Fonction de transfert du capteur de vitesse rotor.....	106
V.3.3. Synthèse du correcteur de vitesse rotor.....	106
V.3.4. Performances de l'asservissement de vitesse rotor.....	107
V.4. Le bras tournant pantographique.....	109
V.4.1. Fonction de transfert d'élévation associée à un aéronef libre à voilure tournante.....	110
V.4.2. Influence des forces d'inertie sur l'aéronef.....	111
V.4.3. Analyse de la stabilité des points d'équilibre de l'aéronef.....	113
V.5. Modélisation par fonction de transfert du système aéronef.....	116
V.5.1. Modélisation et identification du transfert d'élévation.....	116
V.5.2. Modélisation et identification de la fonction de transfert de déplacement	119
V.5.3. Système aéronef simplifié.....	120
V.6. L'environnement (contrastes, relief et vent).....	121
V.6.1. Les contrastes au sol.....	121
V.6.2. Le relief.....	121
V.6.3. Le vent.....	122
V.7. Conclusion sur le banc d'essai en vol.....	122
VI. La boucle visuo-motrice OCTAVE.....	125
VI.1. Simulation de la boucle visuomotrice.....	126
VI.1.1. La simulation des sorties photorécepteurs (« Phase A »).....	128
VI.1.2. Validation de la simulation du traitement DEM (« Phase B »).....	130
VI.1.3. Simulation de la dynamique d'élévation (« Phase D »).....	132
VI.2. Mise en œuvre de la régulation de flux optique sur le banc d'essai en vol.....	132
VI.2.1. Linéarisation de la boucle de régulation du flux optique.....	133
VI.2.2. Synthèse du correcteur de la boucle visuo-motrice.....	136
VII. Comportement et performances du micro-robot aérien captif	139
VII.1. Suivi de terrain automatique.....	140
VII.1.1. Trajectoires du robot en fonction de l'angle de tangage.....	140
VII.1.2. Trajectoires en fonction de la consigne de flux optique.....	142
VII.1.3. Reproductibilité des trajectoires.....	143

VII.1.4. Comparaison entre les données simulées et les données réelles de la boucle visuomotrice	145
VII.2. Décollage automatique.....	146
VII.3. Atterrissage automatique.....	147
VII.4. Réaction au vent.....	150
VIII. Discussion.....	153
<i>VIII.1. Discussion générale sur le pilote automatique OCTAVE.....</i>	<i>154</i>
<i>VIII.2. Modélisation de l'atterrissage automatique.....</i>	<i>155</i>
<i>VIII.3. Comparaison avec les insectes</i>	<i>162</i>
<i>VIII.4. Recherches connexes.....</i>	<i>166</i>
<i>VIII.5. Les autres domaines d'application du pilote automatique OCTAVE.....</i>	<i>169</i>
IX. Conclusion.....	171
<i>IX.1. Pourquoi s'inspirer des insectes pour concevoir des micro-aéronefs ? (cf. Chapitre I).....</i>	<i>172</i>
<i>IX.2. Inspiration biologique liée à cette étude (cf. Chapitre II).....</i>	<i>172</i>
<i>IX.3. OCTAVE : réguler le flux optique en commandant la force de sustentation (cf. Chapitre III).....</i>	<i>173</i>
<i>IX.4. Le Détecteur Élémentaire de Mouvement : un capteur de flux optique (cf. Chapitre IV).....</i>	<i>174</i>
<i>IX.5. Le Banc d'essais en vol (cf. Chapitre V).....</i>	<i>174</i>
<i>IX.6. La boucle visuo-motrice (cf. Chapitre VI).....</i>	<i>175</i>
<i>IX.7. Comportements et performances du micro-aéronef captif (cf. Chapitre VII).....</i>	<i>175</i>
<i>IX.8. Analogie des trajectoires du robot équipé d'OCTAVE avec celles des insectes (cf. Chapitre VIII).....</i>	<i>176</i>
<i>IX.9. Amélioration à apporter et objectifs futurs.....</i>	<i>176</i>

I. Introduction

<i>I.1. Préambule.....</i>	<i>18</i>
<i>I.2. Différentes approches en robotique.....</i>	<i>19</i>
I.2.1. L'approche traditionnelle modélisation/élaboration.....	19
I.2.2. L'approche par interaction prioritaire (« subsumption architecture »)	20
I.2.3. L'approche bio-inspirée ou bio-mimétique.....	20
<i>I.3. Pourquoi robotiser un aéronef ?.....</i>	<i>21</i>
<i>I.4. La robotique aérienne classique.....</i>	<i>23</i>
<i>I.5. Pourquoi choisir les insectes en général et la mouche en particulier comme modèle biologique pour concevoir des micro-aéronef ?.....</i>	<i>24</i>
I.5.1. Pour les prouesses qu'elle réalise.....	24
I.5.2. Pour les capteurs qu'elle utilise.....	25
I.5.3. Pour la connaissance précise de son optique et de sa neuroanatomie...	26
<i>I.6. Projets de robotique aérienne d'inspiration biologique.....</i>	<i>27</i>

1.1. Préambule

Ce travail, effectué dans l'équipe Biorobotique dirigée par Nicolas Franceschini, s'inscrit dans un contexte de robotique d'inspiration biologique initiée au laboratoire voici près de 20 ans.

Cette démarche bio-robotique a conduit l'équipe à concevoir, simuler et construire, d'abord des capteurs bio-inspirés puis des systèmes de guidage bio-inspirés pour micro-aéronef. Une première étape a été franchie avec la réalisation dès 1991 d'un robot terrestre autonome, le *robot-mouche*, équipé d'un œil composée et capable d'éviter les obstacles à vive allures (50cm/s) (Pichon, Blanes et Franceschini, 1989; Franceschini, Pichon et Blanes, 1992; Pichon, 1991; Blanes, 1991). Transférer des principes du vivant à des robots permet d'apporter des solutions viables à des problèmes de robotique réputés difficiles. Cette démarche permet également d'effectuer un retour vers le vivant en suggérant des idées nouvelles d'expériences à réaliser chez l'homme et l'animal pour affiner la compréhension des fonctions sensori-motrices.

Conférer un certain degré d'autonomie et une certaine autorité de contrôle à un micro-aéronef est un véritable défi, tant sont sévères les contraintes de masse, d'énergie embarquée et de ressources de traitement.

En 1994 furent présentées les premières simulations du laboratoire sur le contrôle d'altitude d'un aéronef basé sur le flux optique (Mura et Franceschini, 1994). Plus récemment, Netter et Franceschini ont réalisé la démonstration d'un évitement d'obstacle élémentaire par un mini-hélicoptère captif de 850 grammes, dont l'œil comportait une vingtaine de photorécepteurs (Netter et Franceschini, 1999 ; Netter 2000 ; Netter et Franceschini, 2002).

Au début de ce travail de thèse, nous avons fait le choix de reprendre à la base l'ensemble des données biologiques sur le comportement des insectes ailés pour concevoir un pilote automatique capable de guider un robot aérien, au-dessus d'un environnement de type colline.

1.2. Différentes approches en robotique

1.2.1. L'approche traditionnelle modélisation/élaboration

Depuis la fin des années 1960, de nombreux robots utilisent une approche fondée sur le paradigme suivant :

1. Acquérir les données venant des différents capteurs,
2. Modéliser l'environnement grâce aux traitements intensifs de ces données fournies par les capteurs,
3. Élaborer un plan d'action pour atteindre un objectif précis,
4. Exécuter le plan d'action les actionneurs en commandant de façon appropriée.

Cette approche acquisition/modélisation/élaboration permet d'avoir des garanties vis-à-vis de l'objectif à atteindre. Ainsi, un plan d'action réalisable peut être optimisé avant même que le robot n'effectue le moindre mouvement. On peut, par exemple, garantir qu'un robot choisira toujours le chemin le plus court entre un point de départ et un point d'arrivée.

Par contre, on peut identifier quelques inconvénients :

- Ce type d'architecture nécessite un ordonnancement sophistiqué des tâches. De plus, la modélisation de l'environnement demande une puissance de calcul souvent importante : les données sont nombreuses et la modélisation doit être précise. Des capteurs de grande précision, donc onéreux, sont souvent requis.
- L'utilisation de multiples capteurs nécessite une fusion de l'ensemble de ces données pour modéliser l'environnement (pour réaliser, par exemple, une cartographie en 2 dimensions des obstacles). En outre, le programme doit savoir interpréter des informations contradictoires (typiquement un défaut de capteur) issues de différents capteurs et déterminer tout de même un plan d'action pour le robot. La complexité du système a donc tendance à augmenter rapidement avec le nombre de capteurs.
- Le principal problème est la nature séquentielle du traitement. Elle implique de modéliser l'environnement avant d'agir. Or, pendant le temps requis pour modéliser l'environnement, celui-ci a pu changer sous l'effet d'une action extérieure. L'action résultante de l'étape de modélisation pourra donc s'avérer complètement inadaptée. Pour pallier ce problème, la solution mise en œuvre consiste à augmenter la puissance du calculateur pour diminuer le temps de modélisation, à ralentir la progression du robot dans l'environnement ou à assumer que celui-ci est stationnaire. Cette façon de faire est donc peu compatible avec les contraintes liées à la miniaturisation, à l'autonomie énergétique, au déplacement rapide, et

encore moins, à un environnement non-stationnaire.

I.2.2. L'approche par interaction prioritaire (« subsumption architecture »)

Rodney Brooks a développé l'approche par interaction prioritaire au milieu des années 1980 au MIT, à Boston (Brooks 1986, Brooks 1987). Il critiqua en premier lieu l'approche modélisation/élaboration pour sa lenteur. L'approche par interaction prioritaire donne lieu à un fin couplage entre la perception et l'action et rejette toute idée de représentation globale de l'environnement.

Dans un premier temps, il s'agit de décomposer le comportement en différentes tâches indépendantes les unes des autres. Ensuite, il s'agit de hiérarchiser ces tâches en leur donnant un ordre de priorité. Cette approche conduit à une architecture modulaire. Chaque module est responsable de sa perception et on lui associe une action spécifique. L'ajout d'une couche logicielle de priorité moindre est possible sans modification des couches à forte priorité, dites « de bas niveau ».

Un robot répondant à ce type d'architecture devient extrêmement réactif mais aucune optimisation globale de son comportement n'est réalisée.

I.2.3. L'approche bio-inspirée ou bio-mimétique

L'approche bio-inspirée pour la conception de système s'appuie sur la nature pour « innover » et créer de nouveaux systèmes. Ce domaine est très fortement multidisciplinaire car il établit un pont entre les nouvelles connaissances sur la nature (matériaux, capteurs, actionneurs, circuiteries, traitement, ...) et les nouveaux moyens technologiques (micro-électronique, optronique, micro et nano-technologies, capacité de calcul et de simulation, ...) dans le but d'imiter les systèmes vivants. Il s'agit en effet de venir rechercher dans une gigantesque « banque de données » naturelle, des créations susceptibles d'aboutir à la conception de systèmes innovants (Franceschini 2003). Mais il est impossible de copier exactement la nature dans toute sa complexité. Par contre, il est nécessaire de comprendre les mécanismes mis en jeu (parfois dans leurs infimes détails) pour les réutiliser à bon escient de façon pragmatique et opportuniste.

Les systèmes présents dans la nature ont des caractéristiques particulièrement intéressantes. Tout d'abord, ces systèmes existent et fonctionnent bien. Certains d'entre eux, et c'est le cas des systèmes « insectes », ont même été testés depuis des centaines de millions d'années. Ainsi, l'évolution a optimisé, de façon globale dans leur niche écologique, nombres de

variables : taille, masse, énergie, fiabilité, ...

Les contraintes de plus en plus sévères de la robotique (en termes de miniaturisation, de réduction des coûts mais également d'autonomie) incitent les roboticiens à se tourner vers les solutions, minimalistes et longuement éprouvées de la nature.

En bionique du traitement du signal, il s'agit de modéliser au plus près des fonctions identifiées de traitement du signal neuronal sous forme de fonctions de transfert linéaires ou de fonctions non-linéaires, puis de les reproduire en circuits électroniques.

En robotique d'inspiration biologique (*biorobotique*), des boucles de régulation sur des grandeurs biologiquement plausibles (vitesse de rotation par mesure inertielle, direction de polarisation de la lumière, son, flux optique) permettent de concevoir un robot répondant à un comportement recherché en s'appuyant au maximum sur des données biologiques (par ex : anatomiques, électrophysiologiques et comportementales). L'utilisation des modalités sensorielles (ou capteurs) présentes sur les modèles biologiques vise à reproduire au plus près le système sensori-moteur qui équipe l'animal. Mais il s'agit également de ne pas chercher à tout prix à copier la nature, ne serait-ce qu'à cause de la différence technologique entre les circuiteries biologiques et électroniques. Enfin, cette démarche impose la réalisation d'un démonstrateur physique afin de pouvoir tester le couple perception/action mis en œuvre et ainsi analyser le comportement du robot.

1.3. Pourquoi robotiser un aéronef ?

L'une des charges de travail d'un pilote d'aéronef est de respecter la première règle de l'air applicable à tout pilote, à savoir « voir et éviter ».

Prenons l'exemple de l'hélicoptère : il s'agit de l'aéronef qui comporte les capacités de vol les plus complètes. Il est capable à la fois de décoller et d'atterrir en utilisant une piste réduite par rapport à l'espace nécessaire aux avions. Mais l'hélicoptère est également capable de faire du vol stationnaire, des glissades de côté, ainsi que du vol de croisière jusqu'à des vitesses pouvant atteindre 300km/h.

En agissant sur les commandes de vol (Figure I.1), le pilote doit corriger par lui-même les nombreuses non-linéarités et couplages que présente ce système aérodynamique. L'un de ces couplages est constitué par l'anticouple, qui est fonction du pas collectif, lui-même régissant la poussée du rotor principal. Un autre couplage à vaincre est constitué du roulis induit par un tangage de l'aéronef, roulis intempestif résultant de la force de Coriolis.

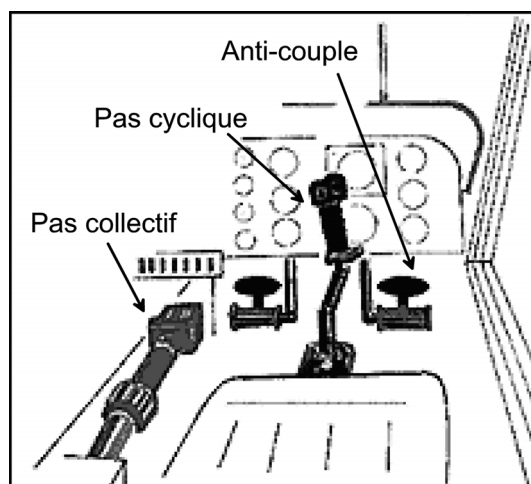


Figure I.1 Commandes de vol d'un hélicoptère présentes dans le cockpit.

Le pilote doit commander en même temps le pas cyclique et le pas collectif du rotor principal, mais également le palonnier contrôlant le rotor de queue (anticouple).

Mais, par dessus tout, le pilote doit mener à bien des missions non triviales, telles que la recherche d'un rescapé en haute mer, sous contrôle visuel.

Il est intéressant de remarquer que pour un hélicoptère, un vol en suivi de terrain (en-dessous de 30m de hauteur sol) (Figure I.2) est très dangereux et difficile pour le pilote car la vitesse par rapport à l'air et l'altitude varient avec le relief et les conditions atmosphériques. Aujourd'hui, les membres d'équipage font confiance aux instruments de bord qui fournissent une information issue de la fusion de plusieurs capteurs. Le pilote commande l'appareil manuellement avec l'aide du copilote pour la planification de la trajectoire.

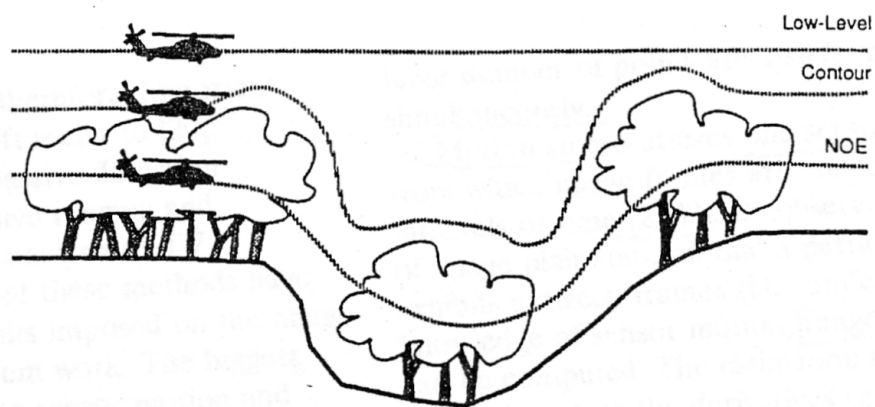


Figure I.2 De bas en haut, trajectoire d'un hélicoptère lors d'un vol de suivi de terrain (NOE = Nap Of the Earth), de contournement et de basse-altitude.

(Bhanu et al. 1996)

1.4. La robotique aérienne classique

Les problèmes de robotisation ont déjà été quelque peu abordés pour des aéronefs sans pilote utilisant des systèmes conventionnels de traitement d'image (Roberts et al., 2002 ; Amidi et al., 1998). Un exemple remarquable est celui de l'hélicoptère Yamaha R50 instrumenté par Amidi et al. à l'université de Carnegie Mellon, Pittsburgh. Il réalise toutes les phases de vol (même les plus risquées telles que le vol stationnaire et l'atterrissage) sur la base de repères visuels naturels, avec fusion de plusieurs informations sensorielles (Amidi et al., 1998). Mais le traitement réalisé à bord conduit à une avionique lourde (caméra, GPS différentielle, centrale inertielle, magnétomètre), à un équipement informatique lourd et de consommation élevée, de sorte que l'appareil en état de vol ne pèse pas moins de 67.000 grammes et le rotor principal mesure un peu plus de 3 mètres de diamètre. Cette étude a conclu à la nécessité de réaliser une cartographie du terrain survolé pour palier à l'imprécision de la fusion des différents capteurs (Miller et al., 1999).

Depuis 1999, l'hélicoptère MARVIN de Berlin (11.000 grammes) réalise un éventail complet de manœuvres (décollage, atterrissage, vol stationnaire) mais sans utiliser la vision, en s'appuyant uniquement sur des informations métriques (Capteur Ultra-Son, GPS, centrale inertielle, magnétomètre).

Très récemment, un hélicoptère de 7.000 grammes « seulement » équipé d'une centrale inertielle et d'une caméra (dont le traitement d'image est déporté au sol) a réussi à se maintenir en vol stationnaire au dessus d'amers visuels en dépit d'une dérive latérale non négligeable de 15m en 90s en présence de vent en rafale (Garraat et Chahl, 2003).

Les militaires utilisent des pilotes automatiques classiques (ou AFCS pour « Automatic Flight Control System ») capables de suivre et guider l'aéronef sans pilote (appelé aussi *drone*) dans sa manœuvre d'atterrissage à partir d'une imposante station sol équipée d'un radar (appelée ILS pour « Instrument Landing System »).

Quant aux *micro-aéronefs* (également appelés microdrones, MAVs -pour Micro-Air Vehicles- ou micro-UAV -pour micro-Unmanned Aerial Vehicles-), leur masse prévue est inférieure à 100 grammes et leur taille est inférieure à 15 cm. Le principal problème lié à leur robotisation est l'inexistence d'avionique classique compatible avec les contraintes sévères de masse et d'énergie imposées par ce type d'aéronef : les centrales inertielles laser à référence absolue, le GPS différentiel et les systèmes radars sont trop lourds pour des drones dont la masse est 100 à 1000 fois plus faible que celle des appareils décrits ci-dessus. De plus, la faible taille et la

faible signature radar ou visuelle rendent le télé-pilotage d'un micro-aéronef particulièrement difficile. Quant au pilotage virtuel sur la base des images transmises par une caméra embarquée vers un pilote resté au sol (technique largement utilisée pour le pilotage des drones classiques dont l'envergure est supérieure à 150cm), il se heurte encore aux problèmes de miniaturisation et de consommation des caméras gyro-stabilisées et des émetteurs de bord capables de transmettre au sol une image dotée d'une qualité suffisante.

C'est pourquoi nous avons choisi d'exploiter nos connaissances sur les insectes pour tenter de conférer un certain degré d'autonomie à un micro-aéronef.

1.5. Pourquoi choisir les insectes en général et la mouche en particulier comme modèle biologique pour concevoir des micro-aéronef ?

1.5.1. Pour les prouesses qu'elle réalise

Les performances de l'insecte terrestre ou volant en termes de rapidité et de capacité de navigation restent difficiles à atteindre par tout système artificiel utilisant uniquement des capteurs proprioceptifs.

Lorsque l'on détaille les caractéristiques de vol des insectes en général, et de la mouche en particulier (Tableau I.1), on réalise à quel point leurs performances dépassent celles des engins construits par l'homme.

Taille	< 2cm
Masse	100mg
Vitesse linéaire maximale	10m/s
Vitesse de rotation maximale en lacet	2000°/s
Accélération linéaire maximale	20m/s ²
Accélération angulaire maximale	10 ⁵ °/s ²

Tableau I.1 Caractéristiques de la mouche bleue *Calliphora vicina*
(d'après Schilstra et van Hateren 1999)

En effet, les insectes ailés en général (et les mouches en particulier) peuvent :

- Décoller et atterrir avec précision (sans avoir besoin de pistes aménagées),
- Parcourir plusieurs milliers de kilomètres (pour certains papillons migrants) en complète autonomie (une distance 100 millions de fois supérieure à la taille de l'animal).
- Suivre un terrain et éviter les obstacles présents au sol,
- Éviter des obstacles présents devant eux (du type forêt d'obstacles),

- Naviguer dans des milieux *a priori* inconnus,
- Réaliser à la fois des virages relevés, des plonges, des manœuvres d'évitement en zigzag, des virages en épingle à cheveux,
- Réaliser un vol stationnaire dans le cas de nombreux diptères (tels que les syrphes et les éristales). Il s'agit d'une tâche complexe car les constantes de temps mécaniques associées à des aéronefs de petites tailles sont faibles.
- Réagir de façon appropriée aux perturbations aérodynamiques : les insectes ne s'écrasent pas sur le sol ou contre les murs lors de rafales ou de courants d'air.

I.5.2. Pour les capteurs qu'elle utilise

Les insectes utilisent en vol différentes modalités sensorielles qui font appel à des capteurs variés :

1. **les antennes**, qui sont sensibles, entre autres, à la vitesse de l'air (Saager et Gewecke 1985, 1989), à la température et à de multiples molécules odorantes,
2. **les cils**, qui sont des mécano-récepteurs présents sur le corps et la tête des insectes,
3. **les ocelles**, qui sont trois petits yeux placés sur le front de l'insecte et qui servent de détecteurs d'horizon (Stange 1981),
4. **les photorécepteurs placés sur le pourtour des deux yeux composés**, qui sont sensibles à la lumière polarisée et génèrent une information de cap par rapport au plan méridien contenant le soleil (Labhardt, 1998),
5. **les balanciers**, présents seulement chez les diptères, qui sont sensibles aux vitesses de rotation mécanique exercée sur le thorax selon 3 axes (lacet, tangage, roulis).

La force de Coriolis, qui dépend directement de la vitesse de rotation modifie la cinématique de vibration des balanciers (qui oscille à la fréquence des ailes -100 à 200 Hz- mais en opposition de phase avec les ailes). Des expériences comportementales ont montré que l'influence de cette information inertielle sur la réponse visuo-motrice commence à des vitesses de rotation de 50°/s mais devient prépondérante par rapport à la vision à partir d'environ 300°/s, soit un peu moins d'1Hz (Hengstenberg 1988, Sherman et Dickinson 2003). La bande passante exacte de ce véritable gyromètre reste encore inconnue, mais des réponses motrices ont été enregistrées pour des vitesses de rotation atteignant 1800°/s soit 5Hz (Hengstenberg 1988),

6. **les deux yeux composés** avec, en particulier, leur neurones détecteurs de mouvement, qui sont capables d'évaluer le flux optique et qui seront détaillés à la fin du chapitre II.

I.5.3. Pour la connaissance précise de son optique et de sa neuroanatomie

L'établissement d'un modèle neuronal, même parcimonieux, s'avère moins difficile chez les invertébrés que chez les vertébrés. En effet, l'analyse fine de la circuiterie du couple perception/action est plus facilement accessible chez l'insecte que chez un vertébré comme l'homme ou le singe.

Tout d'abord, le système nerveux des insectes comporte un faible nombre de neurones (environ 10^6 pour la mouche à comparer au 10^{12} de l'homme). De plus, la quantité d'informations visuelles n'est pas du même ordre : environ 3000 pixels présents dans l'œil de la mouche contre 126 millions dans l'œil humain (6 millions de cônes situés essentiellement dans la *fovea* et 120 millions de bâtonnets situés essentiellement dans la rétine périphérique). Mais surtout, l'anatomie du système nerveux des invertébrés peut être considérée comme identique d'un individu à l'autre. Ainsi, on retrouve chez l'ensemble des individus d'une même espèce exactement les mêmes neurones, situés exactement au même endroit : les neurones sont identifiables individuellement. Enfin, l'œil composé des insectes présente une morphologie extrêmement répétitive, tant au niveau des structures optiques et photoréceptrices (Franceschini 1975) qu'au niveau des structures des ganglions optiques sous-jacents, ce qui réduit également la complexité du système¹. La mouche présente l'intérêt particulier que l'anatomie de chacun de ses ganglions optiques (dans lesquels sont réalisées les diverses étapes du traitement du signal visuel) a été décrite de façon exhaustive sous la forme de véritables cartographies (Strausfeld 1976, 1989). De plus, la présence de ganglions constitués seulement de quelques dizaines de neurones à large champ permet la réalisation d'enregistrements électrophysiologiques reproductibles. La mouche présente également l'avantage d'avoir chacun de ses photorécepteurs (présents dans le plan focal de la facette) associés à un guide-d'ondes bien individualisé, ce qui permet de stimuler individuellement les cellules de la rétine (Franceschini 1975 ; Riehle et Franceschini 1984; Franceschini et al 1989). Au niveau expérimental, la mouche offre donc la possibilité de contrôler de manière rigoureuse les stimuli optiques qui lui sont appliqués. Ainsi, la circuiterie neuronale peut-elle être stimulée de façon reproductible, ce qui favorise à la fois la richesse des expériences, l'émission d'hypothèses nouvelles, et surtout leur confrontation aux résultats d'autres expériences.

¹ Il a été vérifié, par exemple, que les connections entre les neurones de premier et de second ordre se répétaient d'une facette à une autre sans aucune erreur dans une région d'une centaine de facettes au moins.

1.6. Projets de robotique aérienne d'inspiration biologique

Plusieurs auteurs s'attaquent à ces problèmes depuis quelques années en se tournant vers des traitements sensori-moteurs longuement éprouvés par la nature (Mura et Franceschini, 1994 ; Netter et Franceschini, 1999, 2002 ; Iida et Lambrinos, 2000 ; Barrows et al., 2001 ; Neumann et Bülthoff, 2001 ; Ichikawa et al., 2001 ; Iida 2003 ; Meyer et Doncieux, 2003 ; Wu et al., 2003 ; Chahl et al., 2003 ; Chahl et al., 2004 ; Green et al., 2004).

Des simulations de pilotes automatiques basés sur le flux optique ont montré combien celui-ci est utile pour la navigation aérienne (Mura et Franceschini, 1994 ; Netter et Franceschini, 1999 ; Neumann et Bülthoff, 2001).

Un vol stationnaire a été tenté sur un mini-hélicoptère muni à son bord d'une détection visuelle du mouvement, mais l'objectif n'a finalement été atteint qu'en évaluant les mouvements de l'appareil à partir d'une caméra placée au sol (Ichikawa et al., 2001).

Le projet MFI (Micro-Flying Insect) à Berkeley a pour objectif de réaliser une véritable mouche artificielle, avec la suite de capteurs devant l'équiper (Wu et al., 2003). Déjà un thorax équipé d'ailes et de balanciers piézoélectriques a été mis au point mais la mise en place des capteurs et de l'électronique de bord nécessaire au contrôle de cet insecte artificiel semble difficile au regard du budget d'énergie et de masse.

D'autres auteurs ont proposé des pilotes automatiques pour la navigation aérienne en utilisant un algorithme génétique susceptible de converger vers la solution la mieux adaptée à l'environnement d'évolution (Zufferey et al., 2003 ; Meyer et Doncieux, 2003). Cette approche s'appuyant directement sur la phylogenèse, demande soit une modélisation préalable approfondie de l'environnement, soit une expérimentation exhaustive « en situation » pour délivrer une solution qui peut être elle-même assez spécifique de l'environnement d'évolution choisi.

En se fondant sur leurs propres études comportementales chez l'abeille, Srinivasan et al. ont observé lors de l'atterrissage un maintien du flux optique ventral (Srinivasan et al., 1996). En modélisant les trajectoires d'atterrissage, ils en sont venus à énoncer une « stratégie » imposant 2 règles devant être respectées par l'abeille (et tout autre aéronef) pour réaliser un atterrissage automatique (Srinivasan et al., 2000) :

1. maintenir un angle de descente constant,
2. ajuster sa vitesse par rapport à l'air de façon à maintenir constante la vitesse de défilement de l'image sur la partie ventrale de l'œil.

Sans dire comment l'abeille pourrait faire pour respecter ces deux règles, les auteurs ont reproduit ces 2 règles sur un bras robotisé n'associant en aucune façon les dynamiques communément présentes sur une abeille ou un aéronef.

Très récemment, quelques auteurs ont essayé de mettre en œuvre ces deux même règles sur un avion modèle réduit de quelques kg (Chahl et al., 2004) et sur un micro-aéronef de l'ordre de 100 grammes (Green et al., 2004), avec un succès limité. Leurs résultats sont discutés en détail en chapitre VIII.

II. Le guidage visuel par flux optique : inspiration biologique

<i>II.1. Définition du flux optique.....</i>	<i>30</i>
<i>II.2. Expression du flux optique généré lors d'un déplacement.....</i>	<i>31</i>
II.2.1. Cas d'une translation pure.....	31
II.2.2. Cas d'une rotation pure.....	32
<i>II.3. Le guidage visuel chez les insectes ailés (approche comportementale)</i>	<i>34</i>
II.3.1. Privilégier un mouvement de translation.....	34
II.3.2. Maintenir un flux optique préféré.....	38
II.3.3. Modalités de propulsion des insectes.....	41
<i>II.4. La détection des mouvements pour l'évaluation du flux optique (approche neurophysiologique).....</i>	<i>42</i>
II.4.1. La structure d'un œil composé.....	42
II.4.2. Le système visuel de la mouche : du photorécepteur au neurone détecteur élémentaire de mouvement.....	44
II.4.3. Les neurones détecteurs de mouvement à large champ de la mouche..	46

II.1. Définition du flux optique

Dès 1867, von Helmholtz émet l'hypothèse que l'homme utilise la parallaxe du mouvement pour percevoir le relief. Près d'un siècle plus tard, Gibson définit plus précisément la notion de flux optique : il s'agit d'un champ de vecteurs de vitesse angulaire générés sur l'œil d'un agent lors son déplacement (Gibson 1950; Gibson 1958). Ce champ de vecteurs générés lors d'un déplacement est généralement très complexe : il résulte à la fois des déplacements de l'œil de l'agent (rotation et translation) mais également des mouvements d'objets dans l'environnement visuel.

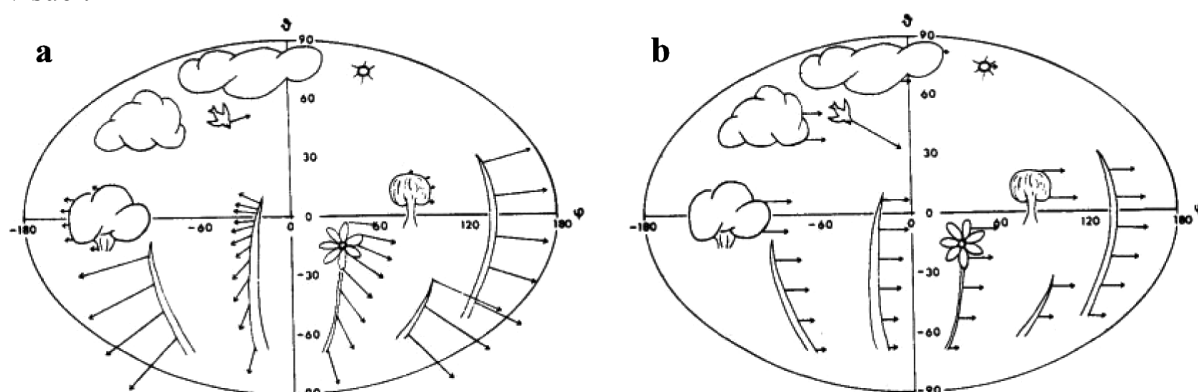


Figure II.1 Chaque vecteur représente le mouvement angulaire relatif des objets appartenant à la scène vu par un agent (homme, animal, robot ...).

(a) Flux optique lors d'une translation pure de l'observateur se déplaçant vers le point O ($\varphi=0^\circ, \theta=0^\circ$) de la direction du centre de la scène,

(b) Flux optique lors d'une rotation pure de l'observateur autour de son axe vertical.

Noter également le flux optique particulier généré par le déplacement de l'oiseau à l'intérieur de la scène (objet non-stationnaire).

(Buchner 1982)

La Figure II.1 montre de façon qualitative le champ de vecteurs de vitesse angulaire générés par un mouvement de translation (a) et de rotation (b). Dans le cas de la translation pure, on remarque que plus les objets sont proches de l'observateur (par exemple: brins d'herbe), plus les vitesses générées sont élevées. Par contre, lors d'un mouvement de rotation, les vitesses générées ne dépendent pas de la distance qui sépare l'agent des objets environnants.

Dès la fin des années 1930, Kennedy avait évoqué l'utilisation par les insectes de la vitesse angulaire générée sur leurs rétines (Kennedy 1939). Mais l'existence de véritables neurones détecteurs de mouvement chez un animal ne fut découverte qu'une vingtaine d'années plus tard par:

1. Hubel Wiesel (1959) dans le cortex visuel du singe,
2. Lettwin, Maturana, McCulloch et Pitts (1959) dans le toit optique de la grenouille.

II.2. Expression du flux optique généré lors d'un déplacement

Classiquement, les mouvements sont définis dans un repère absolu ($O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z}$): c'est-à-dire les mouvements de l'objet par rapport à un environnement stationnaire. Cependant, ici on considère les mouvements de l'environnement par rapport à un repère local ($O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$) dont le centre est l'œil de l'agent (Figure II.2).

Le flux optique perçu est une superposition de 2 termes : le flux optique de translation et le flux optique de rotation (Koenderink, van Doorn 1987) :

$$\vec{\omega} = \vec{\omega}_T + \vec{\omega}_R \quad \text{Équation II.1}$$

Détaillons l'expression du flux optique pour chacun de ces deux cas.

II.2.1. Cas d'une translation pure

En translation pure, le flux optique de translation (vitesse angulaire $\vec{\omega}_T$) dépend de la vitesse apparente $\vec{v}_{app}$ vue de l'œil :

$$\vec{\omega}_T = \frac{\vec{v}_{app}}{D} \quad \text{avec} \quad \|\vec{v}_{app}\| = v \sin \Phi \quad \text{Équation II.2}$$

Ainsi, le flux optique généré lors d'une translation pure selon $\vec{v}$ est défini par l'équation suivante (Whiteside et Samuel 1970):

$$\omega_T = \frac{v}{D} \sin \Phi \quad \text{Équation II.3}$$

Avec :

- ω_T , module du vecteur de la vitesse angulaire d'un point P de l'environnement visuel projetée sur la rétine de l'œil (Voir Figure II.2),
- v , module de la vitesse linéaire du déplacement du point P dans le repère local ($O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$) (Voir Figure II.2),
- D , la distance entre le point P de l'environnement visuel et l'œil de l'agent (Voir Figure II.2),
- Φ , l'angle d'élévation du point P par rapport à la direction de déplacement $\vec{v}$ suivant $\vec{i}$ (Voir Figure II.2 et Figure II.3a).

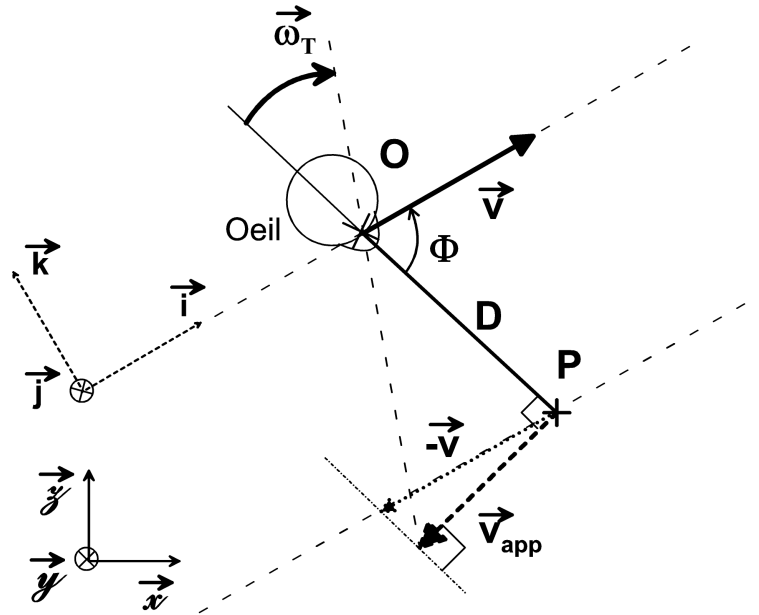


Figure II.2 Flux optique $\vec{\omega}_T$ généré par un œil se déplaçant en translation pure selon $\vec{v}$.

Un agent se déplace en translation suivant le vecteur $\vec{v}$. Ce vecteur définit ainsi un repère local $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$. Dans ce repère local, le point P (appartenant à l'environnement stationnaire) se déplace à une vitesse $-\vec{v}$. La vitesse relative $\vec{v}_{app}$ est la projection de $-\vec{v}$ sur la perpendiculaire à la direction de visée. La direction de visée est séparée d'un angle Φ par rapport à la direction de déplacement définie par $\vec{v}$.

(D'après Franceschini, 1996)

L'équation II.3 est de grande importance pour la suite de ce travail. Elle signifie que le flux optique de translation ω_T que perçoit un œil en mouvement au-dessus d'un panorama est proportionnel au quotient entre le module de la vitesse linéaire v et la distance D de l'œil au point visé P. La droite portant le vecteur $\vec{v}$, sur laquelle est réalisé le déplacement, est appelée l'axe des foyers du flux optique (Figure II.3a). Cette équation signifie aussi que lorsque l'angle Φ est faible (c'est-à-dire lorsque le point P est proche de cet axe) le flux optique est faible. *A contrario*, plus le point P est éloigné de cet axe des foyers du flux optique, plus les vitesses angulaires générées augmentent, jusqu'à atteindre un maximum pour $\Phi=90^\circ$.

II.2.2. Cas d'une rotation pure

Le flux optique généré lors d'une rotation pure autour de l'axe $\vec{j}$ est défini par l'équation suivante :

$$\|\vec{\omega}_R\| = \|\vec{\Omega}_j\| \cdot \sin \lambda \quad \text{soit} \quad \omega_R = \Omega_j \cdot \sin \lambda \quad \text{Équation II.4}$$

- où ω_R est la vitesse angulaire d'un point P de l'environnement visuel vue du centre optique de l'œil,
- Ω_j est la vitesse de rotation de l'environnement autour de l'axe $\vec{j}$ (Figure II.3b),
- λ l'angle d'élévation du point P de l'environnement par rapport à l'axe $\vec{j}$ (axe autour duquel

l'environnement subit une rotation) (Figure II.3b).

L'Équation II.4 montre que le flux optique de rotation est indépendant de la distance des objets contrastés et est fonction uniquement de l'angle d'élévation λ (voir Figure II.3b).

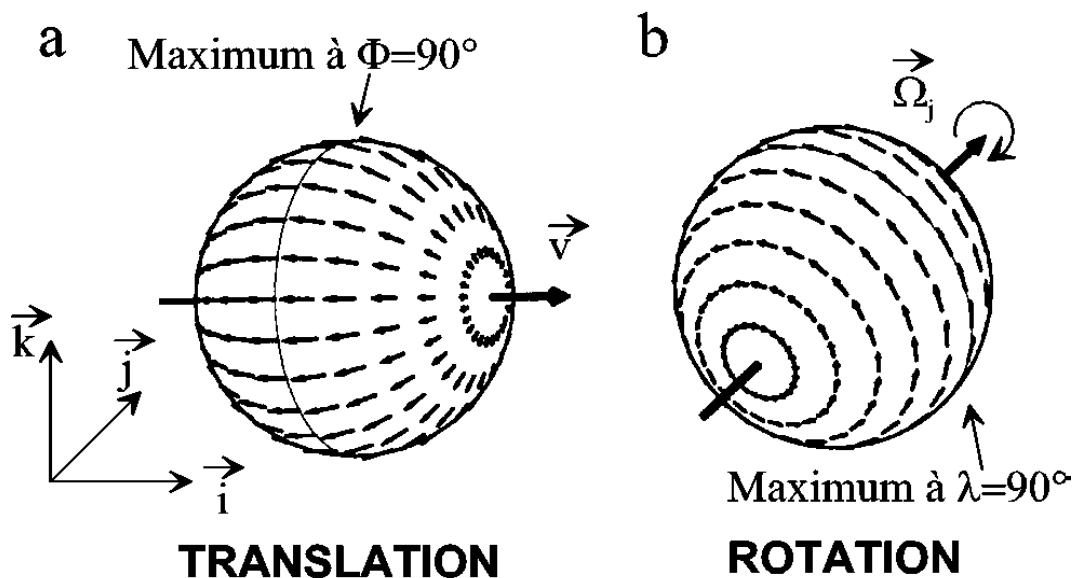


Figure II.3 (a) Champ des vecteurs du flux optique $\vec{\omega}$ généré dans le repère local de l'agent pour une *translation* pure à vitesse $\vec{v}$. Le maximum apparaît à $\Phi=90^\circ$.

(b) Champ des vecteurs du flux optique $\vec{\omega}$ généré dans le repère local de l'agent pour une *rotation pure* à vitesse angulaire $\vec{\Omega}_j$ autour de l'axe $\vec{j}$. Le maximum apparaît pour l'angle d'élévation $\lambda=90^\circ$. Contrairement au cas de la translation (Equ. II.3), le flux optique de rotation (Equ. II.4) ne dépend pas de la distance aux objets.

(d'après Krapp and Hengstenberg 1996)

II.3. Le guidage visuel chez les insectes ailés (approche comportementale)

Pour réaliser leurs prouesses comportementales, les insectes semblent générer des mouvements spécifiques qui utilisent au mieux les indices visuels à leur disposition (Land et Collett, 1974 ; Wagner 1986 ; Collet et al., 1993).

Une solide littérature existant à ce sujet chez les insectes a précédé le concept de perception active (Baszjy 1988) et de vision active (Ballard 1991; Aloimonos 1993, 1997), concept aujourd'hui largement utilisé en robotique.

II.3.1. Privilégier un mouvement de translation

Dans la littérature, divers mécanismes ont été décrits chez l'insecte qui tendent à minimiser ses mouvements de rotation et à privilégier les mouvements de translation.

Le contrôle de l'orientation en lacet (autour de l'axe vertical)

Fixation et stabilisation sont des comportements qui ont été particulièrement étudiés chez les insectes, en particulier chez la mouche (Poggio et Reichardt 1976; Heisenberg et Wolf 1988). Lorsque la mouche est laissée libre autour de son axe de lacet et que l'on fait tourner autour d'elle un tambour (cf. figure II.4) contre la paroi duquel on a disposé un panorama contrasté (par exemple, une mire à bandes verticales parallèles), on constate que l'insecte tend à suivre la rotation du tambour. Cette *réaction optomotrice* de l'insecte en vol a fait l'objet d'études quantitatives depuis une cinquantaine d'années ; en particulier par le groupe de Reichardt à Tübingen (Götz 1964; Reichardt 1969; Buchner 1982).

Une boucle de régulation en lacet a pu être reconstituée en asservissant la rotation du tambour au couple produit par la mouche elle-même (fixée à un couple-mètre). Le couple (très faible, de l'ordre de $0,5 \mu\text{N.m}$) fourni par l'animal commande la position angulaire du tambour. On se situe ici dans le repère de l'animal car l'animal ne bouge pas, c'est l'environnement visuel qui tourne autour de lui. En boucle fermée, on observe clairement que la mouche rend son environnement visuel stationnaire, et ce même si un biais est exercé sur la commande de position du tambour (Figure II.5, Heisenberg et Wolf, 1988). La mouche rejette donc les rotations de l'environnement visuel dans son repère local. La raison d'être d'un tel comportement peut être de privilégier les mouvements de translation, dont l'importance va être soulignée tout au long de cette thèse.

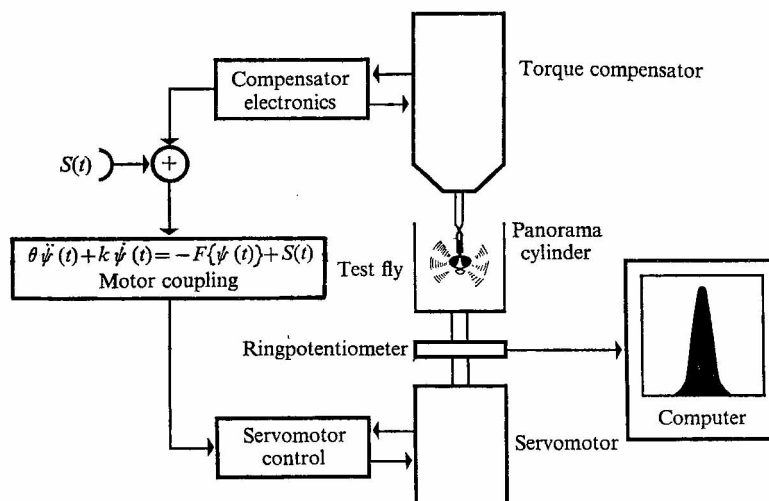


Figure II.4 Compensateur de couple

Une mouche est fixée par le thorax à un couple-mètre. L'ensemble est descendu dans un tambour qui repose sur l'axe d'un moteur. Le panorama, collé ici à l'intérieur du tambour, est une barre noire verticale unique. Tout couple produit par la mouche est transmis au servomoteur commandant la rotation du tambour. Un ordinateur calcule un histogramme de position angulaire de la barre noire dans le champs visuel de la mouche. Ce système permet d'observer les réactions de l'animal « en boucle fermée » par rapport à son environnement visuel. (Poggio et Reichardt 1976)

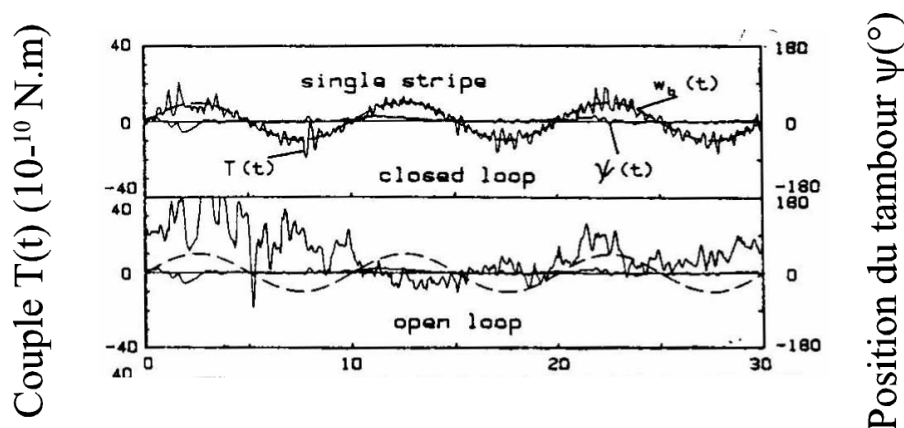


Figure II.5 Résultat en boucle fermée sur un compensateur de couple analogue à celui de la Figure II.4

La mouche (ici une drosophile) observe une barre noire verticale collée à l'intérieur du tambour et compense une perturbation sinusoïdale d'amplitude 10° qui ferait tourner le tambour en position. La mouche applique un couple antagoniste maintenant le tambour (donc l'environnement contrasté) dans une position quasi-stationnaire. Ainsi, la mouche maintient nulle la vitesse de rotation en lacet de l'environnement par rapport à son axe de vision frontale.

(Heisenberg et Wolf 1988)

Réflexe de compensation en roulis

Chez la mouche, un réflexe analogue au réflexe vestibulo-oculaire de l'homme est présent. Il maintient constante l'orientation de la tête (donc des deux yeux), indépendamment des mouvements de son corps. Rappelons ici que chez les insectes, la tête entraîne les yeux dans tous ses mouvements.

L'exemple décrit ci-dessus est celui du réflexe de compensation en roulis (Figure II.6d) mis en évidence chez la mouche en vol (Hengstenberg 1988).

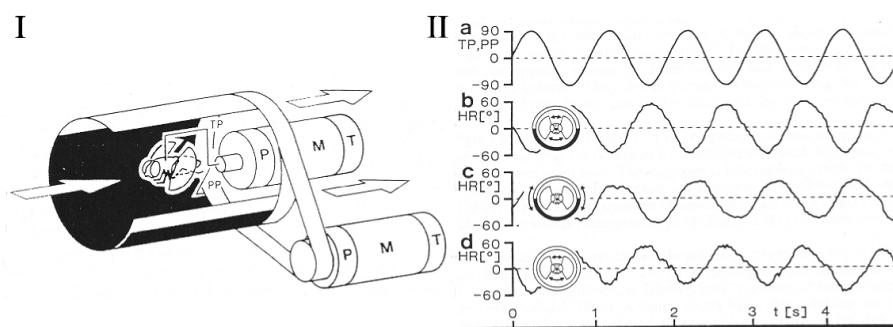


Figure II.6 I) Mouche domestique en vol mise en rotation (roulis) par un système micromoteur/réducteur/potentiomètre/tachymètre.

II) a) Un mouvement de rotation périodique (trace du haut) est imposé soit au corps soit à l'horizon artificiel.
 b) Compensation de la tête de la mouche lors de la rotation de son corps et en présence d'un horizon artificiel. On peut constater que la position de la tête est quasiment en opposition de phase avec le corps, ce qui traduit la compensation du mouvement de roulis.
 c) Compensation de la tête de la mouche lors de la seule rotation de l'horizon artificiel.
 d) Compensation de la tête de la mouche lors de la rotation de son corps et en l'absence d'horizon artificiel.
 (Hengstenberg 1988)

Les travaux de Hengstenberg ont permis de montrer que la mouche utilise la mesure de la vitesse de rotation mécanique de son propre corps autour de l'axe de roulis pour générer, par l'intermédiaire du cou, des mouvements de rotation de la tête compensant la rotation du corps (Figure II.6-II.b). Ces travaux montrent que la mouche est capable de stabiliser son regard dans l'espace grâce à l'information de vitesse de rotation mécanique mesurée par ses deux balanciers, (Figure II.6). On sait aussi que ces balanciers ont une fonction gyroscopique, mise en évidence voici plus de 60 ans. Or, le réflexe de compensation de roulis, décrit ci-dessus, est inexistant si les balanciers sont amputés ou bloqués par une goutte de cire. Ces résultats montrent également que les performances sont améliorées par la vision en présence de contrastes (Figure II.6-II.b) par rapport à la même expérience en l'absence de contrastes (Figure II.6-II.d). L'orientation du regard est ainsi maintenue constante malgré les perturbations imposées par le corps.

Réorientation de la tête en tangage

Une réorientation de la tête en tangage a été observée chez la drosophile (Hengstenberg 1992, 2001). En vol, l'insecte bascule, maintenant ainsi ses yeux dans une direction sensiblement identique à celle présente durant la marche (cf. Figure II.7).

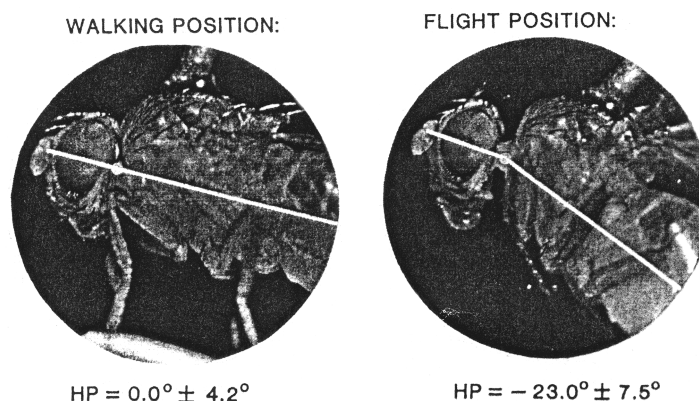


Figure II.7 Comparaison de la position angulaire (en tangage) de la tête de la drosophile

a) La tête se situe dans l'alignement du corps de la mouche lorsque la mouche marche.

b) En vol, la tête de la mouche est maintenue sensiblement dans la même position en tangage malgré l'inclinaison du corps de la mouche.

(Hengstenberg 2001)

Ainsi, les insectes semblent limiter les rotations de la tête par rapport à l'environnement, ce qui présente l'avantage de privilégier un flux optique de translation. Or, ce flux optique est particulièrement riche en information car il dépend directement de la distance entre l'animal et les objets environnants, ou plus exactement, comme nous le verrons, de cette distance pondérée par la vitesse relative entre l'animal et les objets environnants.

Saccades de la tête lors des virages

Récemment, les trajectoires d'une mouche en vol libre ont pu être enregistrées à l'aide d'une technique dérivée de la « bobine sclérale » (Robinson 1963) (Figure II.8).

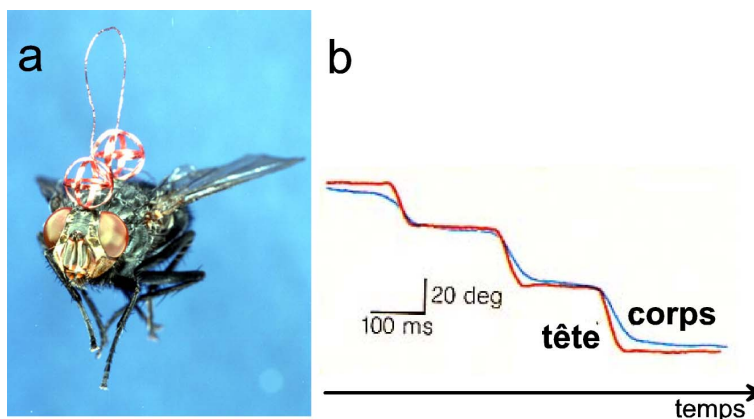


Figure II.8 (a) Mouche bleue *Calliphora vicina* sur laquelle sont fixées deux sphères (l'une sur la tête et l'autre sur le corps) formées de trois micro-bobines orthogonales. L'animal est placé dans une cage d'Helmholtz où sont appliqués trois champs magnétiques orthogonaux de trois fréquences différentes (50, 68 et 86kHz). En mesurant la tension détectée dans chaque micro-bobine, il est possible de retrouver l'orientation de la tête et du corps de l'animal en vol et ce, avec une excellente résolution temporelle (2ms) et spatiale (0,5°).

(b) Trajectoires de la tête et du corps de la mouche dans l'espace. Les mouvements rapides de la tête définissent les saccades de la tête par rapport au corps autour de l'axe de lacet.

(Schilstra et Van Hateren 1999, Van Hateren et Schilstra 1999)

Lors d'une saccade, une rotation rapide de la tête de la mouche par rapport à son corps se superpose à la rotation du corps par rapport à l'environnement fixe.

Durant les saccades, le flux optique de rotation (en lacet) atteint en moyenne 1400°/s (van Hateren et Schilstra 1999). Le gamme du flux optique de rotation est uniquement déterminée par les rotations propres de l'œil de l'animal dans son environnement (stationnaire). La gamme du flux optique de translation dépend, quant à elle, à la fois de la vitesse de translation de l'insecte, de sa distance par rapport aux objets et aussi de l'élévation de l'objet par rapport à sa direction de vol (cf. équ. II.3). La génération d'un tel flux optique de rotation pourrait ne pas être détectée par les neurones détecteurs de mouvement (dont la gamme utile est limitée) et donc ne pas perturber les bouclages visuo-moteurs existants.

Entre deux saccades, la vitesse de rotation (selon les 3 axes : roulis, tangage, lacet) de la tête par rapport à son environnement reste dans la gamme 0-100°/s (van Hateren et Schilstra 1999). Des expériences électro-physiologiques ont montré chez la mouche domestique que des vitesses angulaires comprises entre 16°/s et 360°/s génèrent une réponse de la part des neurones détecteurs de mouvement (Franceschini, Riehle et Le Nestour 1989).

II.3.2. Maintenir un flux optique préféré

Une hypothèse selon laquelle un insecte essaierait de maintenir durant son vol un flux optique ventral préféré fut émise dans les années 50 par Kennedy à partir d'observations comportementales sur les criquets migrateurs, faites dans le désert d'Égypte (Kennedy 1951).

Kennedy observa que l'altitude des criquets dépendait du vent :

1. En présence d'un vent favorable, l'altitude des criquets augmentait,
2. Par vent défavorable, l'altitude diminuait et les criquets allaient jusqu'à atterrir lorsque le vent de face devenait beaucoup trop fort. Dans ce dernier cas, parfois, les criquets se réorientaient et re-décollaient dans le sens du vent.

Ces observations qualitatives furent confirmées dans les années 1970, non seulement chez le criquet migrateur (Waloff 1972) mais aussi chez le bousier (Steiner 1953).

Dans les années 1980 et 1990, un groupe de zoophysiolgistes de l'université de Hambourg tenta, avec plus ou moins de succès, de confirmer *en laboratoire* l'hypothèse d'un « maintien du flux optique ventral » tout d'abord sur le papillon de nuit puis sur le criquet (Preiss et Kramer 1983, 1984; Preiss 1992, 1993; Preiss et Gewecke 1991; Preiss et Spork 1993, 1995).

Malgré des travaux riches en expérimentation sur l'animal (Figure II.9) et en modélisations (Figure II.10), ces auteurs n'ont pas pu mettre en évidence de façon quantitative l'utilisation par l'insecte d'une régulation de flux optique.

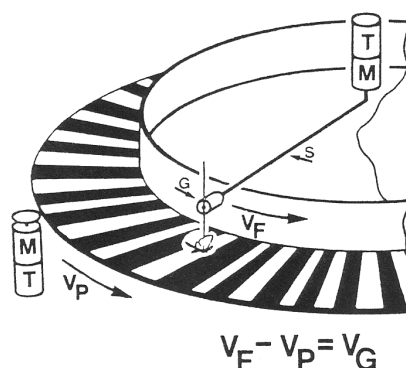


Figure II.9 Un insecte se déplace à l'extrémité d'un bras tournant doté d'un seul degré de liberté

Un capteur de force mesure la force produite par l'insecte et « assiste » la rotation en agissant sur le moteur. Des contrastes blanc et noir sont disposés sur un plateau motorisé, lui-même positionné sous l'abdomen de l'insecte. Les mouvements de ce plateau permettent, selon les auteurs, de simuler l'effet d'un vent de face ou d'un vent arrière.

(Preiss et Kramer 1984)

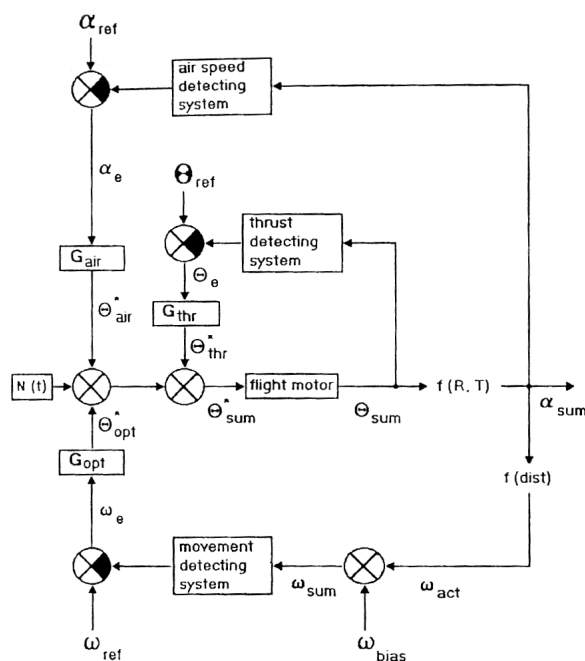


Figure II.10 Modélisation d'un bouclage visuo-moteur décrivant une régulation de flux optique (consigne ω_{ref}), une régulation de vitesse de l'air (consigne α_{ref}), ainsi qu'une régulation de poussée (consigne θ_{ref}). Cette modélisation ne décrit malheureusement pas clairement comment les divers bouclages interagissent. De plus, les entrées et les sorties du système ne sont pas formellement identifiées.

(Preiss et Spork 1993)

Plus récemment, Srinivasan et ses collaborateurs ont montré par des expériences comportementales quantitatives qu'une abeille libre de ses mouvements tendait à maintenir son flux optique ventral constant pendant son atterrissage (voir Figure II.11) (Srinivasan et al. 1996, 2000), et même pendant un vol de croisière ou lors de virevoltes (voir Figure II.12)

(Srinivasan et al. 2000).

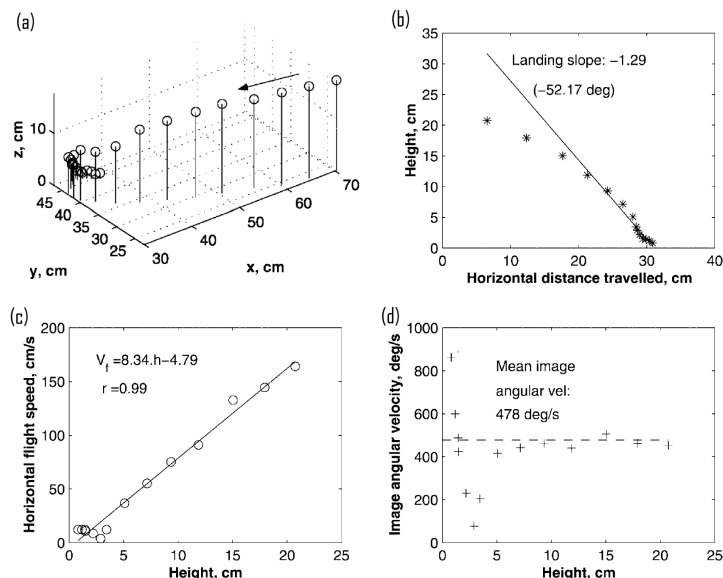


Figure II.11 Exemple d'atterrissage de l'abeille

(a) Exemple de trajectoire 3D d'une abeille lors de son atterrissage,

(b) Trajectoire 2D d'une abeille lors de l'atterrissage.

(c) Vitesse par rapport au sol en fonction de la hauteur par rapport au sol.

Une fonction linéaire lie la hauteur à la vitesse. Ainsi, peut-on en conclure que le rapport entre la vitesse sol et la hauteur sol est maintenu constant pendant l'atterrissage. Ce rapport correspond à la vitesse angulaire de défilement de l'image du sol.

(d) La vitesse angulaire de l'image (ou flux optique) en fonction de la hauteur.

Pour des hauteurs sol supérieures à 5 cm, le flux optique est maintenu constant de façon relativement précise.

Les données (b), (c) et (d) correspondent au même atterrissage

(Srinivasan et al. 2000)

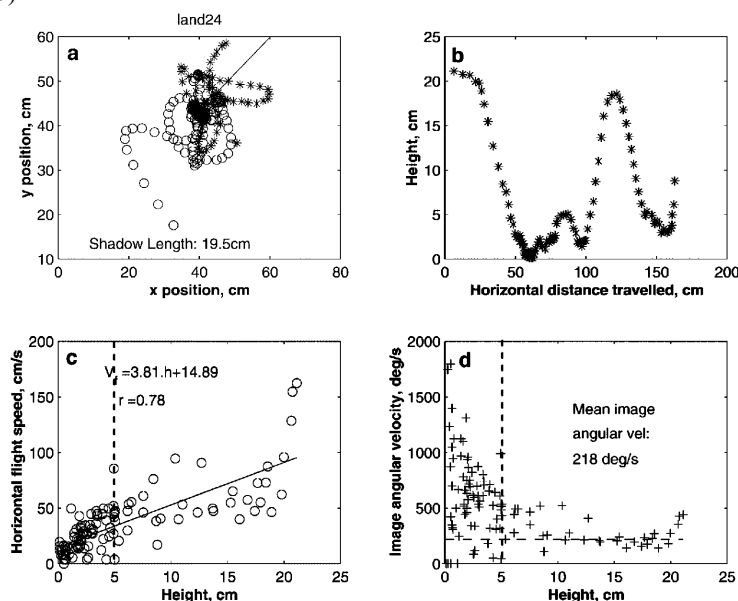


Figure II.12 Exemple d'un vol de croisière et virevoltes d'une abeille

a) Trajectoire dans le plan horizontal,

b) Altitude de la trajectoire en fonction de la distance parcourue,

c) Vitesse horizontale en fonction de la hauteur,

d) Vitesse angulaire de défilement de l'image en fonction de la hauteur,

En dépit de variations brutales de vitesse et d'altitude, l'abeille semble conserver un flux optique constant au moins lorsqu'elle se trouve à une altitude supérieure à 5cm (d).

(Srinivasan et al. 2000)

Cette importance du flux optique ventral vient confirmer des observations faites chez l'abeille 30 ans auparavant (Heran et Lindauer 1963). Ces auteurs qui avaient entraîné des abeilles à traverser un lac pour atteindre une source de nectar, s'étaient aperçus qu'en l'absence totale de vent (donc de risées sur l'eau, donc de contrastes), les abeilles étaient incapables de traverser le lac et que beaucoup d'entre elles se noyaient. Ils avaient interprété ces résultats selon l'hypothèse optomotrice de Kennedy (1951) : les abeilles semblaient avoir besoin du flux optique généré par les contrastes survolés pour maintenir leur altitude.

II.3.3. Modalités de propulsion des insectes

Les insectes ailés assurent leur sustentation et leur déplacement en agissant tant sur l'amplitude que sur la direction du vecteur de poussée. On sait que la poussée dépend chez l'insecte de la fréquence et de l'amplitude de battement des ailes.

Ainsi, Götz et Wandel ont décrit chez la drosophile une covariance entre les forces de propulsives et de sustentation en présence de défilement de contraste : soit une variation de l'amplitude de la force de poussée et non pas une variation de la direction de la force de poussée (Götz et Wandel, 1984).

David a décrit comment la drosophile commande sa vitesse en ajustant l'angle de tangage de son corps, la vitesse par rapport à l'air étant proportionnelle à cet angle de tangage (David 1978) (Figure II.13).

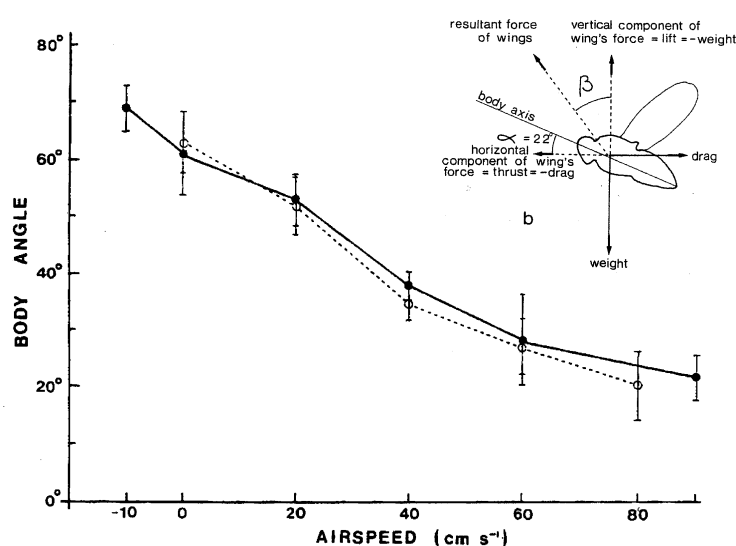


Figure II.13 Une relation quasi linéaire lie l'angle du corps et la vitesse générée par l'insecte (ici, la drosophile). (David 1978)

II.4. La détection des mouvements pour l'évaluation du flux optique (approche neurophysiologique)

L'insecte présente, à l'instar de l'homme, plusieurs types de vision (Franceschini 1999) :

- La vision des couleurs,
- La vision de la lumière polarisée,
- La reconnaissance de forme,
- La vision du mouvement.

Mais c'est la vision du mouvement qui permet aux insectes de naviguer aussi librement dans les 3 dimensions de l'espace. Ce paragraphe décrit l'aspect neurophysiologique de la vision du mouvement des insectes en général, et de la mouche en particulier.

II.4.1. La structure d'un œil composé

L'œil d'un insecte est composé de nombreuses facettes véritables petites lentilles disposées sur une surface plus ou moins sphérique: chaque facette est l'entrée d'une ommatidie (signifiant « petit œil ») (Figure II.14). A chaque ommatidie correspond une direction de visée dans l'espace : chaque ommatidie représente donc un pixel de l'image globale panoramique, et deux ommatidies adjacentes sont séparées par un angle inter-ommatidial $\Delta\phi$ de l'ordre du degré d'angle. En plus de l'échantillonnage spatial, est réalisé un filtrage spatial. En effet, l'ensemble « photorécepteur+optique » de chaque ommatidie présente un diagramme de sensibilité directionnelle de type gaussien, caractérisé habituellement par sa largeur à mi-hauteur $\Delta\rho$ (Figure II.14) (Götz 1964, Hardie 1985). Cet ensemble « photorécepteur+optique » se comporte comme une antenne terahertz (il s'agit du domaine optique), le gain d'antenne étant de 37dB chez la mouche (Franceschini 1975).

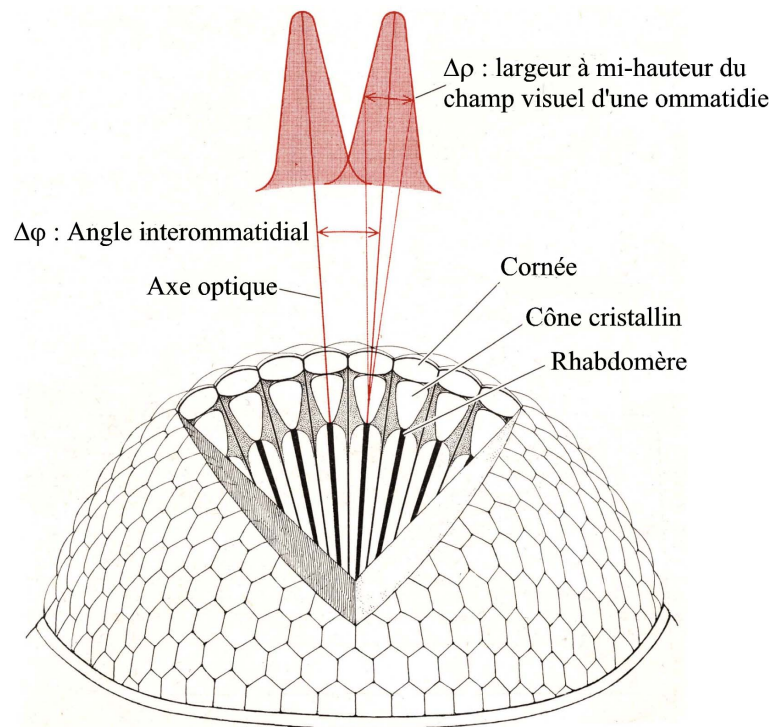


Figure II.14 Structure d'un œil composé

L'œil composé est caractérisé par son angle interommatidial $\Delta\phi$, qui est toujours de l'ordre du degré d'angle. La valeur de cet angle diffère selon les espèces mais également selon la région de l'œil. La sensibilité angulaire de chaque photorécepteur est caractérisée par sa largeur à mi-hauteur $\Delta\rho$, également de l'ordre du degré d'angle. (Horridge 1977)

II.4.2. Le système visuel de la mouche : du photorécepteur au neurone détecteur élémentaire de mouvement

Les photorécepteurs sont la première étape de la chaîne de traitement présent dans l'œil de la mouche. Chaque ommatidie comporte huit photorécepteurs dont l'agencement est décrit en Figure II.15. Et comme il y a 3000 ommatidies par œil, cela fait 48 000 photorécepteurs pour les 2 yeux.

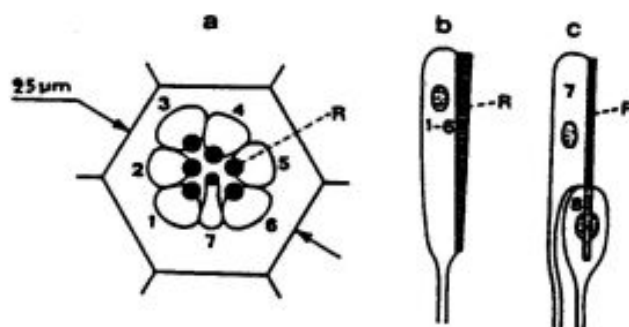


Figure II.15 Dispositions des cellules et de leur extrémité photo-réceptrice chez la mouche
 (a) Coupe dans le plan focal d'une facette. On perçoit distinctement 7 cellules,
 (b) Le rhabdomère (R) contient le ou les pigments visuels de chaque photorécepteur,
 (c) Le huitième photorécepteur se situe dans le prolongement du septième.
 (Franceschini 1983)

Le traitement de l'information visuelle conduisant à la détection du mouvement d'un contraste s'organise progressivement à travers au moins trois ganglions optiques (Figure II.16 et Figure II.17).

Chaque ganglion optique réalise un traitement qui lui est propre (Figure II.16 et Figure II.17) :

- La *lamina* héberge des neurones de second ordre qui réalisent non seulement un filtrage passe-haut temporel mais aussi un contrôle automatique de gain qui a pour effet de maintenir à une valeur sensiblement constante les transitoires relatifs au défilement d'un contraste donné, indépendamment de la luminance moyenne de l'environnement.
- La *medulla* est une structure complexe qui demeure encore méconnue (elle ne comporte pas moins de 40-50 neurones par colonne, donc par pixel). On sait qu'elle participe, entre autres, à la vision du mouvement et qu'elle héberge les fameux DEM (neurones Détecteurs Élémentaires de Mouvement) (Douglass et Strausfeld 1996). La *medulla* abriterait également la séparation entre les voies de détection Noir-Blanc (appelée « ON ») et Blanc-Noir (appelée « 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.
- La *lobula-plate* est constituée de 65 neurones dont la plupart sont à large champ récepteur. La réponse de ces neurones à large champ dépend à la fois du sens de déplacement et de la

vitesse angulaire de défilement sur la rétine.

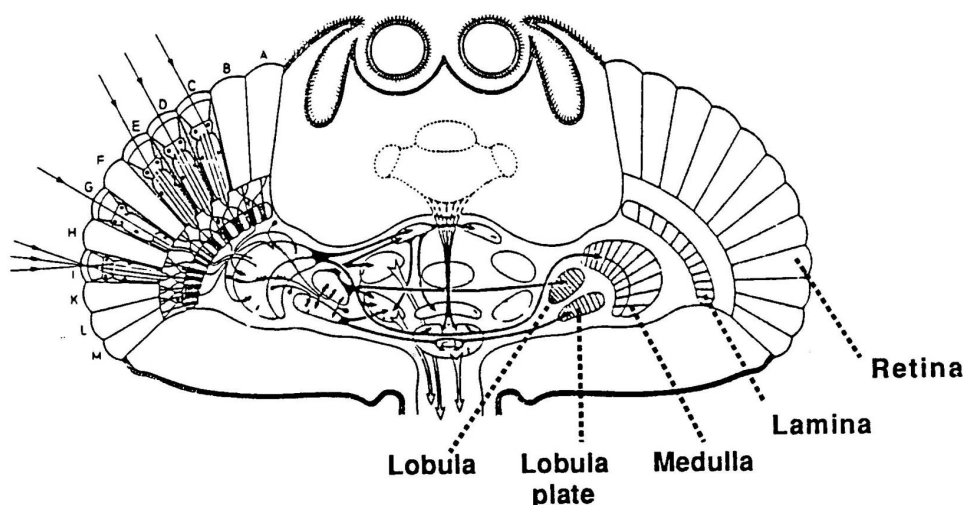


Figure II.16 Représentation schématique du système visuel de la mouche (Kirschfeld, 1979)

Son architecture résulte d'une double organisation dans l'espace :

1. Une organisation en couche discrète : on distingue successivement, à partir de la périphérie, la rétine, la *lamina*, la *medulla* puis le complexe formé de la *lobula* et de la *lobula plate*,
2. Une organisation rétinotopique : les informations visuelles conservent leur organisation spatiale tout au long du traitement visuel jusqu'aux neurones à large champ de la *lobula plate*.

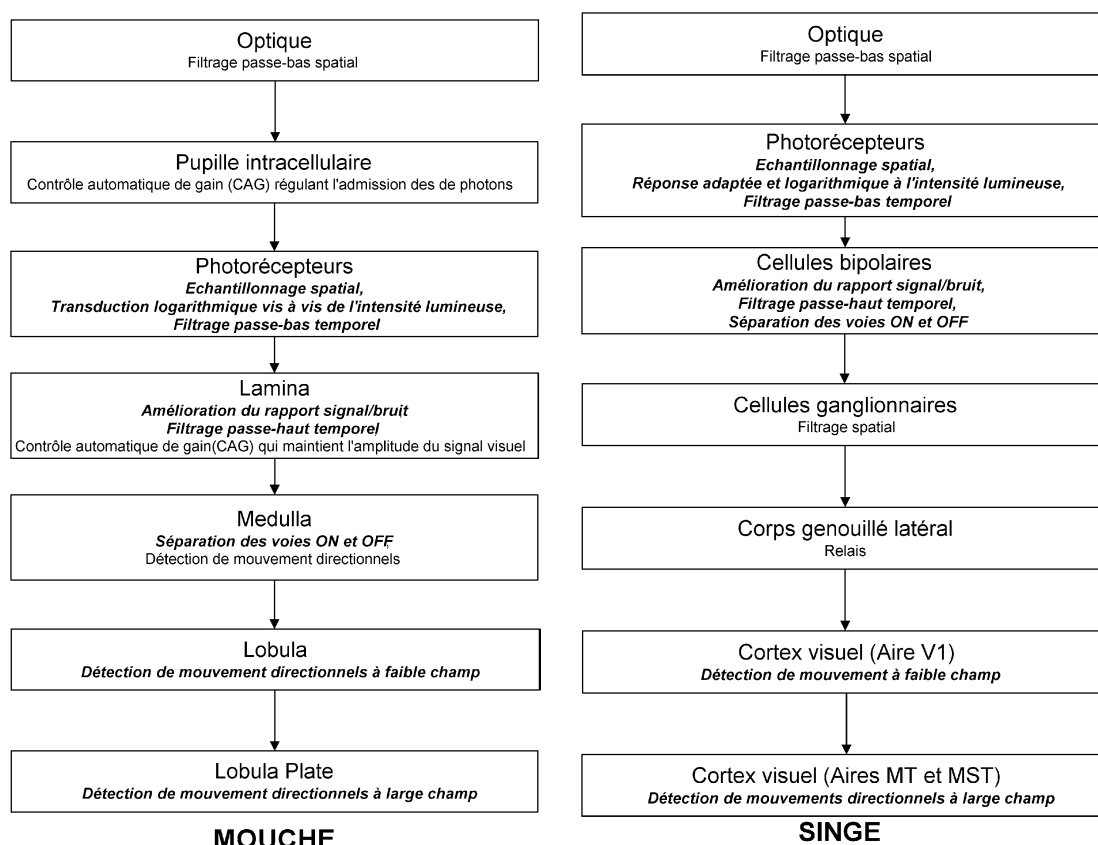


Figure II.17 Organisation synoptique comparée du traitement de la vision du mouvement chez la mouche et le singe. Malgré leur distance phylogénétique, la mouche et le singe présentent un traitement comportant de nombreux points communs pour détecter le mouvement. (Les fonctions semblables présentes dans les deux modèles sont notées en italique).

De nombreuses étapes de traitement sont nécessaires à la vision du mouvement, chez la mouche comme chez le singe (et vraisemblablement chez l'homme). Même si les structures mises en jeu sont différentes, on retrouve les mêmes fonctions élémentaires telles que l'échantillonnage spatial, les filtrages passe-haut et passe-bas, temporel et spatial, et la séparation des voies ON et OFF qui permet d'évaluer séparément le mouvement de bords sombres sur fond clair et clairs sur fond sombre.

II.4.3. Les neurones détecteurs de mouvement à large champ de la mouche

Il est très difficile aujourd'hui d'enregistrer l'activité électrique d'un neurone sur une mouche libre de tous ses mouvements. C'est pourquoi des approches indirectes sont utilisées habituellement pour déterminer la réponse des neurones Détecteurs Elémentaires de Mouvement à la présentation de divers flux optiques.

Les neurones à large champ présents dans la *lobula plate* sont particulièrement intéressants car leur réponse résulte d'informations issues d'une large région du champ visuel. Chacun d'eux est sensible à une direction préférée particulière (indiquée par une flèche noire à droite de chaque neurone sur la Figure II.18), par exemple, d'arrière en avant pour le neurone H1 (troisième neurone en partant du haut sur la Figure II.18) qui a été particulièrement utilisé par les neurophysiologistes pour des raisons de commodité expérimentale.

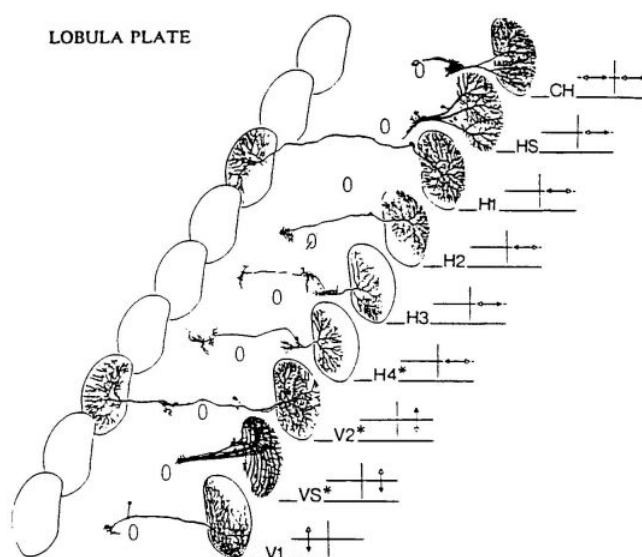


Figure II.18 Vue éclatée, le long de l'axe médian de la tête, des neurones à large champ de la *lobula plate*. Les flèches à droites indiquent, dans le champ visuel ipsi- ou contra-latéral, le sens préféré (pointe noire) et le sens non-préférée (pointe blanche) de chaque neurone. (Hausen 1984)

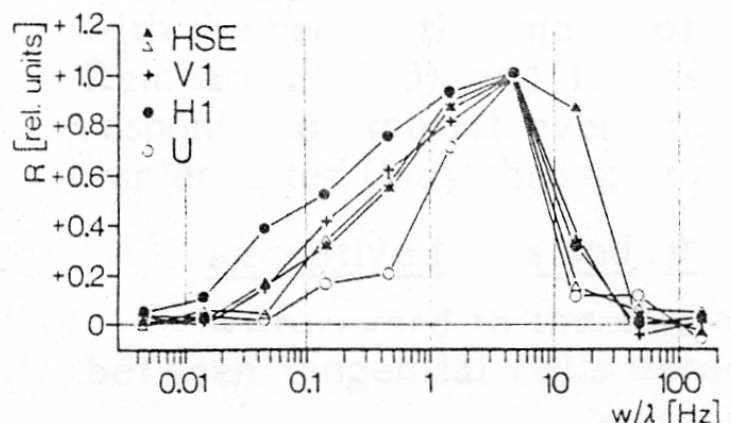


Figure II.19 Réponse de neurones à large champ en fonction de la vitesse d'une mire périodique à bandes parallèles noir/blanc

Les neurones à large champ présentent une gamme semblable de réponse au mouvement (ici, c'est la fréquence temporelle w/λ , égale au quotient de la vitesse w par la période spatiale λ , qui est portée en abscisses). (Hausen 1984)

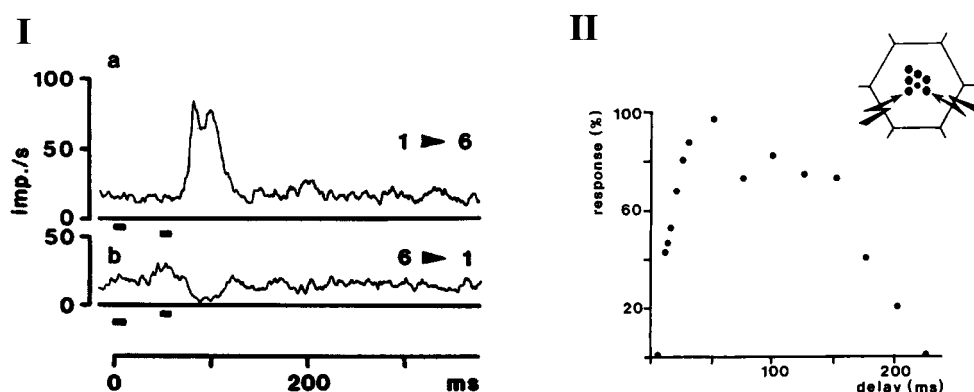


Figure II.20 I-a. Réponse du neurone H1 à des « mouvements apparents » produits par stimulation lumineuse séquentielle de 2 photorécepteurs voisins dans une même ommatidie (voir encart) dans le sens préféré. La réponse est franche et soutenue dans le temps.

I-b. Réponse du neurone H1 dans le sens non-préféré. On remarque un phénomène d'inhibition de la réponse.

II. Réponse du neurone H1 en fonction du retard entre les stimulations des deux photorécepteurs. La courbe décrit l'amplitude relative de la réponse du neurone H1 en fonction du retard Δt entre deux impulsions lumineuses de 10ms correspondant au sens préféré. La gamme de réponse s'avère bornée entre 10 ms et 230ms. Cela signifie que les flux optiques très rapides ($>360^\circ/\text{s}$ avec $\Delta\phi = 3.6^\circ$) produisant des retards inférieurs à 15 ms n'initient pas de réponse du neurone, mais également, que les flux optiques très lents ($<16^\circ/\text{s}$) produisant des retards supérieurs à 200ms n'initient pas non plus de réponse du neurone.

(Franceschini 1985)

En stimulant les photorécepteurs individuellement, la réponse du neurone H1 à différentes vitesses de flux optique a pu être étudiée de façon quantitative (Franceschini 1985).

On a découvert que la mouche n'est sensible qu'à une certaine gamme de flux optique (Figure II.19). Les flux optiques lents ou les flux optiques rapides semblent être ignorés (Figure II.19 et II.20.II).

On sait aujourd'hui que chacun de ces neurones à large champ est en fait excité par un grand

nombre de neurones Détecteurs Élémentaires de Mouvement (DEM). Grâce à des techniques micro-optiques mises au point au laboratoire (Franceschini 1975), il a été possible dans les années 1980, d'analyser quantitativement la réponse du neurone H1 et d'accéder ainsi aux propriétés d'un DEM individuel (Franceschini et al., 1989).

Enfin, les expériences menées de façon étendue sur de nombreux neurones à large champ ont pu établir de véritables cartographies des réponses de chaque neurone (Krapp et Hengstenberg, 1998). On a ainsi montré que certains d'entre eux sont sensibles à des flux optiques de rotation tandis que d'autres sont sensibles à des flux optiques de translation (Figure II.21). Ces neurones semblent être en mesure de délivrer une information de haut niveau capable de commander le système moteur.

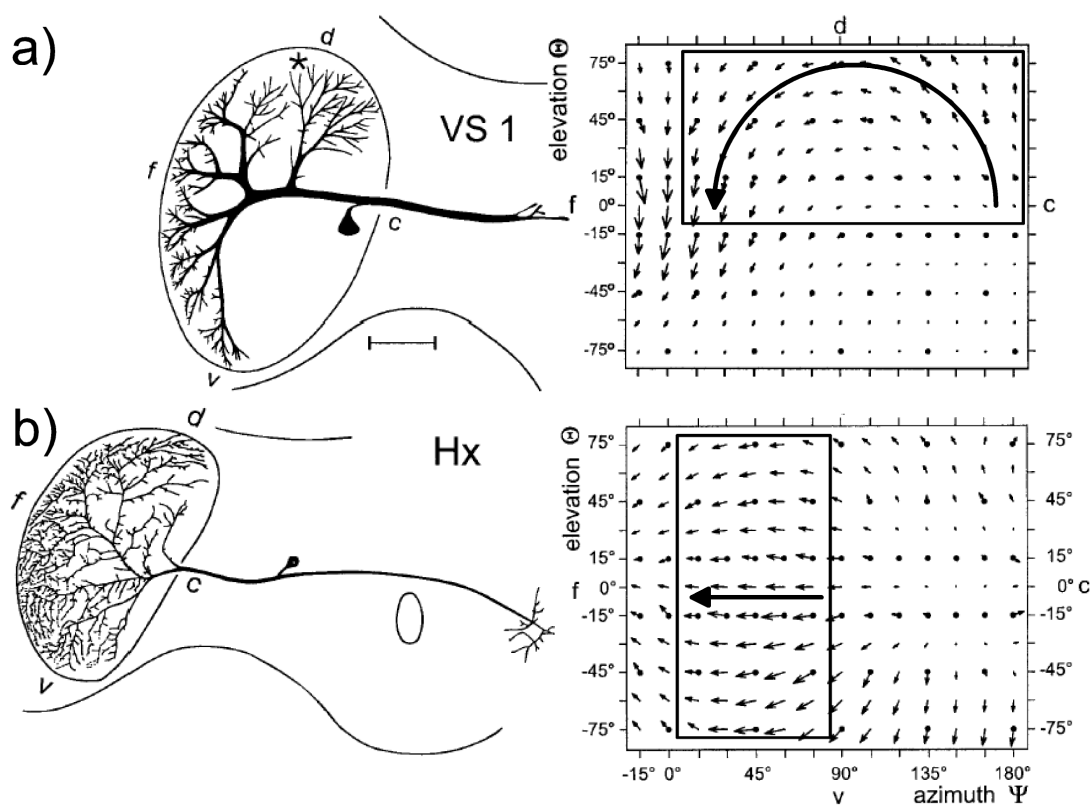


Figure II.21 Réponse au mouvement des deux neurones à large champ, VS1 et Hx

a) Le neurone à large champ VS1 présente une réponse au mouvement qui le prédestine à détecter une rotation en tangage.

b) Le neurone nommé Hx présente une réponse à des mouvements de translation d'arrière en avant.
(Krapp et Hengstenberg, 1998)

III. La clé du guidage visuel : une régulation de *flux optique* par commande de la force de sustentation

III.1. Hypothèses sur le problème de guidage de l'aéronef.....	50
III.2. Système de forces associé à un aéronef libre	52
III.3. Principe du pilote automatique OCTAVE.....	53
III.4. Les paramètres d'OCTAVE pour contrôler la hauteur de sécurité	55
III.4.1. La consigne de flux optique, ω_c	55
III.4.2. L'amplitude de la force propulsive	55
III.5. Les perturbations affectant le pilote automatique OCTAVE.....	56
III.5.1. Le relief du terrain survolé.....	56
III.5.2. Le vent de face ou le vent arrière.....	56
III.6. Dépendance du point d'équilibre d'altitude et de vitesse en fonction du profil vertical du vent.....	57
III.7. Application à un aéronef à voilure tournante.....	59
III.7.1. Contrôle indépendant de l'altitude et de la vitesse par rapport à l'air.....	60
III.7.2. Le pilote automatique OCTAVE appliqué à un aéronef à voilure tournante.....	61

Les principes extraits du guidage visuomoteur des insectes (décrits au chapitre II) sont appliqués au guidage visuel d'un micro-aéronef.

Ainsi, nous nous inspirons des insectes ailés en retenant 4 grands principes, à savoir :

1. le maintien d'une trajectoire en translation en minimisant les rotations, notamment en roulis,
2. le maintien à une valeur préférée du défilement ventral de l'image (ou flux optique ventral),
3. le contrôle indépendant de la vitesse horizontale et de l'altitude,
4. la mesure du flux optique par l'utilisation de Détecteurs Élémentaires de Mouvements.

Dans ce chapitre, nous rendons le problème de guidage d'aéronef compatible avec les 2 premiers de ces principes en imposant 2 hypothèses. Puis nous listons les forces agissant sur un aéronef en identifiant les forces qui agissent sur l'altitude et la vitesse. Nous détaillerons le pilote automatique conçu, appelé OCTAVE, ainsi que ses paramètres et ses perturbations. Enfin, nous déclinerons ce pilote automatique pour un aéronef à voilure tournante.

III.1. Hypothèses sur le problème de guidage de l'aéronef

1. En maintenant horizontale l'attitude en roulis de l'aéronef, on restreint son guidage à un problème plan (Figure III.1). L'aéronef est supposé se déplacer en translation dans le plan de la Figure III.2. En plaçant l'aéronef en translation, on reproduit le déplacement que semblent privilégier les insectes (voir Chapitre II).

On limite également notre étude à un environnement visuel stationnaire.

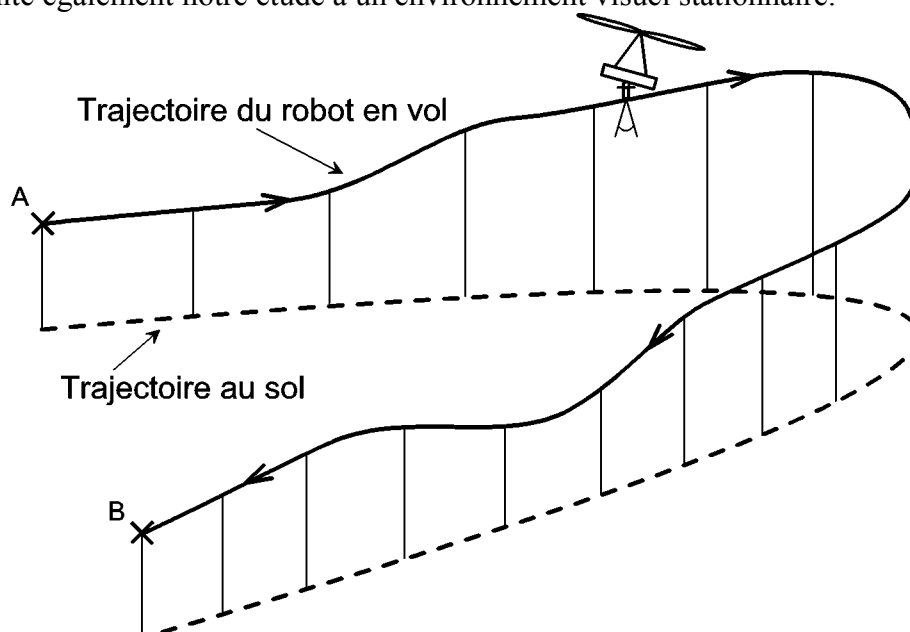


Figure III.1 La ligne (en trait épais) décrit la trajectoire du robot en vol ; la ligne pointillée décrit la trajectoire du robot au sol. Naviguant d'un point A à un point B, on considère que l'aéronef maintient son angle de roulis à l'horizontale. Ainsi, l'aéronef vole dans un plan vertical.

2. On considère l'œil de l'aéronef orienté en permanence à l'aplomb (c'est-à-dire selon l'axe $\vec{z}$) quel que soit le tangage Θ de l'appareil (Figure III.2) : c'est-à-dire que l'œil est stabilisé de manière à contrebalancer toute rotation en tangage de l'aéronef. Une telle stabilisation peut être réalisée en asservissant la direction de visée de l'œil à une référence gravitationnelle fournie, par exemple, par un gyroscope vertical. Un asservissement de la direction de visée de l'œil à l'aplomb rappelle la tendance de la mouche à réorienter sa tête (donc son œil) en tangage ainsi qu'on l'a décrit au chapitre II (cf. fig. II.7).

En considérant l'œil orienté à l'aplomb, la distance D au point P (telle que nous l'avions définie à la figure II.2) devient la hauteur locale h par rapport au sol, appelée hauteur sol.

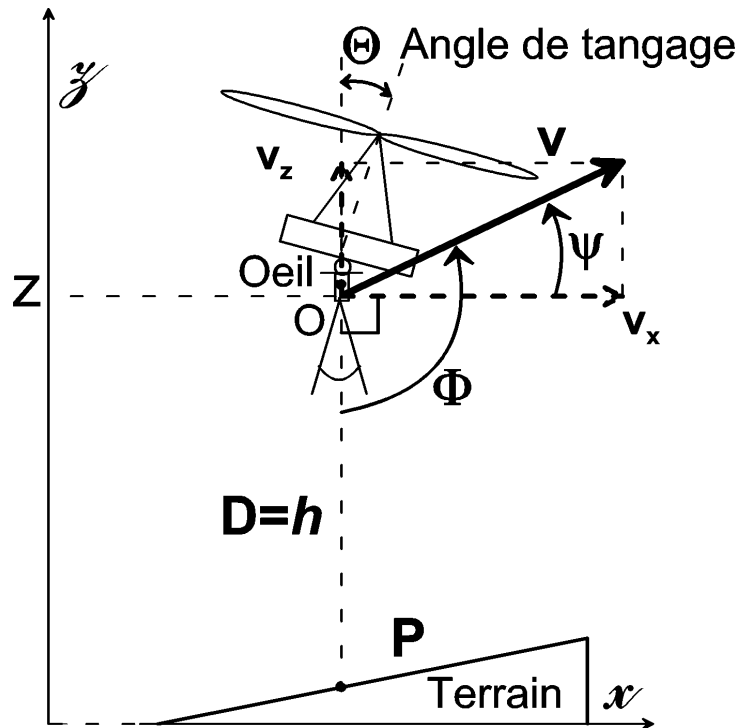


Figure III.2 L'aéronef est considéré comme étant en translation au-dessus d'un relief. L'œil est asservi à la verticale et ne perçoit que la vitesse angulaire (*flux optique*) générée à l'aplomb de l'aéronef.

Le flux optique de translation généré à l'aplomb ω est défini, comme le suggère l'équation II.3, par :

$$\omega = \frac{v}{h} \sin \Phi$$

$$\text{avec } D = h$$

Équation III.1

Or lorsque l'on regarde à l'aplomb et quelle que soit la direction de déplacement, on a :

$$\begin{aligned} v \cdot \sin \Phi &= v \cdot \cos \left(\frac{\pi}{2} - \Phi \right) \\ &= v \cdot \cos \psi \\ &= v_x \end{aligned}$$

Équation III.2

Lors du déplacement de l'aéronef, quelle que soit la direction du vecteur vitesse $\vec{v}$ de l'aéronef, le flux optique perçu à l'aplomb sera simplement égal au quotient de la vitesse horizontale v_x (appelée également *vitesse sol*) par la *hauteur sol* h :

$$\omega = \frac{v_x}{h} \quad \text{Équation III.3}$$

Ainsi, le flux optique ventral ne dépend pas de la vitesse de descente v_z .

III.2. Système de forces associé à un aéronef libre

On associe à un aéronef libre le système de forces suivant (Figure III.3) :

1. La force de sustentation $\vec{F}_S$,
2. La force propulsive $\vec{F}_{\text{Propulsive}}$,
3. La traînée $\vec{F}_X$,
4. Le poids $\vec{P}_{\text{aéronef}}$,
5. La force liée aux frottements visqueux de l'air selon $\vec{z}$, $\vec{f}_v$.

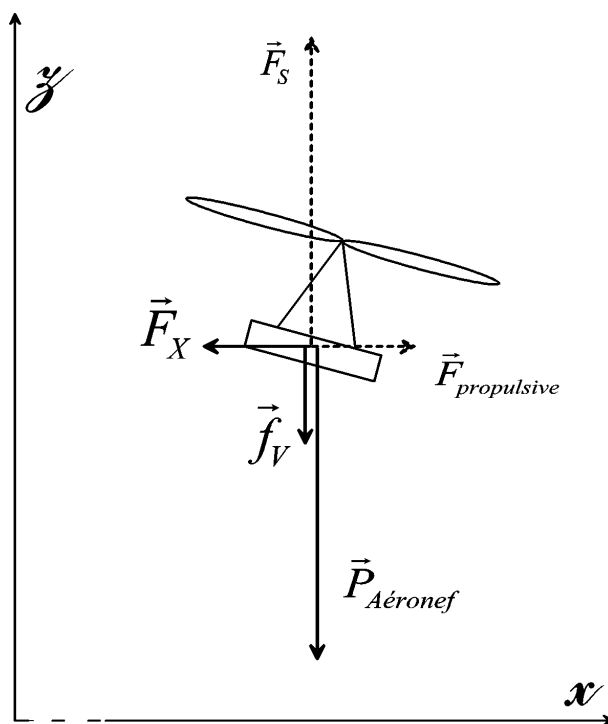


Figure III.3 Système de forces associées à un aéronef libre

Pour contrôler son altitude, l'aéronef doit agir sur l'amplitude de sa force de sustentation. Pour piloter sa vitesse, l'aéronef doit modifier l'amplitude de sa force propulsive.

III.3. Principe du pilote automatique OCTAVE

Le principe de guidage visuel proposé (Ruffier et Franceschini, 2002, 2003) repose sur une *régulation du flux optique ventral*, qui commande l'amplitude de la force de sustentation. Ce principe reproduit « le maintien d'une vitesse rétinienne ventrale » à une valeur constante, comme l'a décrit de manière suggestive Kennedy (1939, 1951) chez le moustique et le criquet. Nous avons appelé ce pilote automatique **OCTAVE** pour *Optical flow based Control sysTem for Aerial Vehicles*.

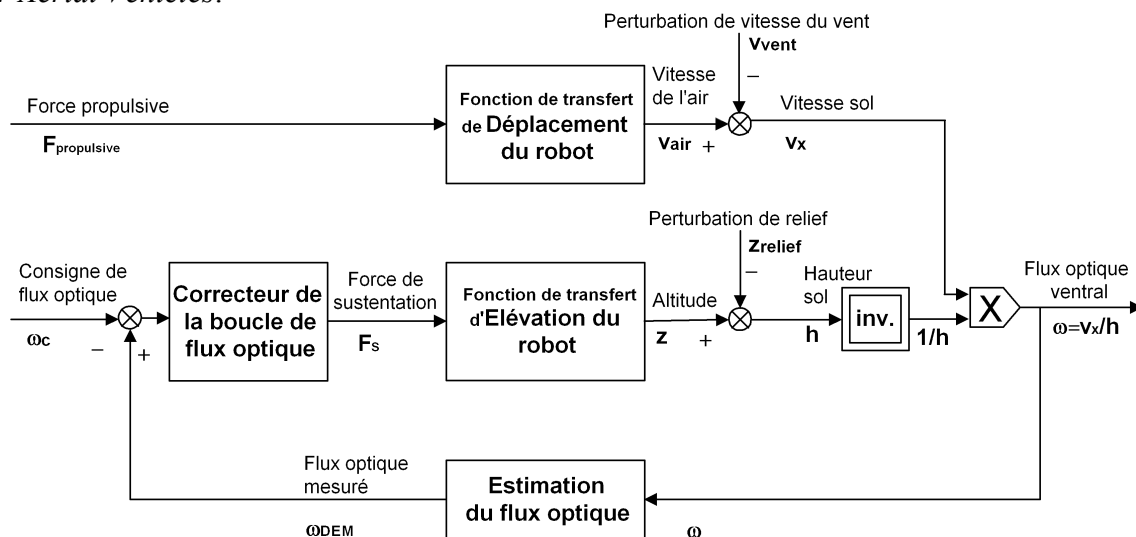


Figure III.4 Les deux entrées de l'aéronef sont la force propulsive, qui détermine la vitesse sol v_x , et la force de sustentation qui détermine l'altitude z . Le bouclage régule le flux optique : lorsque l'estimation du flux optique ω_{DEM} est plus importante que la consigne de flux optique ω_c , le correcteur augmente l'amplitude de la force de sustentation. Ceci permet de rétablir le flux optique en augmentant la hauteur sol.

Le principe d'OCTAVE se décompose en 3 étapes :

1. Mesure du flux optique ventral généré par la translation propre de l'agent aérien,
2. Comparaison du flux optique ventral mesuré à une consigne de flux optique et détermination d'un signal d'erreur de flux optique,
3. Commande de la force de sustentation de l'aéronef dans une direction telle qu'elle va réduire l'erreur de flux optique.

Le pilote automatique OCTAVE agit de façon à réguler le flux optique (perçu vers le bas) en ajustant l'altitude pour rejeter toute perturbation susceptible d'affecter le flux optique.

Cette régulation est mise en œuvre en commandant l'amplitude de la force de sustentation (entrée de la fonction de transfert d'élévation du robot), dont dépend directement l'altitude (Figure III.9).

Ce principe diffère nettement d'autres stratégies classiquement utilisées en aéronautique, notamment l'asservissement de l'altitude (grâce à un capteur barométrique), de la hauteur sol (grâce à un radioaltimètre), de la vitesse sol (grâce à un radar Doppler, par exemple) ou de la vitesse de l'air (grâce à un tube Pitot).

Tout l'intérêt du pilote automatique OCTAVE réside dans le fait qu'il n'est nullement nécessaire de mesurer les deux sorties les plus importantes, à savoir la hauteur sol h et la vitesse sol v_x , pour naviguer dans les airs. Seul est mesuré le *flux optique* qui n'est que le quotient de ces deux variables.

Le pilote automatique OCTAVE commande deux entrées du robot :

1. la force propulsive,
2. la force de sustentation.

Nous devons donc caractériser le système « aéronef » par deux fonctions de transferts indépendantes :

1. une fonction de transfert de **déplacement** caractérisant le transfert entre la force propulsive et la vitesse de l'air,
2. une fonction de transfert d'**élévation** caractérisant le transfert entre la force de sustentation et l'altitude.

Selon le principe OCTAVE décrit ci-dessus, toute augmentation du flux optique, quelle qu'en soit la cause, aura pour effet d'augmenter automatiquement l'amplitude de la force de sustentation. Inversement, toute diminution du flux optique va diminuer automatiquement l'amplitude de la force de sustentation. Ce système conduit donc à un ajustement automatique de l'amplitude de la force de sustentation qui tend à maintenir constant le flux optique généré par le terrain survolé. Il en résulte un comportement de l'aéronef qui va monter et descendre au gré des perturbations qu'il va recevoir. Comme nous le verrons ces perturbations peuvent être de plusieurs types et s'appliquer en des points différents du système.

III.4. Les paramètres d'OCTAVE pour contrôler la hauteur de sécurité

III.4.1. La consigne de flux optique, ω

La consigne de flux optique définit un rapport entre la vitesse sol v_x et la hauteur sol h . Par conséquent, la hauteur sol à laquelle volera l'aéronef est proportionnelle à sa vitesse sol. Si la vitesse de l'aéronef est constante, toute augmentation de la consigne de flux optique devrait décroître la hauteur sol automatiquement. Et inversement, toute diminution de la consigne de flux optique devrait accroître la hauteur sol. On peut donc dire que la consigne de flux optique va définir une hauteur sol qui se verra pondérée par la vitesse sol. Ainsi, la consigne de flux optique peut être vue comme un « paramètre de sécurité » par rapport aux dangers potentiels d'un environnement survolé inconnu.

III.4.2. L'amplitude de la force propulsive

A travers ce paramètre d'angle de tangage, l'opérateur (ou n'importe quel système ayant une autorité sur l'aéronef) peut démarrer ou arrêter le vol du robot aérien. De plus, il peut augmenter ou diminuer sa vitesse sol. L'équation III.4 ci dessous, dérivé de l'équation III.3, met clairement en évidence le fait que la vitesse sol v_x pondère la hauteur h .

$$h(t) = v_x(t) \cdot \frac{1}{\omega(t)} \quad \text{avec} \quad \omega(t) = cste \quad \text{Équation III.4}$$

Ainsi, plus la force propulsive est faible (donc plus sa vitesse horizontale v_x est faible), moins l'aéronef volera haut. Ainsi résulte à chaque instant une hauteur sol qui est conditionnée par cette propriété. Considérons un aéronef reposant sur le sol : en le basculant graduellement vers l'avant, on augmente progressivement sa force de propulsion. Dès lors, sa vitesse va augmenter et il devra s'élever dans les airs, de façon automatique puisque v_x/h est astreint à demeurer constant. Ceci devrait permettre de réaliser un décollage automatisé. Inversement, si, à partir d'une vitesse de croisière donnée, l'appareil se redresse progressivement, sa vitesse horizontale va progressivement diminuer, sa hauteur sol devra faire de même pour maintenir le rapport v_x/h constant. Lorsque la vitesse horizontale de l'appareil deviendra nulle, l'appareil devrait se poser automatiquement à vitesse nulle, donc en toute sécurité.

Équipé d'un tel « pilote automatique à régulation du flux optique ventral », un aéronef devrait donc pouvoir réaliser diverses manœuvres, et même des manœuvres réputées complexes, telles qu'un décollage automatisé et un atterrissage automatisé, et ce en agissant sur un unique paramètre : la force propulsive (cf. chapitre VII).

III.5. Les perturbations affectant le pilote automatique OCTAVE

Deux types de perturbations « de sorties » sont susceptibles d'affecter le système OCTAVE (Figure III.5) : le vent et le relief.

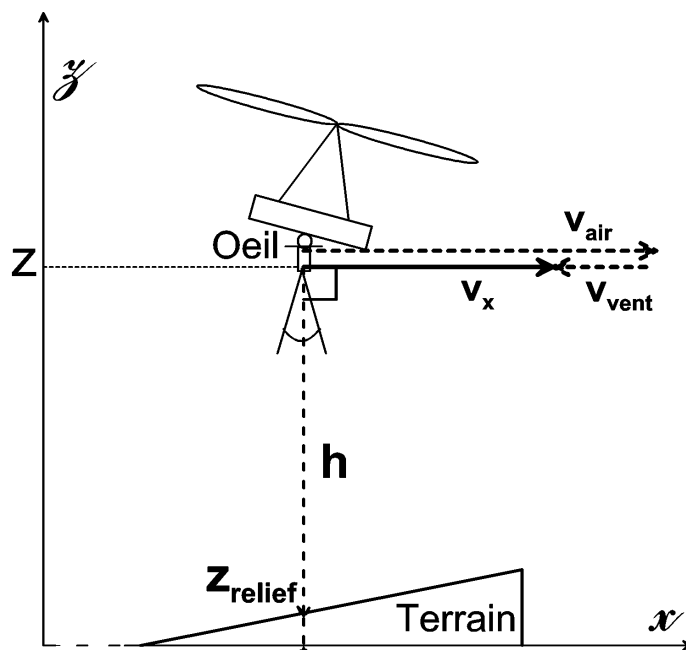


Figure III.5 Le système OCTAVE subit deux types de perturbations de sortie : la vitesse du vent (vent de face ou vent arrière) et l'altitude locale z_{relief} du relief. Le flux optique dépend en effet non pas de l'altitude absolue et de la vitesse de l'air v_{air} mais bien de la hauteur sol h et de la vitesse sol v_x (équ. III.3).

III.5.1. Le relief du terrain survolé

Les irrégularités du relief modifient la hauteur sol h . Le relief en question peut être aussi bien un canyon qu'une montagne.

$$h = z - z_{\text{relief}} \quad \text{Équation III.5}$$

où z est l'altitude² de référence et z_{relief} l'altitude du relief par rapport à cette altitude de référence.

Pour maintenir un flux optique constant, la régulation agit sur l'amplitude de la force de sustentation de l'aéronef pour maintenir constante sa hauteur sol.

III.5.2. Le vent de face ou le vent arrière

Un vent de face, par exemple, devrait modifier la vitesse sol v_x . En effet :

$$v_x = v_{\text{air}} - v_{\text{vent}} \quad \text{Équation III.6}$$

Or, même en présence de vent, le système OCTAVE va conduire l'aéronef à une réaction automatique tout à fait sensée. Ainsi, par exemple, par vent défavorable (vent de face), la vitesse sol devrait diminuer. Pour maintenir alors le flux optique constant, le système va

² Le mot altitude est utilisé ici au sens d'altitude absolue, dite aussi altitude barométrique.

diminuer de façon automatique l'amplitude de la force de sustentation, conduisant par là même à une baisse de l'altitude. Ainsi, la réaction à un vent défavorable sera-t-elle une diminution (contrôlée) de la hauteur sol.

Inversement, lorsque le vent est favorable (vent arrière), pour maintenir un flux optique constant et à cause de l'augmentation de la vitesse sol, le régulateur va augmenter la force de sustentation du robot pour augmenter sa hauteur sol proportionnellement à la vitesse sol. Ainsi, la réaction à un vent favorable se traduit-elle encore par une augmentation (contrôlée) de la hauteur sol.

III.6. Dépendance du point d'équilibre d'altitude et de vitesse en fonction du profil vertical du vent

Si l'on considère la couche de surface de l'atmosphère (présente entre quelques mètres d'altitude et quelques centaines de mètres) (Figure III.6), on peut considérer que la vitesse du vent augmente avec l'altitude lorsque l'environnement est dégagé (en environnement urbain, la présence de bâtiments crée des turbulences qui complexifient la situation) .

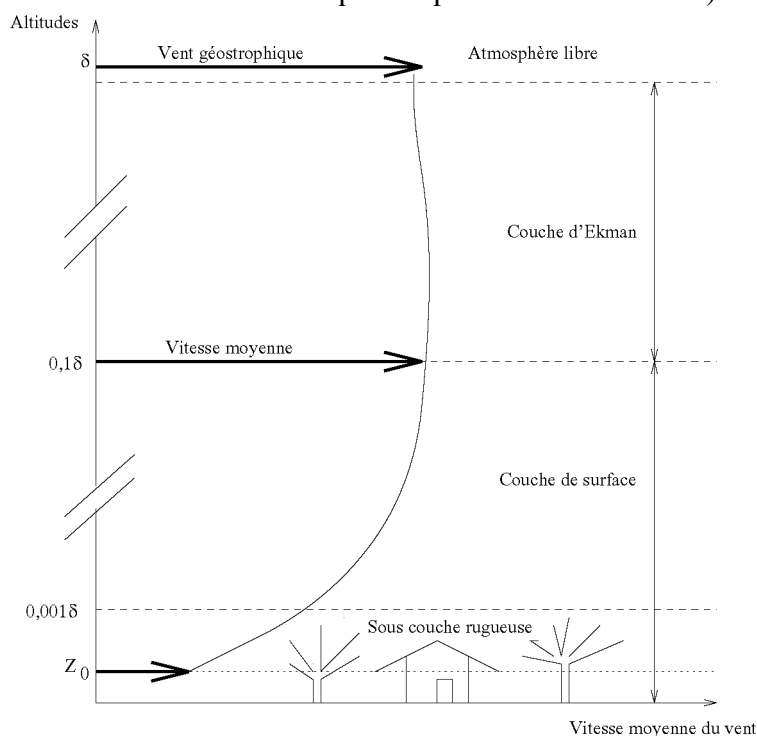


Figure III.6 Représentation schématique de la couche limite atmosphérique

En résumé, son épaisseur notée δ varie de quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres en fonction de la vitesse du vent, de la rugosité des sols et de l'ensoleillement, variables suivant les lieux et l'heure de la journée. Elle est constituée de trois parties distinctes :

1. une sous-couche rugueuse d'épaisseur z_0 (de quelques millimètres en mer à quelques dizaines de mètres en zone fortement urbanisée), où l'écoulement de l'air est fortement turbulent et non-homogène,
2. une couche de surface épaisse de quelques dizaines de mètres à plusieurs centaines de mètres, où la vitesse moyenne du vent dépend de l'altitude,
3. une couche d'Ekman, où la vitesse moyenne du vent ne dépend plus de l'altitude.

(Turbelin 2000)

Selon le modèle de variation du vent, le profil vertical de la vitesse moyenne suit une loi de variation logarithmique (Tennekes 1973) :

$$v_{vent}(z) \approx v_0(\delta) \times \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{pour } z > 10z_0 \quad \text{Équation III.7}$$

avec $z_0 \approx 0,1m$ dans une zone faiblement urbanisée

$$\text{donc } z = z_0 e^{\frac{v_{vent}}{v_0(\delta)}}$$

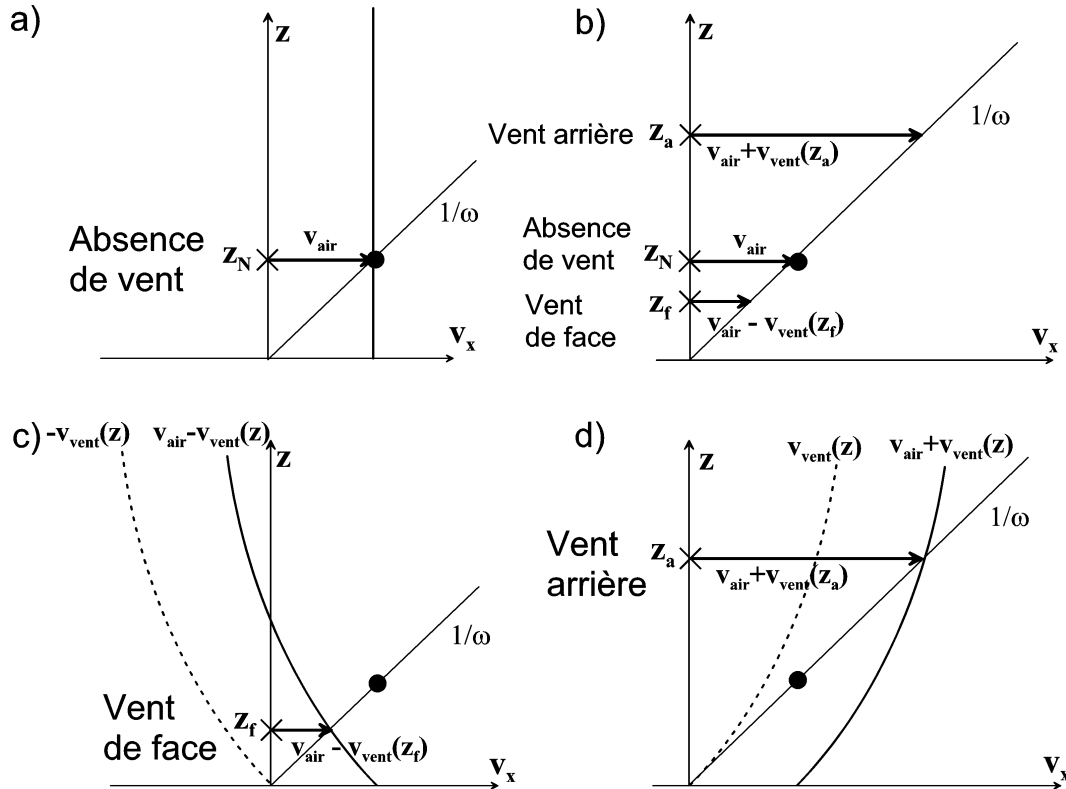


Figure III.7 Altitude et vitesse d'équilibre d'un aéronef à régulation de flux optique lors de perturbations de vent. Pour plus de clarté, on fait l'hypothèse que le flux optique ω est maintenu autour d'une valeur constante. La droite $1/\omega$ représente l'ensemble des couples $\{z, v_x\}$ (altitude, vitesse sol) possibles résultant de la régulation du flux optique.

(a) Lorsqu'il n'y a pas de vent, l'altitude dépend uniquement de la vitesse de l'air de l'aéronef.

(b) Le vent modifie le point de fonctionnement de l'aéronef.

(c) En cas de vent de face, le profil des vitesses $v_{air} - v_{vent}$ coupe la droite $1/\omega$ à une altitude plus faible encore qu'en (a).

(d) En cas de vent arrière, le profil des vitesses $v_{air} + v_{vent}$ coupe la droite $1/\omega$ à une altitude plus élevée encore qu'en (a).

La réaction au vent conduit un aéronef qui régule son flux optique à différentes altitudes en cas de vent de face ou de vent arrière.

En cas de vent de face, la vitesse par rapport au sol diminue, donc l'aéronef diminue son altitude jusqu'à z_f pour maintenir le rapport constant entre la vitesse sol et la hauteur sol. Cette réaction lui permet de beaucoup moins subir le vent défavorable tout en restant verrouillé

visuellement sur le sol par son capteur ventral de vitesse angulaire (Figure III.7c).

En cas de vent arrière, la vitesse par rapport au sol augmente, donc l'aéronef augmente son altitude jusqu'à z_a pour maintenir encore constant le rapport entre la vitesse sol et la hauteur sol. Cette réaction permet à l'aéronef de profiter du vent favorable tout en restant verrouillé visuellement sur le sol (Figure III.7d).

La valeur absolue de la vitesse du vent est plus importante lors d'un vent arrière que lors d'un vent de face ($v_{vent}(z_a) > v_{vent}(z_f)$) car le point d'équilibre en altitude est plus haut dans le cas d'un vent arrière que pour un vent de face ($z_a > z_f$) et le vent augmente en fonction de l'altitude (Équation III.7). C'est ainsi qu'il n'y a pas de symétrie entre les 3 valeurs absolues de la vitesse sol v_x (Figure III.7b).

La réaction automatisée au vent qui conduit l'aéronef à se rapprocher du sol en présence de vent défavorable (Figure III.7c) est particulièrement intéressante lorsque l'on sait que la vitesse du vent croît avec l'altitude (Figure III.6). Ceci permet à l'aéronef de redescendre automatiquement vers des vents plus favorables, donc de ne pas épuiser ses ressources énergétiques à combattre les vents de haute altitude.

Inversement, la réaction automatisée qui conduit l'aéronef à augmenter son altitude en présence d'un vent favorable permet d'atteindre des vents encore plus favorables (Figure III.7d). Une telle réaction permet également d'économiser, pour un parcours donné, l'énergie disponible à bord. Ces réactions apparaissent donc « écologiques » au sens où elles sont adaptées aux conditions naturelles de l'environnement aérien.

III.7. Application à un aéronef à voilure tournante

Le pilote automatique que nous avons mis en œuvre est particulièrement adapté aux véhicules aériens capables de décoller et d'atterrir à la verticale, appelés VTOL (pour *Vertical Take-Off and Landing*). Ces appareils ont la possibilité de contrôler de façon indépendante leur altitude et leur vitesse par rapport au sol. L'avion, au contraire, comporte de nombreux couplages qui ne permettent pas de contrôler aisément de façon indépendante altitude et vitesse horizontale. Par ailleurs, le comportement d'un avion est plus complexe à cause de la contrainte d'une vitesse minimale à respecter, la vitesse de décrochage, en dessous de laquelle la traînée s'accroît tellement que la force de sustentation chute.

C'est pourquoi nous avons choisi un aéronef élémentaire à voilure tournante (du type hélicoptère), dont on commande l'amplitude et la direction de la poussée, deux paramètres qui agissent de façon assez indépendante, respectivement sur l'altitude et la vitesse de l'aéronef.

Dans le cas d'un aéronef libre à voilure tournante, la poussée $\vec{F}_N$ produite par la voilure tournante se décompose en une force de sustentation $\vec{F}_S$ et une force propulsive $\vec{F}_{\text{Propulsive}}$ (Figure III.8). Cette décomposition dépend de l'angle de tangage Θ .

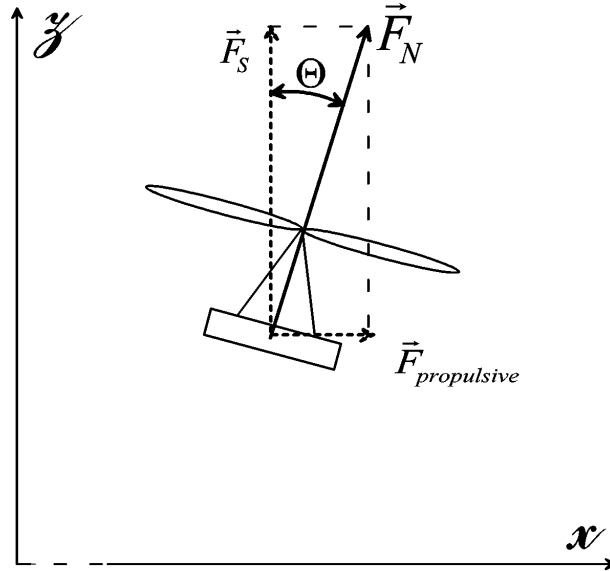


Figure III.8 Décomposition de la poussée F_N en deux forces : la force propulsive $F_{\text{Propulsive}}$ et la force de sustentation F_S .

III.7.1. Contrôle indépendant de l'altitude et de la vitesse par rapport à l'air

On peut montrer que pour des angles de tangage Θ inférieurs à 15° , la commande de l'amplitude et la direction de la poussée $\vec{F}_N$ agissent de façon indépendante sur la force de sustentation $\vec{F}_S$ et sur la force propulsive $\vec{F}_{\text{Propulsive}}$.

En effet, pour de petits angles ($-15^\circ < \Theta < 15^\circ$) :

$$\sin \Theta \cong \Theta \quad \text{et} \quad \cos \Theta \cong 1 \quad \text{Équation III.8}$$

Or l'amplitude des forces propulsive et de sustentation dépend de l'angle de tangage Θ :

$$F_{\text{Propulsive}} = F_N \sin \Theta \quad \text{et} \quad F_S = F_N \cos \Theta \quad \text{Équation III.9}$$

Donc pour de faibles angles de tangage, on peut écrire :

$$F_{\text{Propulsive}} = F_N \times \Theta \quad \text{et} \quad F_S = F_N \quad \text{Équation III.10}$$

Or la poussée F_N varie faiblement en fonction de l'angle de tangage (pour $-15^\circ < \Theta < 15^\circ$) donc la force propulsive $F_{\text{Propulsive}}$ dépend essentiellement de l'angle de tangage Θ . On écrit ainsi :

$$F_{\text{Propulsive}} = \Theta \times Cste \quad \text{et} \quad F_S = F_N \quad \text{Équation III.11}$$

En première approximation, on peut donc considérer qu'en modifiant l'angle de tangage (donc la direction de la poussée) on agit sur la force de propulsion horizontale, tandis qu'en

modifiant l'amplitude de la poussée on agit sur la force de sustentation F_s .

Ainsi, à l'instar des insectes (cf. chapitre II.3.3), *l'orientation* de la poussée permet de contrôler la vitesse par rapport à l'air tandis que *l'amplitude* de la poussée permet de contrôler l'altitude. Comme nous le verrons par la suite il n'est nullement nécessaire d'utiliser des angles de tangage aussi élevés que 15° pour amener le micro-aéronef à une vitesse de croisière de plusieurs mètres par seconde.

III.7.2. Le pilote automatique OCTAVE appliqué à un aéronef à voilure tournante

Pour mettre en œuvre le pilote automatique OCTAVE, nous simplifions le système « aéronef à voilure tournante » en le caractérisant par deux fonctions de transfert indépendantes (Figure III.9), faisant ainsi apparaître leur découplage physique :

1. une fonction de transfert de déplacement caractérisant le transfert entre la direction de la poussée et la vitesse de l'air,
2. une fonction de transfert d'élévation caractérisant le transfert entre l'amplitude de poussée et l'altitude.

Ainsi l'angle de tangage devient un paramètre essentiel du pilote automatique OCTAVE appliqué à un aéronef à voilure tournante et nul n'est besoin de s'occuper directement de sa poussée : ce sera là la tâche de la boucle de *régulation du flux optique* (cf. paragraphe).

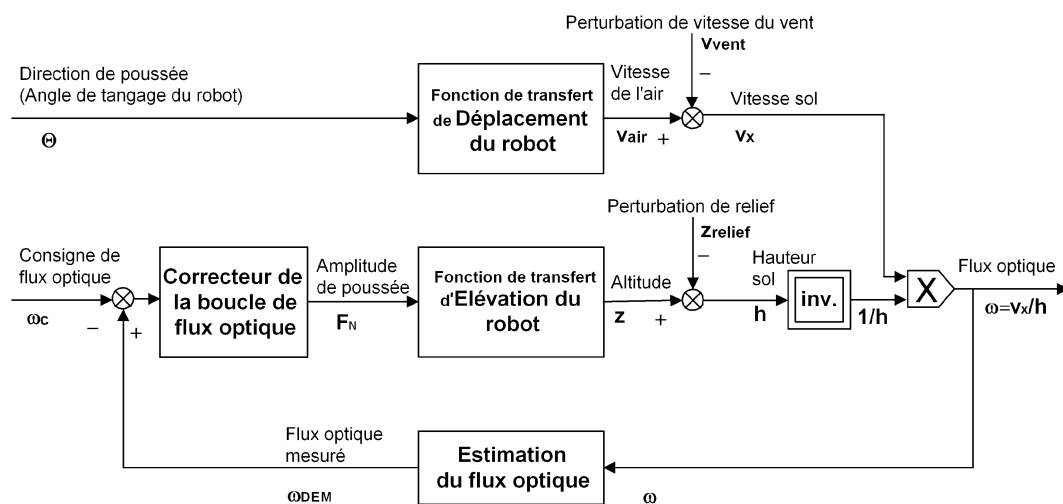


Figure III.9 Les deux entrées du robot sont l'angle de tangage Θ , qui détermine la vitesse sol v_x , et l'amplitude de poussée qui détermine l'altitude z . Le correcteur régule le flux optique : lorsque l'estimation du flux optique ω_{DEM} est plus importante que la consigne de flux optique ω_c , le correcteur augmente l'amplitude de la poussée du rotor. Ceci permet de rétablir le flux optique en augmentant la hauteur sol.

IV. Le Détecteur Élémentaire de Mouvement (DEM) : un capteur de flux optique

<i>IV.1. Les modèles de la fonction détection du mouvement.....</i>	<i>64</i>
<i>IV.2. Position d'un bord contrasté et contraste.....</i>	<i>66</i>
<i>IV.3. Les étapes du traitement DEM originel.....</i>	<i>67</i>
<i>IV.4. Les bases neurophysiologiques du DEM originel.....</i>	<i>70</i>
<i>IV.5. Modifications apportées depuis le DEM originel.....</i>	<i>72</i>
<i>IV.6. L'ensemble lentille-photorécepteur (Étapes 1 à 3 du traitement DEM).....</i>	<i>73</i>
IV.6.1. Les caractéristiques optiques de l'ensemble lentille-photorécepteur.....	73
IV.6.2. L'étage d'entrée : le montage photoconducteur.....	75
IV.6.3. Sensibilité angulaire des photodiodes.....	76
<i>IV.7. Les circuits utilisés pour le traitement temporel (Étapes 4 à 9 du traitement DEM).....</i>	<i>79</i>
IV.7.1. Le DEM analogique basé sur 2 FPAA's (composant à cellules analogiques programmables).....	79
IV.7.2. Le DEM mixte (combinant filtrage analogique et numérique).....	83
IV.7.3. Comparaison des différents circuits DEM.....	87
<i>IV.8. Analyse expérimentale des signaux visuels filtrés passe-bande</i>	<i>88</i>
IV.8.1. Effet d'un faible contraste.....	88
IV.8.2. Effet de diverses fréquences spatiales	89
IV.8.3. Effet du filtrage spatial	90
IV.8.4. Conclusion sur l'analyse des signaux visuels filtrés passe-bande.....	91
<i>IV.9. Effet des vibrations sur la mesure DEM.....</i>	<i>92</i>

Dans ce chapitre, nous ne détaillerons pas les nombreuses travaux sur l'estimation du flux optique utilisant la vision par ordinateur (Horn et Schunck, 1981). Des techniques d'asservissement visuel utilisant une estimation du flux optique ont récemment été développées (Crétual et Chaumette, 1998).

Par contre, nous détaillons comment le DEM estime le flux optique et quels sont les paramètres dont dépend la qualité de cette estimation. Mais commençons par un bref aperçu des modèles de détection du mouvement.

IV.1. Les modèles de la fonction détection du mouvement

Il existe divers types de détecteurs de mouvement, et une excellente synthèse en a été faite par Ullman (1981).

Le détecteur de mouvement le plus fréquemment considéré s'appuie sur le principe du corrélateur (Reichardt, 1961). Il a été développé à partir d'expériences optomotrices chez le scarabée (Hassenstein et Reichardt, 1956). Ce modèle est basé sur la multiplication de deux signaux provenant de deux photorécepteurs adjacents. Ainsi, la sortie du corrélateur est maximale lorsque le contraste se déplace dans le sens préféré (de P2 vers P1 dans la Figure IV.1), générant un retard coïncidant avec le retard introduit en sortie P2.

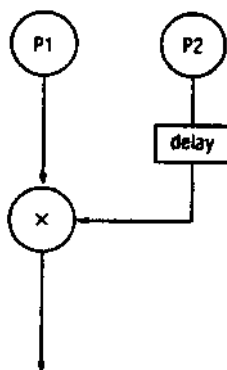


Figure IV.1 Modèle simplifié du corrélateur (Ullman 1981)

Au-delà des problèmes technologiques, le principal problème du corrélateur est la nécessité d'utiliser un grand nombre de détecteurs pour s'affranchir de la dépendance de sa sortie aux fréquences spatiales des stimuli visuels. Ceci est dû au fait que ce principe de corrélation ne conduit pas à un détecteur de *vitesse*.

Plusieurs détecteurs élémentaires de mouvement artificiels du type corrélateur, ont été réalisés en technologie VLSI (Moini 2000).

La Figure IV.2 montre la réponse d'un DEM VLSI de type corrélateur, utilisé récemment pour piloter un petit robot mobile terrestre (Harrisson et Koch, 1999). On remarque que la réponse

n'est pas monotone en fonction de la vitesse angulaire de défilement : à une sortie donnée correspondent deux vitesses possibles.

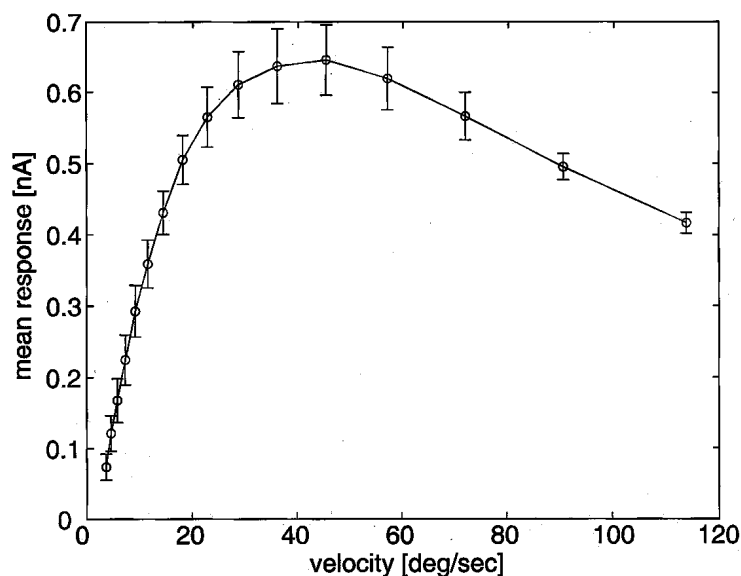


Figure IV.2 Réponse d'un DEM basé sur le principe du corrélateur, réalisé en VLSI analogique, en fonction de la vitesse angulaire (Harrisson et Koch, 1999)

Le principe du DEM électronique mis au point au laboratoire vers le milieu des années 1980 (Franceschini, Blanes et Oufar 1986; Blanes 1986; Blanes 1991) est basé sur des résultats neurophysiologiques obtenus chez la mouche, qui associaient à des enregistrements par microélectrode une microstimulation optique de deux photorécepteurs dans une même ommatidie (Franceschini 1985; Franceschini, Riehle et Le Nestour 1989). Le DEM mis au point utilise la mise en correspondance de détections successives d'un même contraste pour estimer la vitesse angulaire d'un objet. Ce type de détecteur de mouvement appartient à la classe appelée *Token matching* (Ullman 1981).

Le modèle du DEM développé au laboratoire présente une réponse monotone et croissante en fonction de la vitesse du mouvement.

IV.2. Position d'un bord contrasté et contraste

Avant de détailler le traitement DEM, définissons 2 paramètres essentiels d'un environnement visuel.

Position angulaire d'un bord contrasté

Tout d'abord, à tout moment, l'environnement visuel est défini notamment par la position dans le champ visuel de l'œil des bords contrastés.

Soit $\varphi(t)$, l'angle de position d'un bord contrasté (cf. Figure IV.3):

$$\varphi(t) = \arctan\left(\frac{x(t)}{h(t)}\right) \quad \text{Équation IV.1}$$

Avec,

$x(t)$, position azimutale (en mètres) du bord contrasté par rapport à la direction de visée de l'œil,

$h(t)$, hauteur sol ou distance (en mètres) entre le plan optique de l'œil et le bord contrasté.

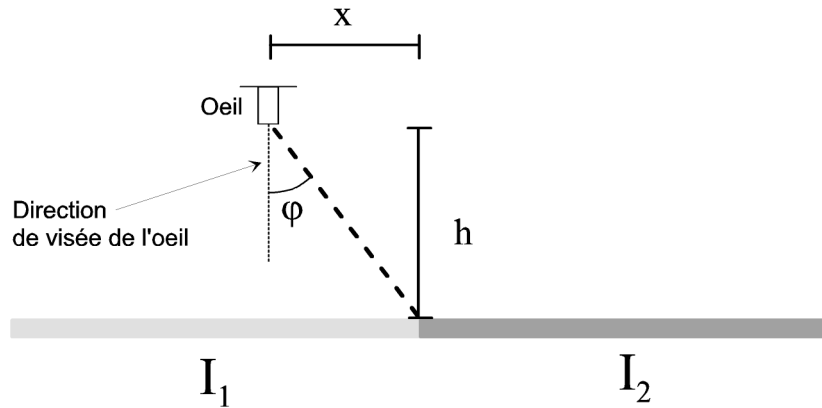


Figure IV.3 Un œil regardant en direction du sol
 I_1 et I_2 sont les luminances associées aux secteurs 1 et 2.

En cas de mouvement de l'œil par exemple, la position angulaire $\varphi(t)$ associée au bord contrasté évoluera selon l'équation IV.1.

Définition du contraste m d'un bord limitant deux plages lumineuses

Le contraste entre deux plages lumineuses est un paramètre essentiel auquel répond tout système visuel naturel ou artificiel. Tout comme la position angulaire des bords contrastés, il s'agit de l'un des paramètres du « signal d'entrée » du système visuel.

Le contraste m entre deux plages éclairées adjacentes (Figure IV.3) est défini à partir des luminances I_1 et I_2 de ces deux plages comme l'indique l'équation IV.2.

$$m = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \quad \text{Équation IV.2}$$

Le contraste m est donc un nombre sans dimension. Ses valeurs usuelles (auxquelles sont sensibles l'œil de l'homme et celui de la mouche) sont comprises entre 0,01 et 1.

Le contraste m dépend de la longueur d'ondes à laquelle on le mesure. Ainsi le contraste m n'est pas vraiment une propriété de l'objet car il dépend de la sensibilité spectrale du capteur ainsi que du spectre de la source d'éclairage. Mais, le contraste m est invariant par rapport au niveau d'éclairement (exprimée en Lux ou en $\text{photons.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$).

Les objets lumineux utilisés dans ce travail ont des éclairagements assez proches. Le contraste m entre deux plages lumineuses successives est relativement faible : entre 0,04 et 0,3 (la mesure étant faite avec un capteur de même spectre que les photorécepteurs de l'œil).

IV.3. Les étapes du traitement DEM original

Le principe du DEM (Franceschini, Blanes et Oufar 1986; Blanes 1986; Blanes 1991) s'est inspiré à l'origine des résultats d'expériences menées sur la mouche, qui associaient des enregistrements électrophysiologiques à des microstimulations lumineuses de la rétine (Franceschini 1985; Franceschini, Riehle et Le Nestour 1989) (cf. chapitre II.4).

Le flux optique local (c'est-à-dire la vitesse angulaire d'un bord contrasté) est mesuré par le DEM grâce à l'association de 2 modules (Figures IV.4 et IV.3) :

1. Deux photorécepteurs associés à une optique transforment implicitement le défilement d'un bord contrasté en un retard Δt entre les transitions de sortie des deux photorécepteurs (Étapes 1 à 3 décrites ci-après) :

$$\Delta t(t) = \frac{\Delta \varphi}{\omega(t)} \quad \text{Équation IV.3}$$

2. Un circuit électronique de traitement du retard Δt , composé de fonctions temporelles linéaires et non-linéaires, permet d'estimer la vitesse angulaire de défilement ω_{DEM} (Équation IV.4) (Étapes 4 à 9 décrites ci-après).

$$\omega_{\text{DEM}} \approx k \frac{1}{\Delta t} = K_{\omega_{\text{DEM}}} \cdot \omega \quad \text{Équation IV.4}$$

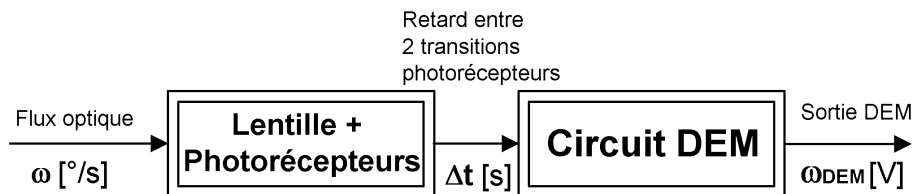


Figure IV.4 Deux modules non-linéaires distincts participent à l'estimation du flux optique.

L'ensemble lentille-photorécepteur transforme une vitesse angulaire en un retard temporel Δt en sortie de 2 photorécepteurs. Le circuit DEM traite ensuite ces 2 signaux visuels de façon à estimer le flux optique, ω .

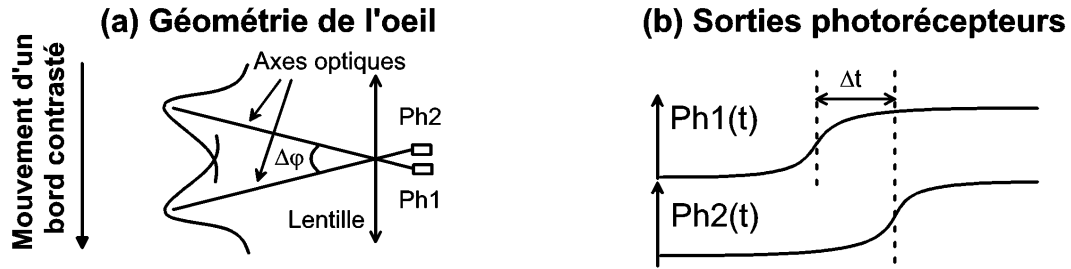


Figure IV.5 a) Un bord contrasté croise l'axe optique du premier photorécepteur Ph_1 puis celui du second photorécepteur Ph_2 . Le décalage spatial entre leurs deux axes optiques est appelé $\Delta\varphi$.

b) Lors du mouvement d'un contraste devant les photodiodes, deux variations successives apparaissent sur les sorties des photorécepteurs. Ainsi, la vitesse angulaire $\omega(t)$ de défilement du bord contrasté transfère le décalage spatial des axes optiques en un retard temporel $\Delta t(t)$ entre les variations des tensions de sortie des photorécepteurs (Équation IV.3). C'est ce retard Δt qui sera mesuré dans la suite du traitement DEM pour estimer le flux optique, indépendamment de la valeur du contraste et de l'éclairement.

Détaillons maintenant l'ensemble des 9 étapes du traitement DEM originel réalisés à partir de 2 photorécepteurs (cf. aussi à la figure IV.6) :

Etape Implicite. La répartition spatiale (en fonction de φ) de l'intensité lumineuse d'une scène contrastée dépend de la position azimutale (x) et de la hauteur (h) entre le centre optique du récepteur et le bord contrasté (cf. figure IV.3),

Etape 1. Échantillonnage spatial, caractérisé par l'angle inter-récepteur $\Delta\varphi$:

Les informations d'intensité lumineuse spatiale en fonction de φ (position angulaire de n'importe quel point de la scène visuelle par rapport à l'axe optique) sont échantillonnées par 2 photorécepteurs séparés spatialement d'un angle $\Delta\varphi$,

Etape 2. Filtrage spatial passe-bas à l'aide d'une lentille défocalisée associée à chaque photorécepteur et lui conférant une sensibilité angulaire de type quasi-gaussien,

Etape Implicite. Transfert des informations spatiales dans le domaine temporel par le mouvement relatif œil/environnement.

Le flux optique, c'est-à-dire la vitesse angulaire relative de l'œil par rapport à l'environnement, transfère dans le domaine temporel les informations spatiales de contraste (Équation IV.5). De ce fait, le décalage spatial $\Delta\varphi$ est transformé en un décalage temporel Δt . Ainsi, la variation du signal visuel produite par le mouvement relatif d'un contraste à la vitesse ω est retardée d'un temps Δt en sortie du second photorécepteur par rapport à la sortie du premier photorécepteur,

$$dt = \frac{1}{\omega} \cdot d\varphi \quad \text{Équation IV.5}$$

Etape 3. Photodétection (fonction de transfert des photorécepteurs),

Cette détection est logarithmique dans le DEM originel pour conserver une amplitude de signal relativement constante, indépendamment de la luminance de l'environnement,

Etape 4. Filtrage passe-haut temporel du 1^{er} ordre (fréquence de coupure 16Hz), à l'aide d'un circuit RC sur chacune des deux voies pour éliminer la composante continue (cf. figure IV.6),

Etape 5. Filtrage passe-bas temporel du 3^{ème} ordre (fréquence de coupure 28,5Hz), à l'aide de circuits RC sur chacune des voies pour éliminer le bruit (notamment la composante alternative à 100Hz provenant de l'éclairage ambiant d'intérieur) (cf. figure IV.6),

Etape 6. Circuit à seuil pour séparer les fronts Noir-Blanc (appelé front ON) et Blanc-Noir (appelé front OFF) et génération d'une impulsion sur chacune des voies, attestant de la détection d'un contraste (cf. figure IV.6),

Cette séparation permet de dédoubler les voies et de créer 2 voies ON et OFF pour chaque photorécepteur. Ainsi, les étapes suivantes du traitement DEM sont réalisées à la fois pour les voies ON et pour les voies OFF.

Etape 7. Génération, sur la voie 1, d'une exponentielle décroissante de longue durée (plusieurs centaines de milli-secondes) déterminant ainsi la gamme de retard Δt considérée, et par conséquent la gamme de mesure du DEM (cf. figure IV.6),

Etape 8. Génération, sur la voie 2, d'une impulsion très courte, qui se trouve « naturellement » retardée de Δt (cf. figure IV.6),

Etape 9. Échantillonnage de l'exponentielle de la voie 1 par l'impulsion de la voie 2, (au moyen d'un circuit à diodes) permettant ainsi d'approximer ω suivant l'équation IV.4 (cf. figure IV.6).

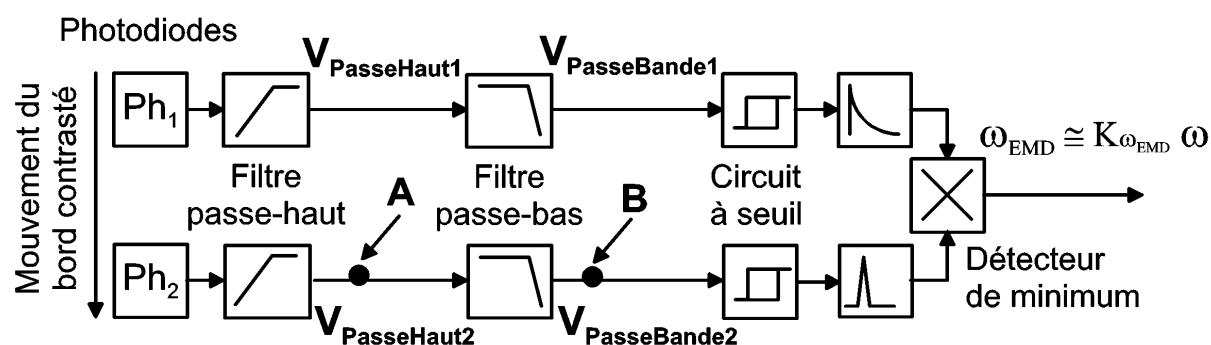


Figure IV.6 Étapes 4 à 9 de traitement DEM

Le circuit Détecteur Élémentaire de Mouvement (DEM) estime le flux optique ω à partir des signaux des deux photorécepteurs Ph_1 et Ph_2 , qui se trouvent naturellement décalés dans le temps de Δt . C'est aux points A et B que le signal visuel filtré passe-haut, puis passe-bande est mesuré à la fig. IV.8.

IV.4. Les bases neurophysiologiques du DEM originel

Détaillons ici étape par étape, l'ensemble des points communs du traitement DEM originel avec les modèles biologiques (cf. à la figure II.17 où sont spécifiées les fonctions par ganglion à la fois chez le singe et chez la mouche).

Etape 1. L'échantillonnage spatial, caractérisé par l'angle inter-récepteurs $\Delta\phi$, reproduit de façon rigoureuse l'échantillonnage spatial réalisé par l'œil composé des insectes (Götz 1964),

Etape 2. Le filtrage spatial passe-bas, caractérisé par la sensibilité directionnelle gaussienne du photorécepteur (l'angle d'acceptance $\Delta\rho$ est la largeur à mi-hauteur de son diagramme de sensibilité directionnelle) reproduit également de façon rigoureuse cette fonction décrite pour l'œil de mouche (Götz 1964),

Etape 3. La photodétection logarithmique est analogue à la réponse logarithmique des photorécepteurs des vertébrés (voir Figure IV.7),

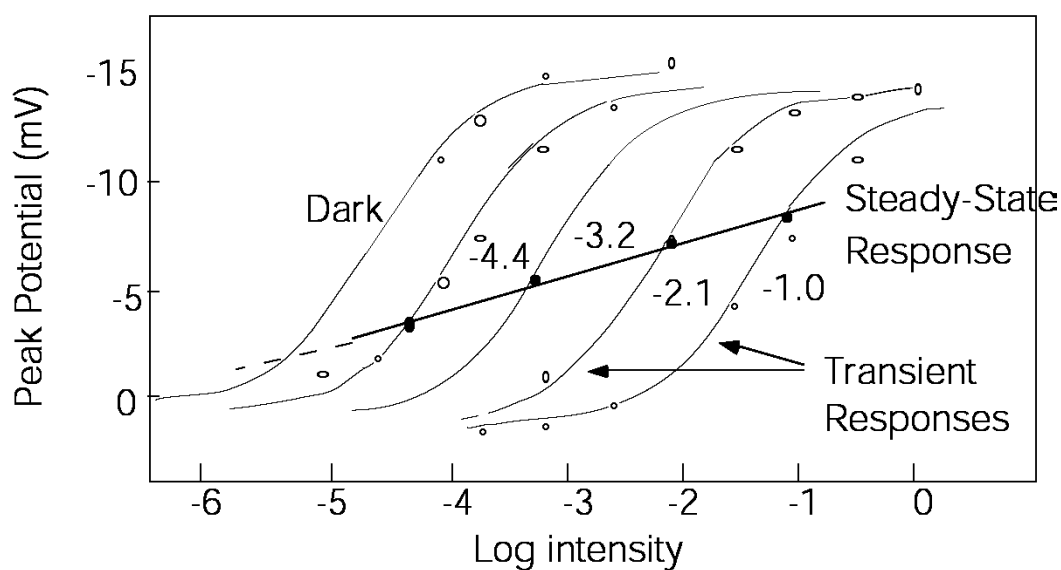


Figure IV.7 Réponse logarithmique d'un photorécepteur individuel à la stimulation lumineuse chez un vertébré (Adapté de Normann et Perlman 1979)

Etape 4. Le filtrage passe-haut temporel du 1^{er} ordre reprend partiellement la fonction de différenciation des cellules monopolaires présentes dans la *lamina* chez la mouche (Laughlin 1989; Juusola et French 1997) ou encore des cellules bipolaires présentes dans la rétine des vertébrés,

Tant chez les insectes que chez les vertébrés, ces cellules sont des neurones dits « de second ordre » car elles sont activées directement par les photorécepteurs.

Etape 5. Le filtrage passe-bas temporel du 3^{ème} ordre complète également la dynamique des cellules évoquées, qui témoignent d'un filtrage passe-bande (Laughlin 1989; Juusola et

French 1997).

La Figure IV.8 montre qu'il existe une analogie marquée entre les signaux visuels filtrés passe-bande (suite à l'étape 5 du traitement DEM, cf. Figure IV.6) et les signaux mesurés dans les neurones post-synaptiques aux photorécepteurs chez la mouche. Ainsi, le filtre passe-bande temporel que nous utilisons à bord du DEM artificiel reproduit-il qualitativement les premières étapes du traitement visuel associé à chaque pixel de l'œil de mouche.

Tout récemment d'ailleurs, la fonction de transfert entre un bâtonnet et une cellule bipolaire a été modélisée chez la salamandre par un filtrage passe-bande temporel, composé de 3 filtres passe-bas suivi d'un passe-haut temporel (Armstrong-Gold et Rieke 2003).

On peut noter ici que l'ordonnancement des filtrages temporels (les filtrage passe-haut et passe-bas) du DEM originel a été inversé par rapport à celui du modèle biologique. Cette modification de l'ordonnancement a été rendue nécessaire dans le DEM originel pour que les impédances des filtres réalisés à l'aide de composants passifs soient compatibles entre elles. Cette modification de leur ordonnancement a été possible grâce à la propriété de commutation des fonctions linéaires de filtrage.

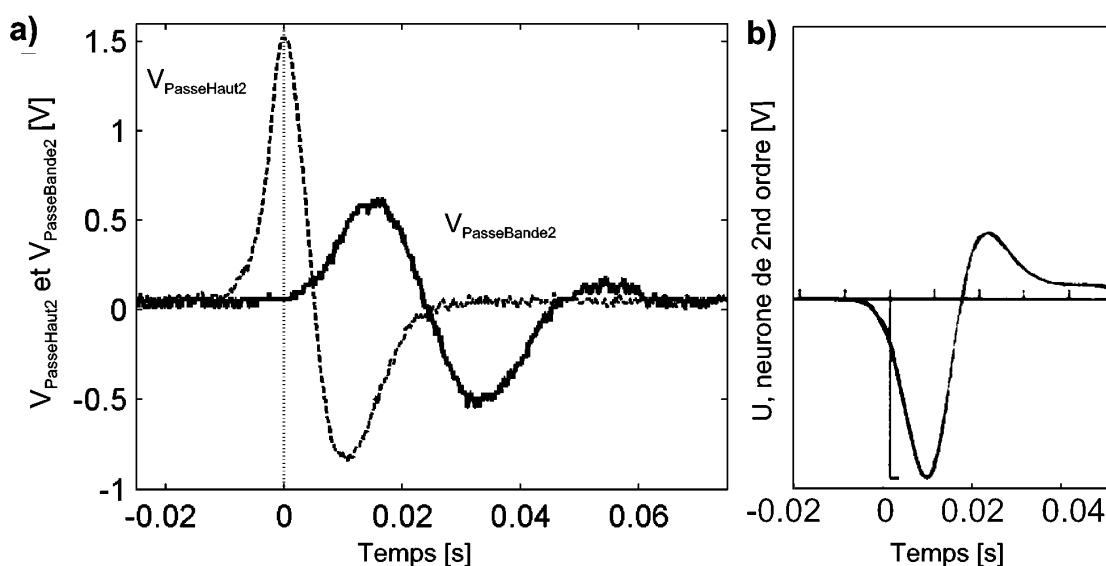


Figure IV.8 Réponse du signal photorécepteur filtré passe-haut puis passe-bande (point A et B de la Figure IV.6) à un objet ponctuel lumineux en déplacement relatif (a) (signaux réels) et devant un photorécepteur de mouche (b) (signal simulé)

a) L'œil ($\Delta\rho=4^\circ$) a été déplacé à vitesse constante ($\omega=200^\circ/\text{s}$) au-dessus d'une fente lumineuse de $250\text{ }\mu\text{m}$ de large. La réponse du passe-haut (trait pointillé) montrent une variation rapide du signal. Le signal visuel filtré passe-bande (trait plein) est à la fois atténué et déphasé par le filtre passe-bas du 4^{ème} ordre.

b) Réponse simulée du neurone du second ordre de l'œil de la mouche dans des conditions similaires ($\omega=100^\circ/\text{s}$, $\Delta\rho=1,5^\circ$) (figure IV.8.b d'après Juusola et French 1997).

Etape 6. Le **circuit à seuil** permet de séparer les détections sur front ON des détections sur front OFF et de dédoubler les voies ON et OFF, à l'instar de la séparation et du dédoublement des voies ON et OFF décrits pour les DEMs de la mouche (Franceschini et

al. 1989),

*Etape 7. La **génération d'une exponentielle décroissante** de longue durée sur la première voie:*

- i. prépare la mesure de la vitesse angulaire, de manière similaire à la préparation de la réponse d'un DEM chez la mouche (Franceschini et al. 1989),
- ii. détermine une gamme de retard Δt valide durant plusieurs centaines de milli-secondes (Franceschini 1985). Cette gamme se situe après un temps de montée, d'environ 10ms, qui sert également de temps d'inhibition : un retard Δt inférieur à 10 ms ne génère aucune réponse du DEM chez la mouche (Franceschini 1985), ce qui en limite la gamme de sensibilité à la vitesse,

*Etape 8. **Génération d'une impulsion très courte** (qui se voit retardée de Δt) sur la seconde voie. Le but de cette impulsion va être d'échantillonner à l'instant Δt , l'amplitude de l'autre voie.*

*Etape 9. **L'échantillonnage de l'exponentielle par l'impulsion** décrite à l'étape 8 permet de recréer l'interaction entre les 2 voies, nécessaire à la réponse d'un seul neurone DEM dans l'œil de la mouche (Franceschini et al. 1989).*

Il est à noter que la réponse de neurones à large champ, tel que le neurone H1 de la mouche n'est pas monotone en fonction de la vitesse angulaire des contrastes (cf. chapitre II). La réponse passe en effet par un maximum. Cette propriété n'est pas présente dans le modèle du DEM mis au point au laboratoire car dans une boucle de régulation, il est plus facile d'utiliser un capteur dont la réponse est monotone en fonction de la variable d'entrée qu'un capteur dont la réponse passe par un maximum.

IV.5. Modifications apportées depuis le DEM originel

Quelques modifications mineures ont été apportées à certaines étapes du traitement DEM originel (Viollet 2001):

Etape 1. Aucune modification,

Etape 2. Aucune modification, si ce n'est que l'on réalise le filtrage spatial passe-bas avec une seule lentille pour 2 photorécepteurs,

*Etape 3. **Photodétection linéaire**, en lieu et place de la photodétection logarithmique, afin d'avoir un gain plus important dans la gamme de luminance utile,*

Etape 4. Le filtre temporel passe-haut (fréquence de coupure 20Hz) devient un filtre actif,

Etape 5. Le filtre temporel passe-bas (fréquence de coupure 30Hz) devient un filtre actif du

type Butterworth du 4^{ème} ordre,

Etape 6. Aucune modification,

Etape 7. Aucune modification,

Etape 8. Aucune modification,

Etape 9. **Ajout d'un bloqueur d'ordre zéro** après l'échantillonnage de l'exponentielle par l'impulsion afin que la sortie du DEM devienne une tension quasi-continue.

Détaillons maintenant l'ensemble lentille-photorécepteur et les circuits DEM utilisés dans ce travail de thèse.

IV.6. L'ensemble lentille-photorécepteur (Étapes 1 à 3 du traitement DEM)

IV.6.1. Les caractéristiques optiques de l'ensemble lentille-photorécepteur

Une lentille montée devant deux photodiodes (Figure IV.9) détermine un angle inter-récepteur $\Delta\phi$ entre leurs axes optiques. Cet angle dépend de la distance focale de la lentille et de la distance entre les centres des 2 surfaces photosensibles du capteur (Tableau IV.1).

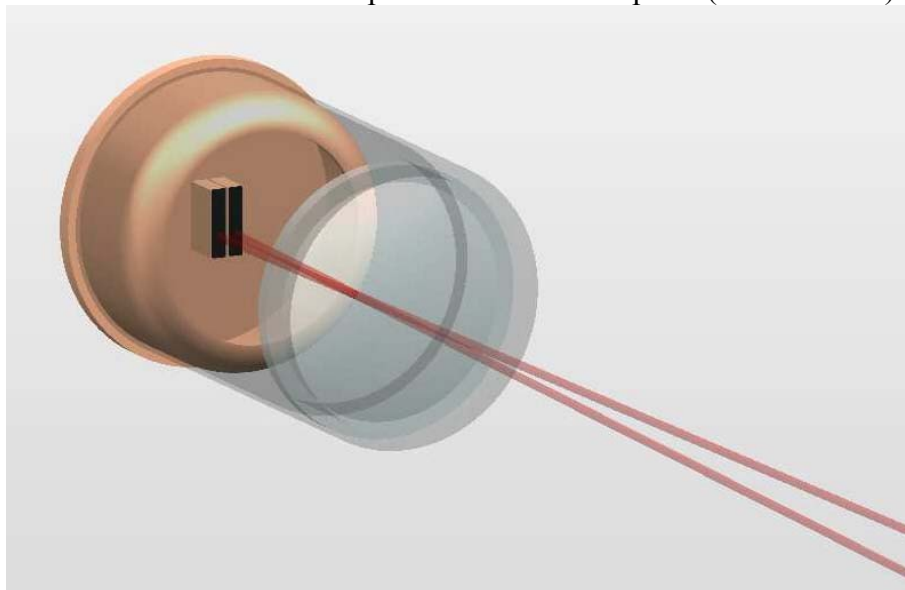


Figure IV.9 Une lentille montée devant deux photodiodes
Un angle inter-récepteur $\Delta\phi$ séparent leurs axes optiques.

Largeur de la surface photosensible	0.5 mm
Hauteur de la surface photosensible	2 mm
Espace entre les 2 surfaces photosensibles	0.05 mm
Écart inter-récepteur	0.55 mm
Surface photosensible de chaque photodiode	1 mm ²
Gamme de sensibilité spectrale	400 nm - 1000 nm
Maximum de sensibilité	850 nm

Tableau IV.1 Caractéristiques du capteur Centronic LD2A-5T composé de deux photodiodes montées en cathode commune. La surface photosensible de chaque capteur est de 1mm² et leur maximum de sensibilité se situe à 850nm.

Dans ce travail, nous avons utilisé deux ensembles lentille-photorécepteurs distincts pourvus d'angles inter-récepteurs et d'angles d'acceptance différents (comme indiqués au Tableau IV.2).

	Ensemble photodiodes-lentille n°1	Ensemble photodiodes-lentille n°2
Diamètre de la lentille (D)	5.5mm	5mm
Distance focale (f)	8.5mm	12mm
Angle inter-ommatidial($\Delta\phi$)	4.2°	2.6°
Angle d'acceptance($\Delta\rho$)	4.2°	2.8°
Nombre d'ouverture (f/D) (f-number)	1,54	2,4
Nombre d'ouverture² (f^2/D^2)	2,37 (f_1^2/D_1^2)	5,76 (f_2^2/D_2^2)

Tableau IV.2 Caractéristiques des 2 ensembles photodiodes-lentille utilisés

La distance focale plus importante de l'ensemble n°2 n'est pas compensée par une augmentation du diamètre de la lentille. Ainsi, l'ouverture numérique (ou *f-number*) est plus faible pour l'ensemble n°2 que pour l'ensemble n°1.

$$\frac{f_1^2 / D_1^2}{f_2^2 / D_2^2} = 2,41 \quad \text{Équation IV.6}$$

Cela signifie que les photorécepteurs du système optique n°2 reçoivent environ 2,4 fois moins de photons que l'œil n°1 (Équation IV.6) lorsqu'ils sont placés devant une surface de même luminance.

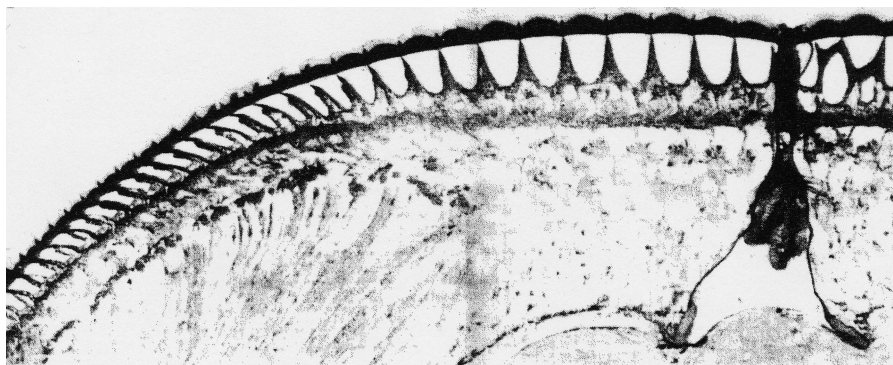


Figure IV.10 Coupe le long d'une ligne horizontale de facettes dans la fovea du Syrphé mâle (Diptère). Le diamètre et la distance focale des ommatidies sont doublés dans la région centrale, maintenant ainsi le nombre d'ouverture (ou *f-number*) sensiblement constant sur l'ensemble de l'œil composé. (Land 1981)

Certains insectes ont résolu ce problème en augmentant le diamètre des micro-lentilles en même temps que leur distance focale. L'optique se caractérise alors par une conservation de l'ouverture numérique malgré une diminution de l'angle interommatidial $\Delta\phi$ (notamment lorsque l'on se rapproche de l'avant de l'œil) (Figure IV.10).

IV.6.2. L'étage d'entrée : le montage photoconducteur

En opérant en mode *photoconducteur*, c'est-à-dire en polarisant la photodiode par rapport à un niveau de référence, la photodiode agit comme une source de courant, caractérisée par une résistance interne élevée. La sortie en tension est directement proportionnelle au photocourant. C'est un circuit particulièrement intéressant pour ses propriétés de rapidité et de linéarité.

La gamme de luminance de l'environnement étant, lors de notre application, limitée à une zone étroite (250 Lux - 450 Lux), nous avons utilisé un montage linéaire qui permet d'afficher un gain de l'étage d'entrée plus important par rapport au montage logarithmique (Figure IV.11).

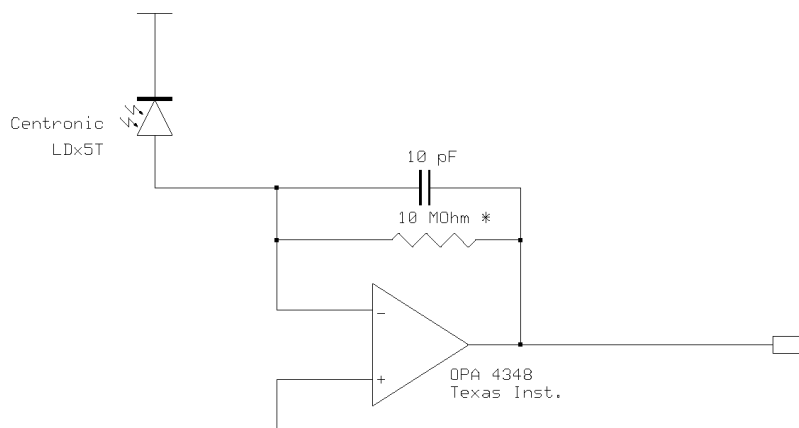


Figure IV.11 Montage photoconducteur
Ce montage permet d'utiliser 2 photodiodes Centronic montées en cathode commune.

Fonction de transfert des photorécepteurs

Le temps de montée de la photodiode silicium est de l'ordre de 10ns et la constante de temps du circuit photorécepteur (mode photoconducteur) est de l'ordre de 100μs.

$$G_{ph}(p) = \frac{1}{1 + \tau p} \quad \text{avec} \quad \tau = 100\mu s$$

Équation IV.7

La constante de temps de la dynamique de l'étage photorécepteur G_{ph} (Équation IV.7) est négligeable par rapport à celles mises en jeu dans les étapes du traitement DEM, la bande passante des étapes de filtrage temporel se situant entre 20 et 30Hz.

Il n'en est pas de même des neurones photorécepteurs présents dans l'œil de la mouche (ou des vertébrés), qui présentent eux aussi une fonction de transfert de type passe-bas mais dont la constante de temps élevée (10 à 1000ms) intervient notablement dans le traitement visuel précoce (voir paragraphe IV.4).

IV.6.3. Sensibilité angulaire des photodiodes

Pour évaluer et ajuster le diagramme de sensibilité angulaire de chaque photorécepteur, nous avons monté l'œil artificiel (c'est à dire l'ensemble « lentille-photorécepteurs ») sur l'axe d'un moteur, lui même relié par une courroie à l'axe d'un *resolver* (capteur à courant porteur permettant d'afficher des positions angulaires avec une résolution supérieure à celle d'un « potentiomètre de précision »). Cet ensemble est placé à un mètre d'une source lumineuse ponctuelle stationnaire (Figure IV.12) (Viollet 2001). A l'aide du micromoteur et d'un réducteur, nous réalisons une rotation de l'œil. La réponse de chaque photorécepteur en fonction de son orientation angulaire par rapport à la source ponctuelle permet de tracer sa courbe de sensibilité angulaire (Figure IV.13).

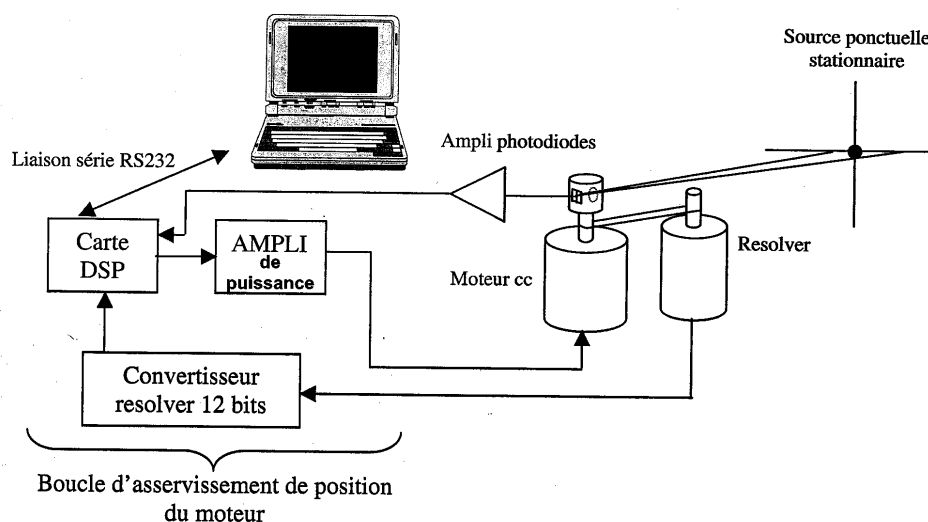


Figure IV.12 Banc de test destiné à mesurer la sensibilité angulaire de chaque photodiode (Viollet 2001)

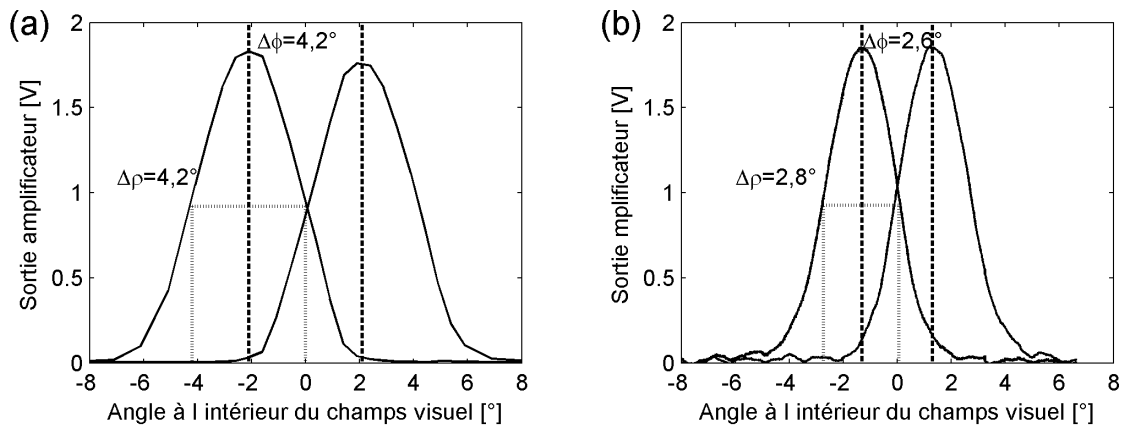


Figure IV.13 Sensibilité angulaire des ensembles lentille-photodiodes n°1 (a) et n°2 (b), définis au tableau IV.2.

Deux configurations de photorécepteurs+lentille ont été testées. On constate que les courbes de sensibilité angulaire des 2 photorécepteurs sont décalées de l'angle inter-récepteur $\Delta\phi$ ($\Delta\phi = 4,2^\circ$ ou $2,6^\circ$) et qu'elles ont un profil de courbe en cloche. C'est la légère défocalisation des photorécepteurs par rapport au plan focal de la lentille qui permet d'obtenir cette sensibilité quasi-gaussienne. L'angle inter-récepteur et l'angle d'acceptance sont égaux à $4,2^\circ$. Le second ensemble lentille-photodiodes se différencie par un $\Delta\phi$ plus fin ($\Delta\phi = 2,6^\circ$). On constate que pour les 2 configurations testées, l'angle d'acceptance $\Delta\rho$ reste sensiblement égal à l'angle inter-photorécepteur.

Rappelons que c'est cette sensibilité gaussienne qui permet de réaliser l'étape de *filtrage passe-bas spatial* (cf. paragraphe IV.3).

Pour une meilleure analyse de cette fonction de filtrage spatial, définissons de manière élémentaire la fréquence spatiale et la fréquence de coupure d'un filtre spatial.

Définition de la fréquence spatiale

La spectre de fréquence spatiale permet de caractériser le stimulus visuel statique présenté au photorécepteur.

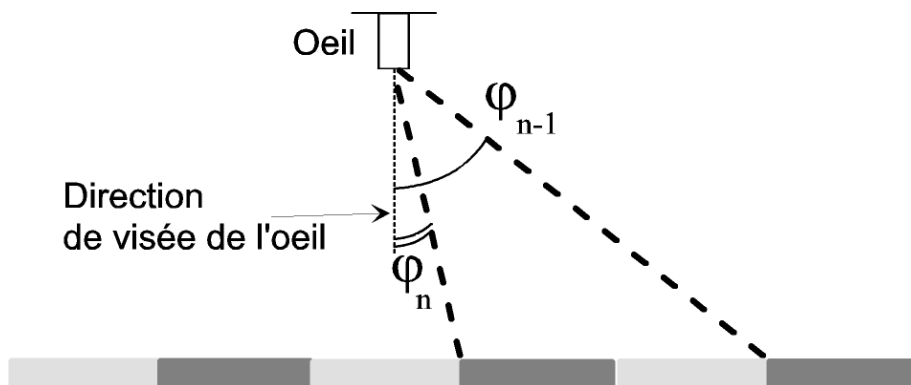


Figure IV.14 Angles ϕ_n , ϕ_{n-1} vu de l'œil sous-tendus par une période spatiale

Pour un motif visuel périodique (cf. Figure IV.14), le fondamental de la fréquence spatiale ν (en $c/^\circ$) s'écrit :

$$\nu = \frac{1}{\varphi_n - \varphi_{n-1}} \quad \text{Équation IV.8}$$

Avec

$\varphi_n - \varphi_{n-1}$, angle sous-tendu par une période du motif (en $^\circ$)

On déduit des équations IV.1 et IV.8 (la fonction *arctan* étant monotone et croissante entre -90° et 90°) que la fréquence spatiale des contrastes augmente avec la hauteur sol.

Définition de la fréquence de coupure d'un filtre spatial

La fréquence de coupure caractérise le filtrage spatial appliqué au motif de contrastes.

Soit $A(\varphi)$, la courbe de sensibilité angulaire des photodiodes, approximée à une gaussienne :

$$A(\varphi) = e^{-K\left(\frac{\varphi}{\Delta\rho}\right)^2} \quad \text{Équation IV.9}$$

Soit $G_s(\nu)$, la fonction de transfert du filtre spatial :

$$G_s(\nu) = e^{-K(\nu\Delta\rho)^2} \quad \text{Équation IV.10}$$

A partir de l'équation IV.10, on définit la fréquence de coupure spatiale, ν_{co} , comme la fréquence spatiale la plus élevée susceptible d'être transmise par un photorécepteur de sensibilité angulaire gaussienne (Snyder 1977) :

$$\nu_{co} \cong \frac{1}{\Delta\rho} \quad \text{Équation IV.11}$$

La fréquence de coupure du filtre spatial est une fonction inverse de l'angle d'acceptance $\Delta\rho$: plus l'angle d'acceptance est faible, plus la fréquence de coupure est élevée.

Pour résumer, l'étape de filtrage spatial du DEM agit comme un véritable filtre anti-repliement qui limite le spectre des bords contrastés attaquant le DEM. Ainsi, la probabilité d'une erreur de correspondance entre les détections réalisées sur chacune des deux voies d'un DEM est plus faible.

IV.7. Les circuits utilisés pour le traitement temporel (Étapes 4 à 9 du traitement DEM)

Deux versions distinctes du circuit DEM ont été utilisées pour cette application. D'abord un DEM *analogique* mettant en œuvre 2 composants à cellules analogiques programmables (FPAA, pour « Field-Programmable Analog Array ») a été mis au point. C'est ce circuit (non embarqué) qui a permis de réaliser l'ensemble des tests sur le robot, présentés dans ce mémoire. Par la suite, un DEM mixte associant un microcontrôleur à des circuits analogiques a été mis au point au laboratoire (projet de fin d'études de Stéphane Amic (Amic 2002)) et installé à bord du robot, ce qui a permis de confirmer les résultats.

Détaillons maintenant ces 2 circuits DEM.

IV.7.1. Le DEM analogique basé sur 2 FPAAs (composant à cellules analogiques programmables)

Le FPAA (Field-Programmable Analog Array) proposé par Anadigm est un composant miniature (17×17mm) qui contient 20 cellules analogiques programmables.

Ce circuit est l'un des rares circuits présents sur le marché à être à la fois analogique et programmable. Pour être programmables, les fonctions analogiques sont réalisées à l'aide d'amplificateurs opérationnels, de circuits à capacités commutées et de commutateurs analogiques.

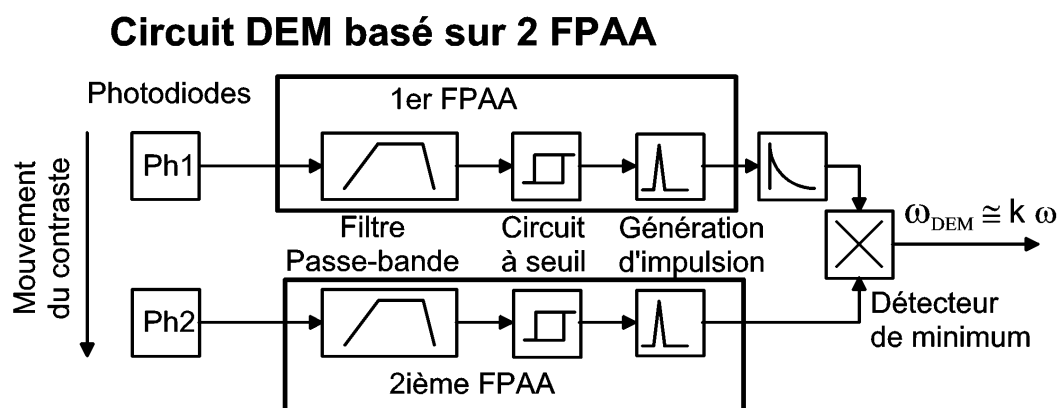


Figure IV.15 Synoptique du DEM analogique basé sur deux FPAA de la société Anadigm

Après de multiples essais, nous n'avons pu intégrer que 4 étapes du traitement DEM à l'intérieur d'un même FPAA (Figure IV.15), soit les étapes 4, 5, 6 et 8 du traitement DEM modifié (cf. paragraphe IV.5), en utilisant les blocs fournis en bibliothèque par Anadigm (Figure IV.16). Les étapes 7 et 9 ont donc été réalisées à l'extérieur du FPAA à l'aide de composants discrets (circuit RC et circuit à diode) de façon analogue au DEM originel.

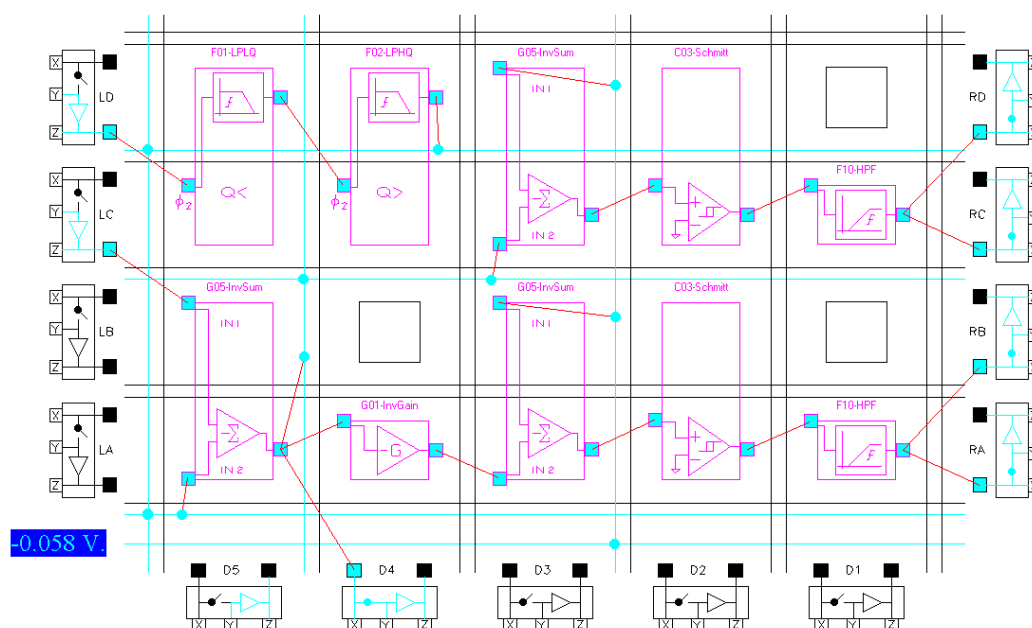


Figure IV.16 Capture d'écran du logiciel permettant de configurer le FPAA. Chaque bloc élémentaire est doté d'une fonction élémentaire. Par exemple, pour un bloc filtre passe-bas, l'un des paramètres ajustables par programmation est la fréquence de coupure.

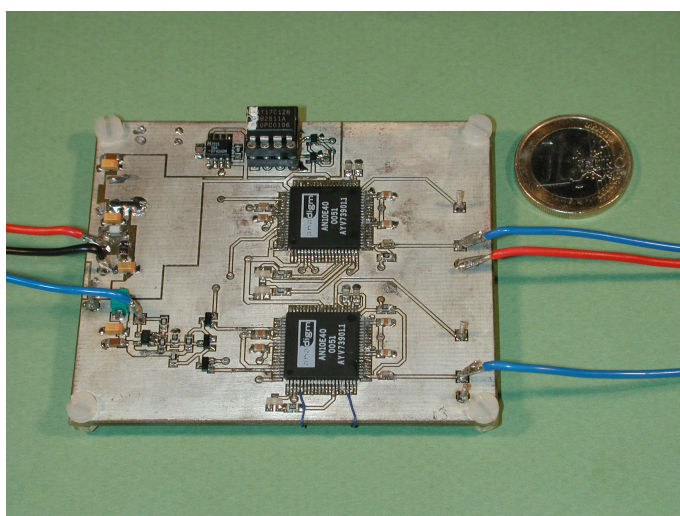


Figure IV.17 Circuit d'essai ayant permis la mise au point du DEM analogique FPAA. On remarque les 2 composants FPAA de taille prépondérante au centre. La mémoire de programmation est située au second plan. Un routage compact permettrait de réaliser un circuit dont la masse serait de l'ordre de 5g.

Résultat de la mesure du mouvement

Les tests réalisés sur ce circuit (Figure IV.17) ont permis de retrouver une qualité de mesure du flux optique analogue à celle du DEM analogique. On retrouve à la Figure IV.18 l'ensemble des étapes du traitement DEM. Le bloqueur d'ordre zéro permet de maintenir la tension de sortie égale au niveau maximum du pic jusqu'à la prochaine mesure.

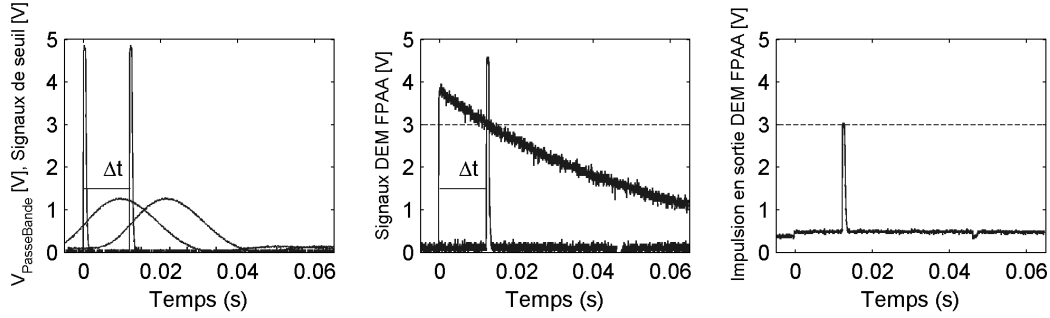


Figure IV.18 Les différentes étapes du traitement DEM

a) Réponse du filtre passe-bande pour un front de contrastes (Étape 5) et détection des contrastes sur chacune des voies (Étape 6). On remarque que les deux détections sont bien séparées d'un retard Δt (ici de l'ordre de 15ms),
 b) Génération de l'exponentielle de longue durée à partir du signal de détection de la première voie (Étape 7), génération du pic de la seconde voie qui vient échantillonner la première voie au bout d'un temps Δt (Étape 8),
 c) Résultat de l'échantillonnage de l'exponentielle par l'impulsion de la seconde voie (Étape 9). Comme cet échantillonnage est réalisé par un « circuit à minimum » à base de diodes, la gamme de détection est limitée vers le bas à 0,6V (tension de seuil des diodes).

La sortie DEM en fonction de la vitesse angulaire (Équation IV.12 et Figure IV.19) n'est pas une fonction linéaire à cause de l'exponentielle décroissante de longue durée (étape 7) qui convertit Δt en la tension de sortie du circuit DEM. Ceci a pour avantage de définir une gamme de mesure et de permettre une meilleure précision de mesure aux faibles vitesses angulaires ω (en-dessous de 150°/s) qu'aux vitesses angulaires élevées (au-dessus de 200°/s).

$$\omega_{DEM} = k' \cdot e^{-\left(\frac{\Delta t}{\tau}\right)} = k' \cdot e^{-\left(\frac{\Delta \varphi}{\omega \times \tau}\right)} \quad \text{Équation IV.12}$$

avec $\tau = 0,8s$ avec $k' = 3,8V$

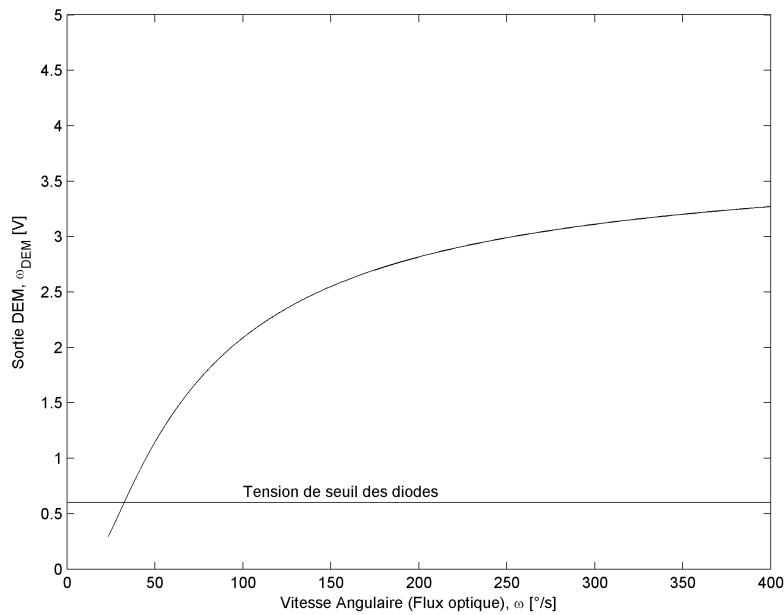


Figure IV.19 Fonction théorique de la sortie DEM FPAA en fonction du flux optique

La gamme est limitée pour les faibles flux optiques ω par la tension de seuil des diodes de sortie (0,6V).

Problèmes liés au DEM analogique basé sur 2 FPAAs

Des problèmes sont apparus lors du développement :

1. Le nombre réduit (20) de cellules disponibles sur un FPAA et l'absence de souplesse de leur configuration ne permettent pas d'intégrer toutes les étapes du traitement DEM sur les 2 FPAA.
2. Des tensions de décalage importantes (de l'ordre de 100mV) sont apparues en sortie des filtres. En effet, la tension de décalage d'entrée des amplificateurs opérationnels de chacune des cellules programmables se voit amplifiée par le gain important utilisé dans le traitement subséquent. Pour compenser ces tensions de décalage, il a fallu utiliser des cellules du composant programmable, réduisant ainsi d'autant l'espace disponible pour la programmation des autres étapes de traitement.
3. Les tensions de décalage d'entrée des amplificateurs opérationnels sont différentes d'une cellule à l'autre et d'un composant à l'autre, ce qui ne facilite pas leur compensation en sortie.

Ainsi, l'utilisation d'au moins 2 composants analogiques programmables a été nécessaire pour réaliser un seul circuit DEM (Figure IV.20). La consommation de circuit DEM complet est donc d'au moins deux fois 350mW (puissance dissipée par un composant FPAA) soit 700mW. Cette puissance électrique rend cette version du circuit DEM incompatible avec une intégration à bord d'un micro-aéronef.

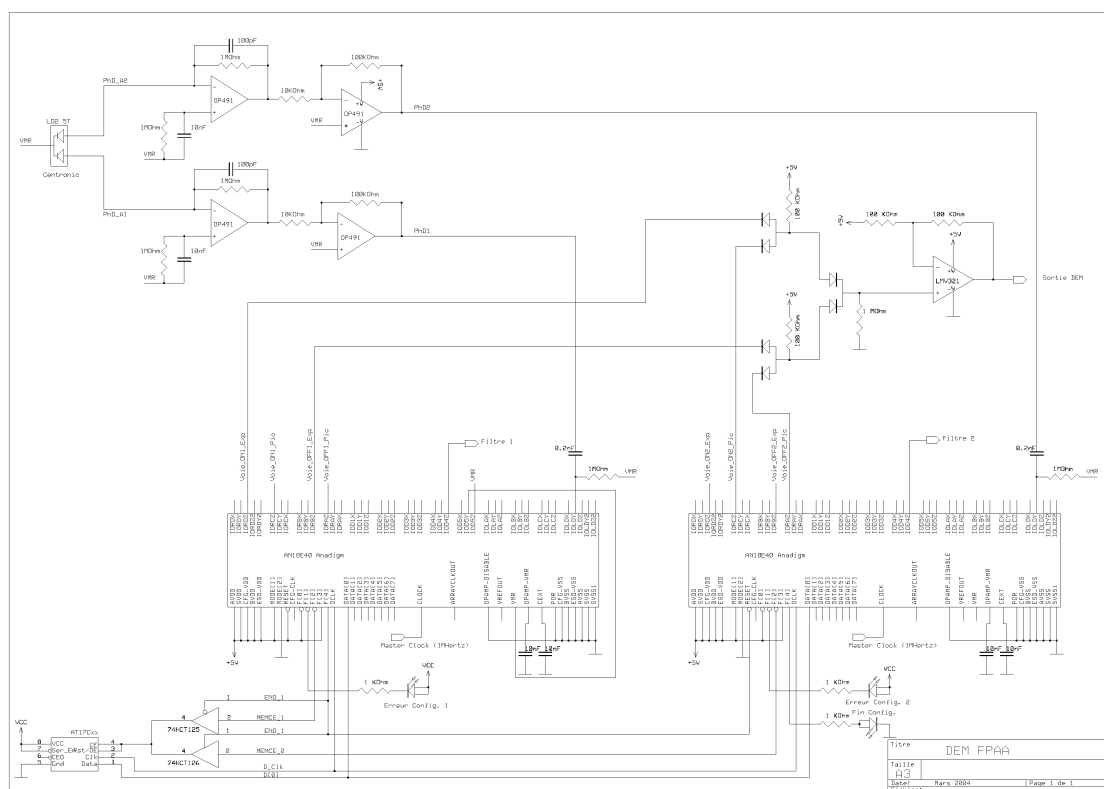


Figure IV.20 Schéma électronique du DEM FPAA avec son circuit externe complémentaire. Ce DEM analogique basé sur deux FPAAs nécessite en plus une mémoire de programmation.

IV.7.2. Le DEM mixte (combinant filtrage analogique et numérique)

Nous avons réalisé un circuit DEM mixte, combinant filtrages analogique et numérique, pendant le projet de fin d'études de Stéphane Amic (Amic 2002, Ruffier et al. 2003).

Ce nouveau circuit utilise : d'une part, un prétraitement analogique qui conditionne les signaux avant leur numérisation, d'autre part un traitement numérique programmé à l'intérieur d'un micro-contrôleur (Cygnal 8051 F300) (Figure IV.21).

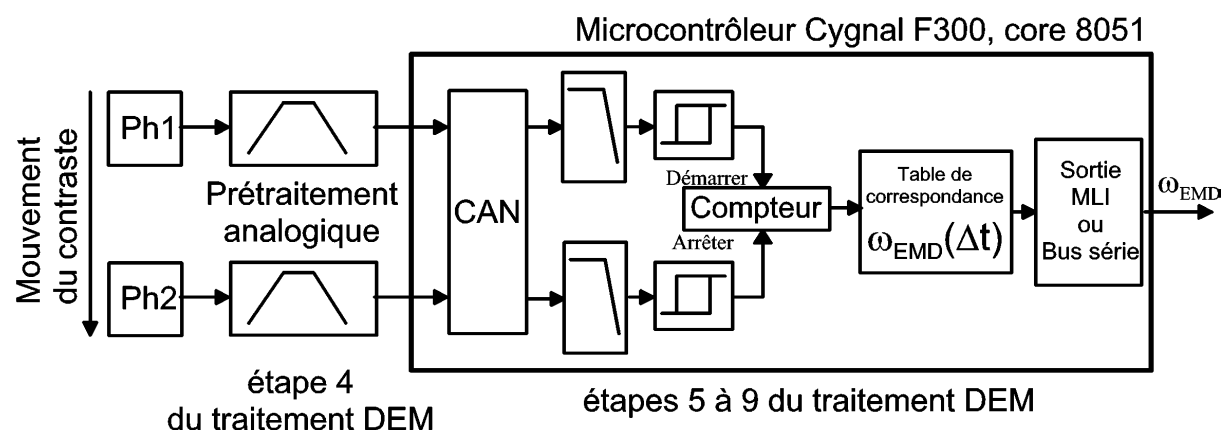


Figure IV.21 Synoptique DEM mixte

L'étape 4 est réalisée en électronique analogique. Les étapes 5 à 9 du traitement DEM sont réalisées à l'intérieur du microcontrôleur. Un filtrage additionnel, anti-repliement, complète ici l'étape 4 avant d'attaquer la conversion analogique-numérique (CAN).

Le filtrage passe-haut (étape 4 du traitement DEM modifié, paragraphe IV.5), mis en œuvre en électronique analogique, élimine la composante continue du signal et permet de numériser le signal visuel en pleine gamme avec une résolution de 8 bits. Un filtre du premier ordre (fréquence de coupure 130Hz) a été ajouté avant la numérisation de façon à éliminer tout problème de repliement de spectre.

Le filtrage passe-bas, filtre de Butterworth d'ordre 4 (étape 5 du traitement DEM, paragraphe IV.5), est de loin l'étape la plus coûteuse en termes de nombres de composants et de puissance consommée pour la version analogique en CMS. Elle représente également la principale charge de calcul pour le micro-contrôleur. Elle a été programmée en virgule fixe en utilisant deux cellules d'ordre deux en cascade décrit en Figure IV.22 et définit par l'équation IV.13). Cette synthèse a été réalisée à l'aide des outils "Fixed point", "Filter design" et "Embedded C coder" de MATLAB/Simulink.

$$y(N) = \sum_{i=1}^N b(i) \cdot x(i) - \sum_{i=1}^{N-1} a(i) \cdot x(i) \quad \text{Équation IV.13}$$

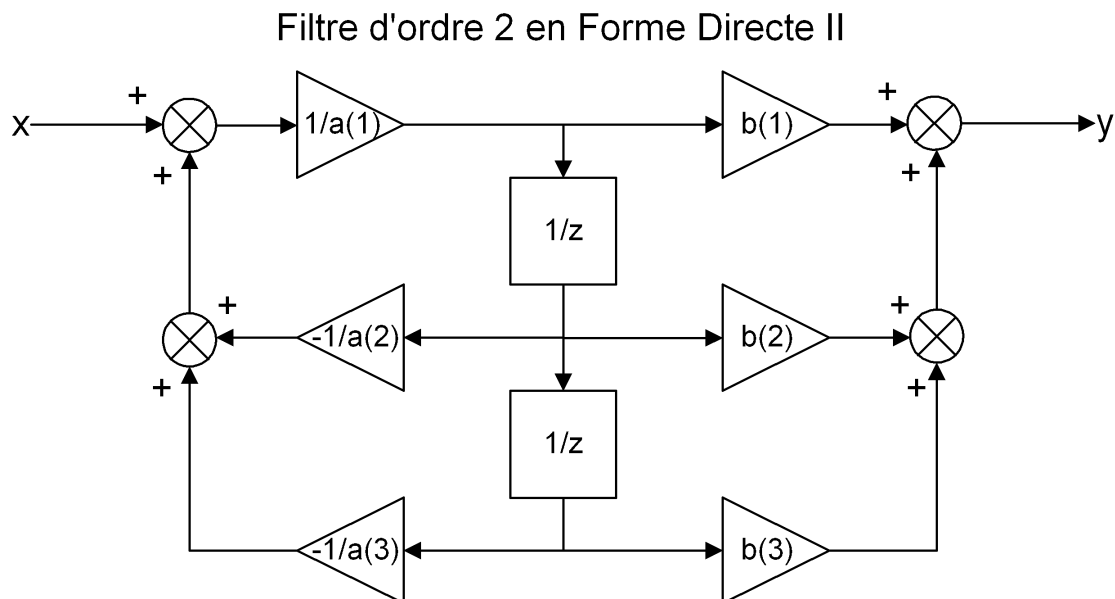


Figure IV.22 Cellule d'ordre 2 utilisée pour le filtrage passe-bas (étape 5 du traitement DEM), réalisé en virgule fixe.

Seulement huit additions au total (correspondant à deux cellules d'ordre 2) sont nécessaires à chaque pas d'échantillonnage pour obtenir un filtrage passe-bas des signaux visuels. Un filtre à réponse impulsionnelle infinie limite à la fois le nombre d'éléments de retard et le nombre d'additions nécessaires par rapport à un filtre à réponse impulsionnelle finie. Par rapport à une cellule d'ordre 4, la mise en cascade de 2 cellules d'ordre 2 limite les problèmes de stabilité du filtrage et les erreurs de quantification liées à la représentation en virgule fixe. De plus, la forme directe II réduit le nombre de variables, donc la charge de calcul.

Les étapes 5 à 9 du traitement DEM ont été programmées en utilisant les périphériques du microcontrôleur. Une table de correspondance permet de convertir les retards Δt mesurés par un compteur interne en une tension de sortie DEM et reproduit la fonction exponentielle décroissante présente dans le DEM analogique. Comme dans le DEM originel, les retards inférieurs à 10 ms ne sont pas pris en compte.

La figure IV.23 montre une réalisation miniaturisée de ce circuit DEM mixte.



Figure IV.23 Photographie des 2 faces du DEM mixte (ensemble lentille-photorécepteur inclus) mis en œuvre sur un circuit imprimé d'une épaisseur de 400 μ m.

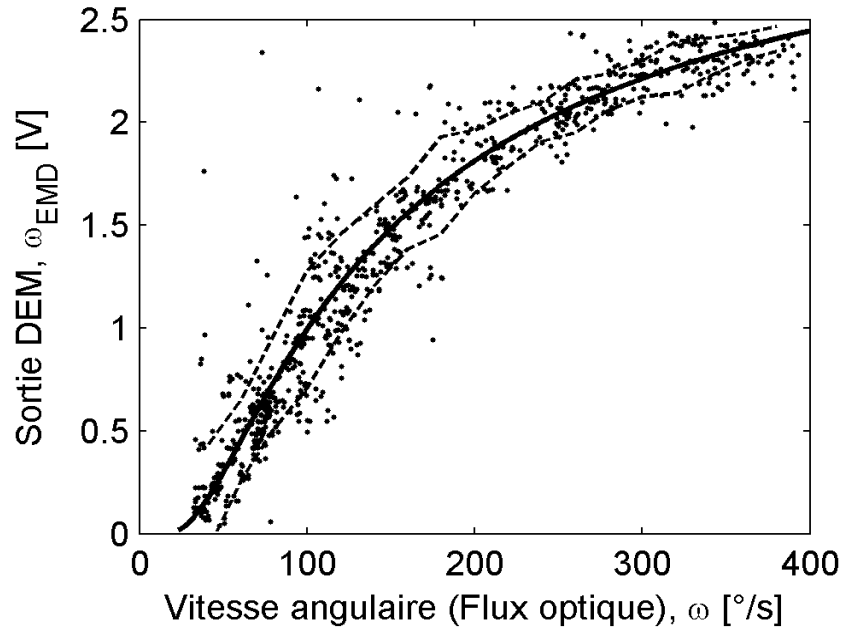


Figure IV.24 Caractéristique du DEM : réponse du DEM en fonction du flux optique.

Ces mesures ont été réalisées avec le DEM mixte muni de l'ensemble lentille-photorécepteur n°1 (cf. sensibilité angulaire de l'œil n°1 à la figure IV.13).

La Figure IV.24 montre la réponse des voies ON et OFF du circuit à plus de 800 stimuli de flux optique. Ces données ont été collectées en utilisant l'environnement visuel contrasté qui sera présenté au chapitre V. Cet environnement présente à la fois des contrastes m variés ($0,04 < m < 0,3$) (cf. paragraphe IV.2 pour la définition du contraste m) et des fréquences spatiales variées ($0,06c/°$ à $1,75c/°$) (cf. paragraphe IV.6.3 pour la définition de la fréquence spatiale). La réponse moyenne (trait plein) entourée de son écart-type (trait pointillé) est monotone et croissante en fonction du flux optique, comme le prévoit l'équation IV.14 ci-dessous. L'écart-type ($\pm 0,16V$) est comparable à celui obtenu sur un circuit DEM basé sur un autre principe (le principe du corrélateur cf. Figure IV.2) (Harrison et Koch 1999).

$$\omega_{DEM} = k' \cdot e^{-\left(\frac{\Delta t}{\tau}\right)} = k' \cdot e^{-\left(\frac{\Delta \phi}{\omega \times \tau}\right)} \quad \text{Équation IV.14}$$

avec $\tau = 0,4s$ et $k' = 3,3V$

Avantages et inconvénients du DEM mixte associant filtrage analogique et numérique

Ce circuit comporte quelques inconvénients :

1. Un décalage du zéro apparaît en sortie (de l'ordre de quelques dizaines de mV), qui est dû à la quantification et à la représentation des nombres en virgule fixe,
2. La résolution de la mesure de Δt est limitée par fréquence d'échantillonnage (1kHz).

Une augmentation de la résolution impliquerait une augmentation de la fréquence

d'échantillonnage, une charge de calcul plus importante pour le microcontrôleur et aussi une nouvelle mise au point des filtres à virgule fixe.

Mais il comporte beaucoup d'avantage en termes de :

1. Simplicité des connexions (Bus série, sortie en Modulation de Largeur d'Impulsion ou MLI),
2. Re-programmation aisée des paramètres (tel que le niveau de seuil), facilitant la mise au point,
3. Programmation des variables internes, facilitant la mise au point et la visualisation.

Avec une masse réduite à seulement 0.8g et une consommation réduite à 40mW, ce circuit DEM mixte (Figure IV.23 et Figure IV.25) peut aisément s'intégrer à bord d'un micro-aéronef, contrairement à la version réalisée précédemment (paragraphe IV.7.1) sur la base de FPAAs.

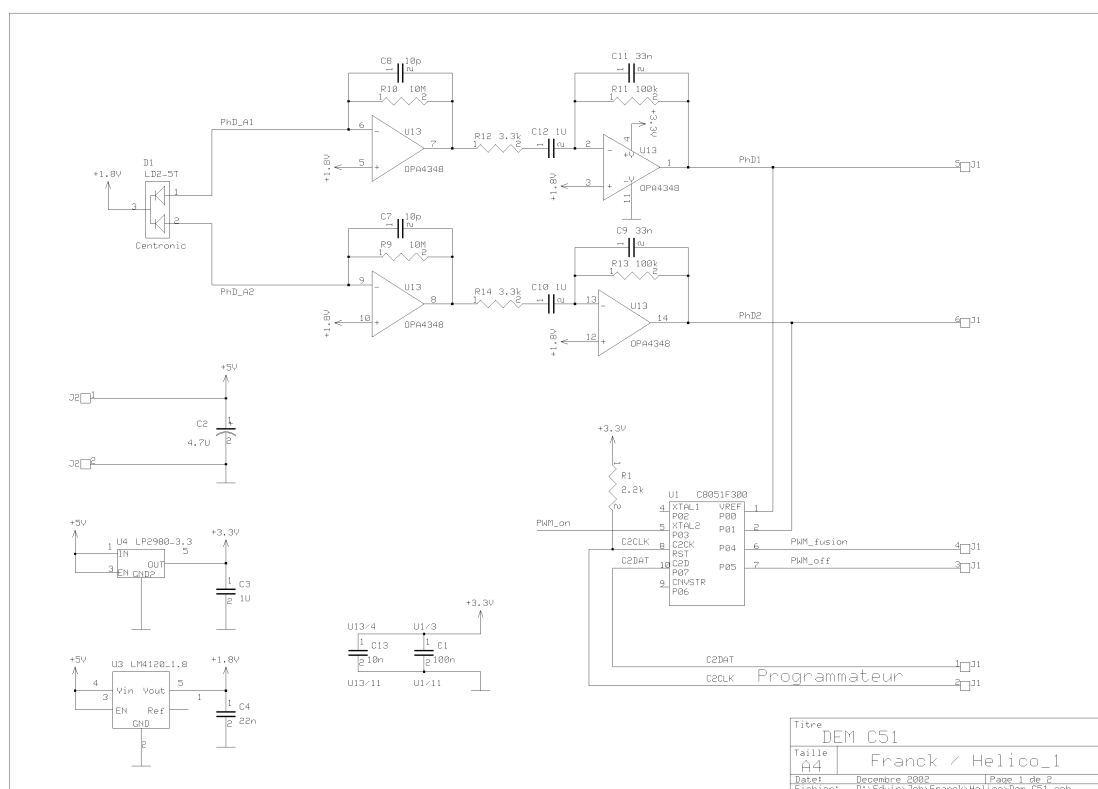


Figure IV.25 Schéma électrique du DEM mixte

IV.7.3. Comparaison des différents circuits DEM

Comparons les différentes versions du DEM en terme de superficie, de consommation, de masse mais également de disponibilité, dans le tableau IV.3.

	1 DEM double sens analogique originel en CMS (1989)	1 DEM analogique basé sur 2 FPAA (2003)	1 DEM mixte en CMS (2003)	1 DEM mixte en LTCC (2004)	7 DEMs basé sur 1 FPGA (2004)	11 DEMs en VLSI numérique (2004)
Composants	Composants analogiques CMS	2 FPAA (17×17mm) + Composants analogiques CMS	Micro-contrôleur (3×3mm) + Composants analogiques CMS	Micro-contrôleur (3×3mm) + Composants analogiques CMS	FPGA Xilinx 12×12mm (250 000 p., Fréq. Horloge 200 MHz)	Circuit spécifique (ASIC) réalisé par nos partenaires de l'INP Grenoble (Fréq. Horloge 3,6 MHz)
Superficie (soit pour 1 DEM)	1250mm ² (625mm ²)	2000mm ² (2000mm ²)	540mm ² (540mm ²)	50mm ² (50mm ²)	2250mm ² (320mm ²)	8mm ² de silicium (0,7mm ²)
Consommation (soit pour 1 DEM)	100mW (50mW)	750mW (750mW)	40mW (40mW)	40mW (40mW)	400mW (57mW)	—
Masse (soit pour 1 DEM)	5 g (2,5g)	La masse pourrait être réduite à 5 g	0,8 g (0,8g)	0,2 g (0,2g)	7g (1g)	Choix du boîtier non arrêté
Test/Validité	Testé et validé	Testé et validé	Testé et validé	Testé et validé	Testé et validé	Tests en cours
Disponibilité	Disponible	Disponible	Disponible	Quelques modules disponibles	Étage d'entrée à redéfinir	—

Tableau IV.3 Comparaison entre les différents circuits DEM, réalisés selon différentes technologies mais utilisant toujours le même principe de mesure du mouvement énoncé au laboratoire, en 1986, d'après les résultats électrophysiologiques obtenus sur les neurones DEM de la mouche.

Le DEM mixte combinant filtrage analogique et filtrage numérique (Amic 2002, Ruffier et al. 2003) est le circuit doté des meilleures caractéristiques, aussi bien en terme de masse que de consommation. L'avantage du DEM mixte en CMS est également sa facilité de fabrication. Nous maîtrisons au laboratoire les différentes étapes de sa réalisation sur un substrat d'épaisseur de 400µm ou de 50µm. Sa version en LTCC (Puddas et al. 2004) est encore plus compacte (Figure IV.26). Mais sa fabrication reste difficile : nous dépendons de nos partenaires d'Oulu et, de plus, le rendement de production est de l'ordre de 30% seulement. Les performances du circuit basé sur un FPGA (Aubépart et al. 2004) sont intéressantes pour pouvoir intégrer plusieurs dizaines de DEM : ce même composant FPGA offre la possibilité

de traiter jusqu'à 245 DEMs (avec une fréquence d'horloge de 100MHz). Le circuit VLSI numérique réalisé par S. Mancini et G. Bouvier au LIS (INP Grenoble) est en cours de test dans notre laboratoire.

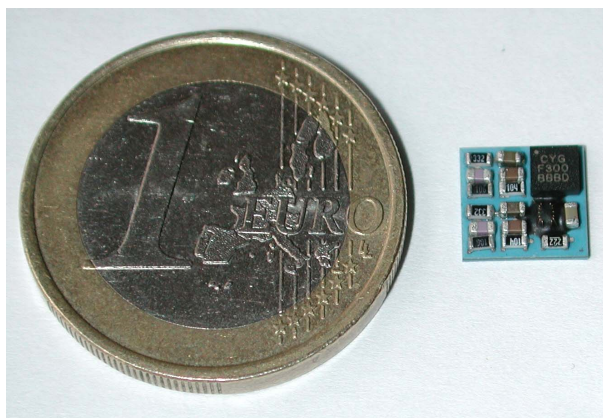


Figure IV.26 Photo du DEM mixte réalisé en LTCC (masse : 0,2g)
(Puddas et al. 2004)

IV.8. Analyse expérimentale des signaux visuels filtrés passe-bande

Analysons de façon expérimentale les signaux visuels filtrés passe-bande (cf. Figure IV.6) en fonction du contraste, de la répartition des fréquences spatiales et de la fréquence de coupure du filtrage spatial, pour comprendre l'influence de ces paramètres sur la détection et la mesure du flux optique réalisées par le DEM.

IV.8.1. Effet d'un faible contraste

Le signal mesuré en sortie du filtre passe-bande (Figure IV.27) dépend à la fois du contraste m des bandes adjacentes et de leur largeur. En effet, le filtrage spatial causé par la courbe de sensibilité angulaire (non infiniment fine) atténue les fréquences spatiales élevées, donc la réponse à de fins motifs.

A un contraste élevé correspond une variation d'amplitude élevée. Le seuil du traitement DEM est ajusté vers 75mV pour limiter les erreurs de correspondance. Plusieurs éléments de la texture peuvent ne générer que des réponses subliminales et ne donner naissance, par conséquent, à aucune mesure de flux optique. Ce sont les éléments de texture qui, ou bien présentent un contraste trop faible, ou bien sont de largeurs très faibles, comme l'illustre le paragraphe suivant.

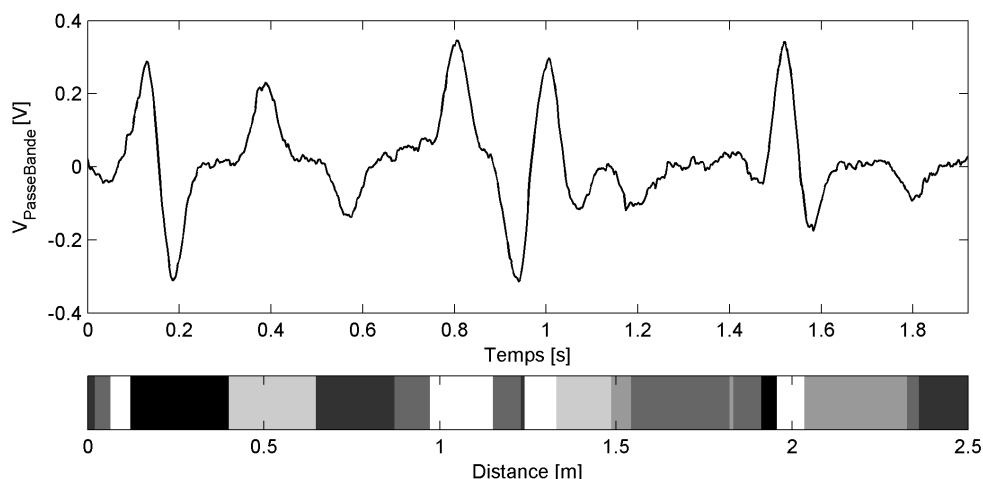


Figure IV.27 Mesure du signal filtré passe-bande de l'un des 2 photorécepteurs défilant devant le motif (représenté au dessous), à une distance de $h=1\text{m}$ et à une vitesse angulaire constante de $75^\circ/\text{s}$ (l'ensemble lentille-photorécepteur n°1 est utilisé ici : $\Delta\rho=4,2^\circ$)

Chaque bord contrasté de contraste m ($0,04 < m < 0,3$) génère une variation de signal, dont l'amplitude dépend du contraste m et de la largeur du secteur (filtrage spatial).

IV.8.2. Effet de diverses fréquences spatiales

En présentant la texture de la figure IV.28 à l'ensemble lentille-photorécepteur n°1 (caractérisé par $\Delta\rho=4,2^\circ$, cf. figure IV.13) situé à 3 hauteurs sol distinctes (2m, 1,5m et 1m), on met en évidence l'atténuation du signal avec la hauteur (Figure IV.28).

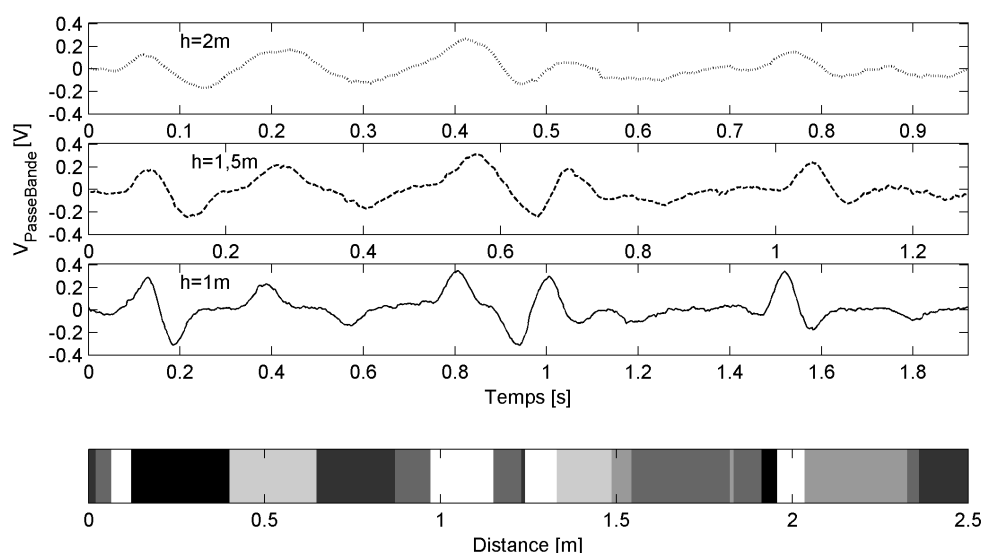


Figure IV.28 Mesure du signal filtré passe-bande d'un photorécepteur (de l'ensemble lentille-photorécepteur n°1, $\Delta\rho_1=4,2^\circ$, cf. figure IV.13) se déplaçant à vitesse constante à 3 distances différentes de la texture : $h=2\text{m}$ (courbe en traits pointillés fins), $h=1,5\text{m}$ (courbe en tirets) et $h=1\text{m}$ (courbe en trait plein) (de l'ensemble lentille-photorécepteur n°1 avec $\Delta\rho_1=4,2^\circ$)

Ces signaux visuels ont été relevés pour un même flux optique de $75^\circ/\text{s}$, ce qui a exigé d'accroître la vitesse sol v_x proportionnellement à la hauteur sol h pour réaliser chacune des trois mesures.

Comme prévu, plus la hauteur sol augmente, plus les signaux visuels sont atténués, car le filtre spatial atténue les fréquences spatiales les plus élevées (Équation IV.10).

Si l'atténuation est trop importante, le traitement DEM ne pourra prendre en compte le signal associé car il restera en-dessous du seuil de détection. Le DEM a donc des difficultés à mesurer le flux optique pour des fréquences spatiales élevées.

On peut également ajouter que les fréquences spatiales sont transformées en fréquence temporelle par le flux optique (Landolt et Mitros 2001) :

$$f_t = \omega \cdot \nu \quad \text{Équation IV.15}$$

C'est de cette fréquence temporelle dont dépend la fréquence de détection du DEM et donc la fréquence moyenne de renouvellement de l'estimation du flux optique.

IV.8.3. Effet du filtrage spatial

En présentant la texture de la figure IV.29 aux deux ensembles lentille-photorécepteur n°1 et n°2 (caractérisés par $\Delta\rho_1=4,2^\circ$ et $\Delta\rho_2=2,8$, cf. figure IV.13) pour un même flux optique, on met bien en évidence la différence de finesse des réponses (Figure IV.29) due à la différence des fréquences de coupure spatiale, de ces deux systèmes.

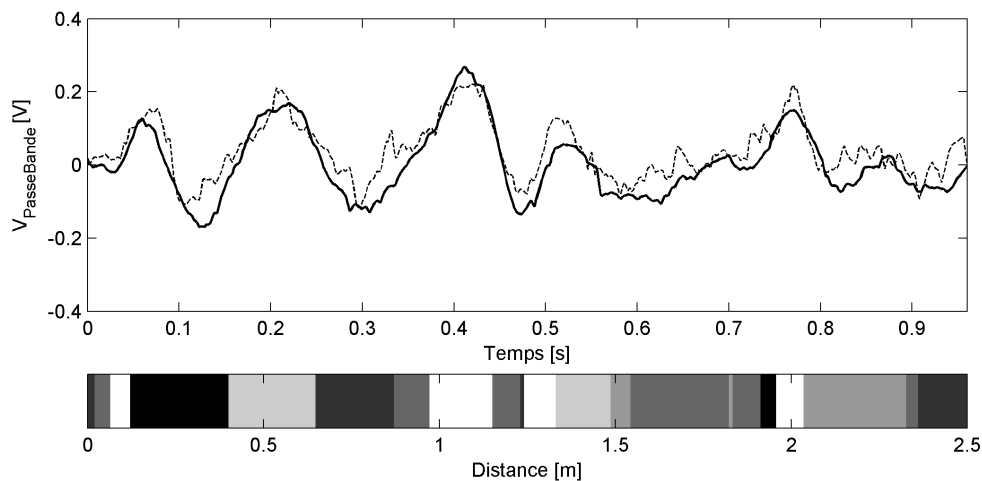


Figure IV.29 Mesure du signal filtré passe-bande d'un photorécepteur pour 2 filtrages spatiaux de fréquence de coupure différentes

(Ensemble lentille-photorécepteur n°1 avec $\Delta\rho_1=4,2^\circ$ en trait plein, Ensemble lentille-photorécepteur n°2 avec $\Delta\rho_2=2,8^\circ$ en trait pointillé)

Plus la fréquence de coupure est basse (trait plein), plus faibles sont les variations apparaissant sur le signal visuel. Ces signaux visuels ont été relevés pour un même flux optique de $75^\circ/\text{s}$.

Les signaux issus des 2 ensembles lentille + photorécepteurs ont été normalisés en amplitude en tenant compte de l'ouverture numérique de chaque ensemble.

On peut noter qu'un $\Delta\rho$ plus élevé conduit à une fréquence de coupure spatiale plus basse, ce qui explique pourquoi le signal visuel répond moins finement aux changements de contrastes du motif. Inversement, lorsque $\Delta\rho$ est faible (cas du système optique n°2), la fréquence de coupure spatiale est élevée (Équation IV.11) et les variations d'amplitude observées sur le signal visuel suivent plus fidèlement les changements de contraste du motif.

IV.8.4. Conclusion sur l'analyse des signaux visuels filtrés passe-bande

La mesure DEM n'intervient qu'après détection d'un contraste et le DEM ne détecte un contraste que lorsque le transitoire du signal visuel filtré passe-bande dépasse le seuil de détection. Or, comme nous venons de le voir, l'amplitude de ces transitoires dépend du contraste, du filtrage spatial et de la répartition spatial des contrastes.

Ainsi, on aurait pu penser qu'un contrôle automatique de gain (CAG) puisse maintenir les amplitudes de variations produites par les bords contrastés à un niveau constant indépendamment des diverses fréquences spatiales et des divers contrastes. Lors du travail de thèse de Stéphane Viollet (Viollet 2001), cette fonction CAG (située en étape 6 avant le circuit à seuil) avait permis de maintenir les transitoires à un niveau sensiblement constant indépendamment du contraste du stimulus (cette fonction est réalisée chez la mouche par les neurones de la *lamina*). Ce système s'est avéré particulièrement bien adapté aux signaux périodiques générés par le balayage périodique des photorécepteurs de l'œil présent dans le capteur visuel de position, appelé OSCAR pour « Optical Scanning sensor for the Control Autonomous Robot » (Viollet 2001).

Un tel maintien des transitoires conduirait dans notre application à augmenter le nombre de détections et ainsi la fréquence moyenne de renouvellement de la mesure de flux optique, caractéristique essentielle d'un capteur en vue de réguler sa sortie. Mais le caractère apériodique et la variabilité des niveaux de contrastes présents dans les stimuli optiques naturels n'ont pas permis d'obtenir des résultats probants. Deux problèmes de réglages sont rapidement apparus :

1. le choix d'une constante de temps du CAG des signaux adaptée pour ne pas complètement déformer les signaux et de ne pas amplifier le bruit (compte tenu du caractère apériodique des stimuli visuels),
2. le choix d'un seuil de détection permettant de conserver une détection de qualité (compte tenu de la déformation des signaux, du niveau de bruit et de la variabilité des contrastes).

Une détection de qualité exige un bon rapport signal-sur-bruit et des signaux non déformés.

Ainsi, une augmentation du nombre de détections se ferait en abaissant le seuil de détection et

donc aux dépens de la qualité de l'estimation du flux optique. C'est pourquoi le CAG n'a pas été retenu pour notre application.

Par contre, une fois la détection réalisée, la tension en sortie du DEM ne dépend plus ni de la fréquence spatiale du motif, ni du contraste. Elle ne dépend que du temps écoulé Δt entre les deux détections. Cette invariance vis-à-vis de la fréquence spatiale et du contraste est une différence majeure avec le DEM basé sur le principe du corrélateur (Reichardt et Egelhaaf, 1988).

IV.9. Effet des vibrations sur la mesure DEM

Le flux optique que l'on désire mesurer est celui généré par la locomotion. Mais parfois la locomotion elle-même entraîne des perturbations sur le traitement visuel donc une erreur d'évaluation de la seule vitesse angulaire générée par la locomotion. Dans le cas d'un robot aérien à voilure tournante, les vibrations demeurent la principale source de perturbations (Dunbabin et al. 2004).

Les vibrations (flux optique de rotation) se superposent au flux optique de translation :

$$\omega = \frac{v_x}{h} + \Omega_{Oeil / Robot} \quad \text{Équation IV.16}$$

En modélisant la vibration rétinienne par une fonction sinus de fréquence f_v et d'amplitude A (Équation IV.17), la vitesse angulaire de rotation générée par la vibration est également de fréquence f_v (Équation IV.18).

$$\psi(t) = A \times \sin(2\pi \cdot f_v \cdot t) \quad \text{Équation IV.17}$$

$$\Omega_{Oeil / Robot} = \frac{d\psi(t)}{dt} = A \times 2\pi \times f_v \times \cos(2\pi \cdot f_v \cdot t) \quad \text{Équation IV.18}$$

Pour mieux comprendre les effets des vibrations sur les signaux visuels, nous avons réalisé l'expérience de faire défiler lentement des contrastes à $\omega=20^\circ/s$ sous le DEM de l'aéronef en présence de vibrations à 29Hz apportées par son rotor (Figure IV.30). Nous avons pu ainsi établir que la fréquence de vibration se retrouvait directement dans les signaux visuels et venait perturber la mesure du flux optique. Pour un même contraste, de nombreuses variations apparaissent sur les signaux visuels filtrés passe-bande (Figure IV.30). Or, chacune de ces variations qui dépasse le seuil de détection est susceptible de générer une mesure DEM : de nombreuses détections qui apparaissent ne correspondent à aucun mouvement de contraste. Ainsi, en présence de vibrations, de nombreuses erreurs de correspondance se produisent. Ces

erreurs sont connues pour être la principale source d'erreur d'estimation de flux optique (Pichon 1991). Dans ces conditions, il est impossible au DEM de délivrer une estimation de flux optique de qualité.

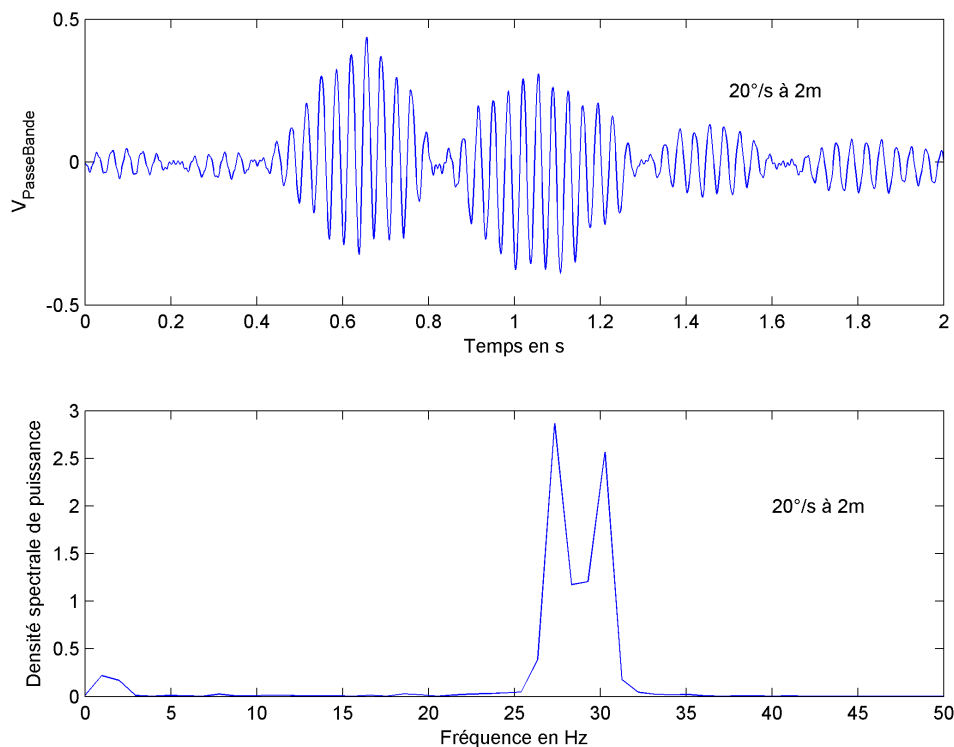


Figure IV.30 Conséquence des vibrations de la voilure tournante sur les signaux visuels

a) Mesure en Volts du signal d'un photorécepteur unique (filtré passe-bande) perturbé par la vibration rétinienne. Le signal visuel dû au mouvement relatif des contrastes est modulé par la vibration rétinienne.
 b) Spectre de fréquence du signal visuel filtré passe-bande. Dans cette expérience, la fréquence des vibrations, f_v , est centrée autour de 29Hz (ce qui correspond à la fréquence de rotation de la voilure tournante), c'est-à-dire tout à fait dans le spectre du signal utile.

Cette simple expérience montre combien il est important de maintenir un regard stable en dépit des vibrations apportées par le mode de propulsion. Une solution biomimétique a été proposée à cette fin, qui réalise un découplage œil/tête (Viollet et Franceschini 2004).

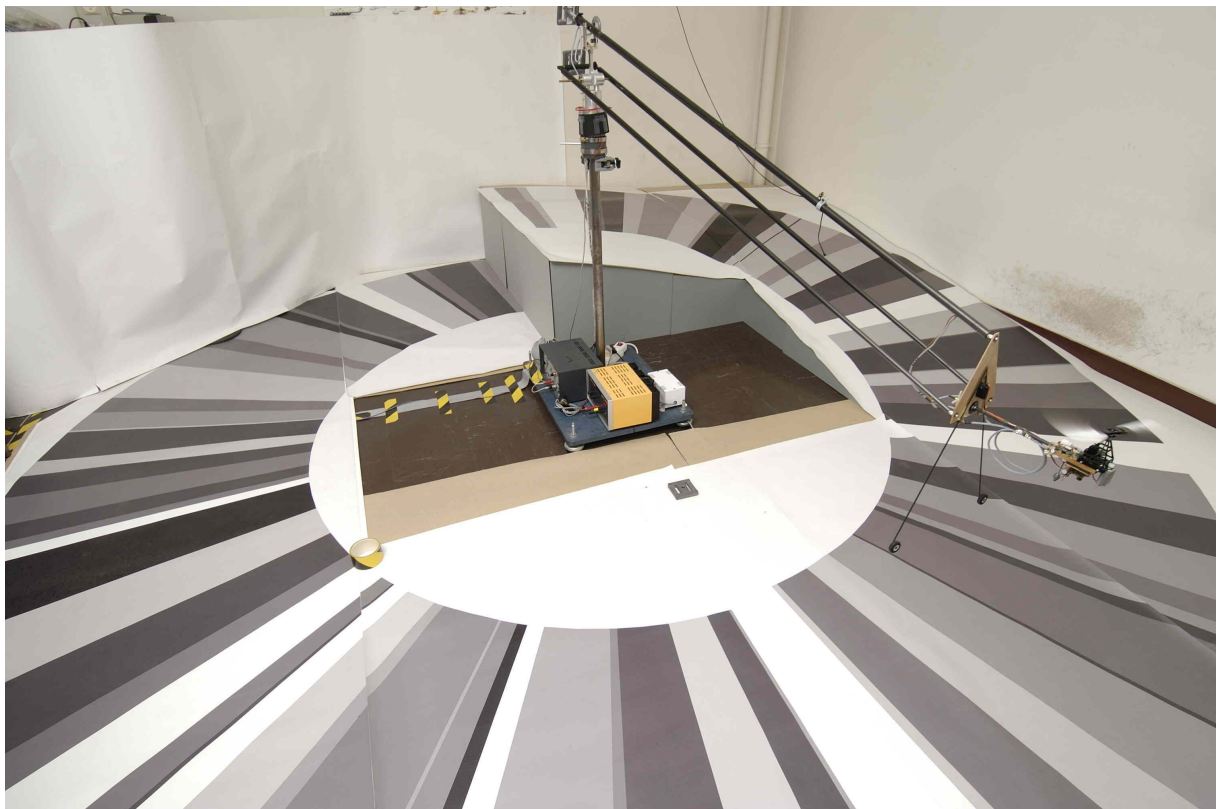
Les insectes en général (et les mouches en particulier) sont également soumis à des perturbations similaires venant de leur propre système propulsif : le battement d'ailes. Il semble que l'amplitude de vibration de la tête de la mouche soit très faible, comparée à la vibration de son corps (van Hateren and Schilstra 1999). Une telle atténuation est probablement due aux 23 paires de muscles découverts dans le cou de la mouche (Strausfeld et al. 1987), qui créent une compensation active très efficace entre le corps et la tête. De plus, en modélisant le système mécanique aile/corps/tête par un filtre passe-bas, on peut en déduire que plus la fréquence de battements des ailes (quelque 180Hz chez la mouche) est élevée, plus les vibrations résultantes seront faibles. La morphologie de la mouche apparaît

remarquablement adaptée aux contraintes inhérentes au traitement visuel. Des mécanismes à la fois actifs et passifs semblent préserver son système visuel des perturbations occasionnées par son ensemble propulsif.

En dépit de ses limites, le DEM permet d'estimer de manière relativement précise la *vitesse angulaire de défilement des contrastes*, c'est à dire précisément la variable que l'on doit réguler dans le pilote automatique OCTAVE. Intéressons-nous maintenant au banc d'essais en vol sur lequel le pilote automatique OCTAVE a pu être testé à bord d'un micro-aéronef.

V. Banc d'essai en vol

V.1. Le micro-aéronef.....	98
V.1.1. Les actionneurs de l'aéronef.....	98
V.1.2. Le capteur de vitesse de rotation du rotor de l'aéronef.....	100
V.2. Le système de commande et de visualisation.....	100
V.2.1. Carte d'entrée/sortie munie d'un DSP et environnement logiciel.....	100
V.2.2. Les capteurs pour la visualisation.....	101
V.2.3. La topologie du câblage et des alimentations du banc d'essai en vol. .	103
V.3. Asservissement de la vitesse de rotation du rotor de l'aéronef. .	104
V.3.1. Identification de la fonction de transfert de vitesse rotor.....	105
V.3.2. Fonction de transfert du capteur de vitesse rotor.....	106
V.3.3. Synthèse du correcteur de vitesse rotor.....	106
V.3.4. Performances de l'asservissement de vitesse rotor.....	107
V.4. Le bras tournant pantographique.....	109
V.4.1. Fonction de transfert d'élévation associée à un aéronef libre à voilure tournante.....	110
V.4.2. Influence des forces d'inertie sur l'aéronef.....	111
V.4.3. Analyse de la stabilité des points d'équilibre de l'aéronef.....	113
V.5. Modélisation par fonction de transfert du système aéronef.....	116
V.5.1. Modélisation et identification du transfert d'élévation.....	116
V.5.2. Modélisation et identification de la fonction de transfert de déplacement	119
V.5.3. Système aéronef simplifié.....	120
V.6. L'environnement (contrastes, relief et vent).....	121
V.6.1. Les contrastes au sol.....	121
V.6.2. Le relief.....	121
V.6.3. Le vent.....	122
V.7. Conclusion sur le banc d'essai en vol.....	122



Pour valider le principe de la boucle OCTAVE, nous avons utilisé un banc d'essai en vol qui réduit le nombre de degrés de liberté, pour diminuer la complexité du système et pour travailler en toute sécurité.

Ce chapitre présente les caractéristiques de ce banc de test (environnement expérimental, mécanique et électronique) et sa modélisation sous forme de fonctions de transfert, tel qu'il sera utilisé pour la mise en œuvre de la boucle visuomotrice.

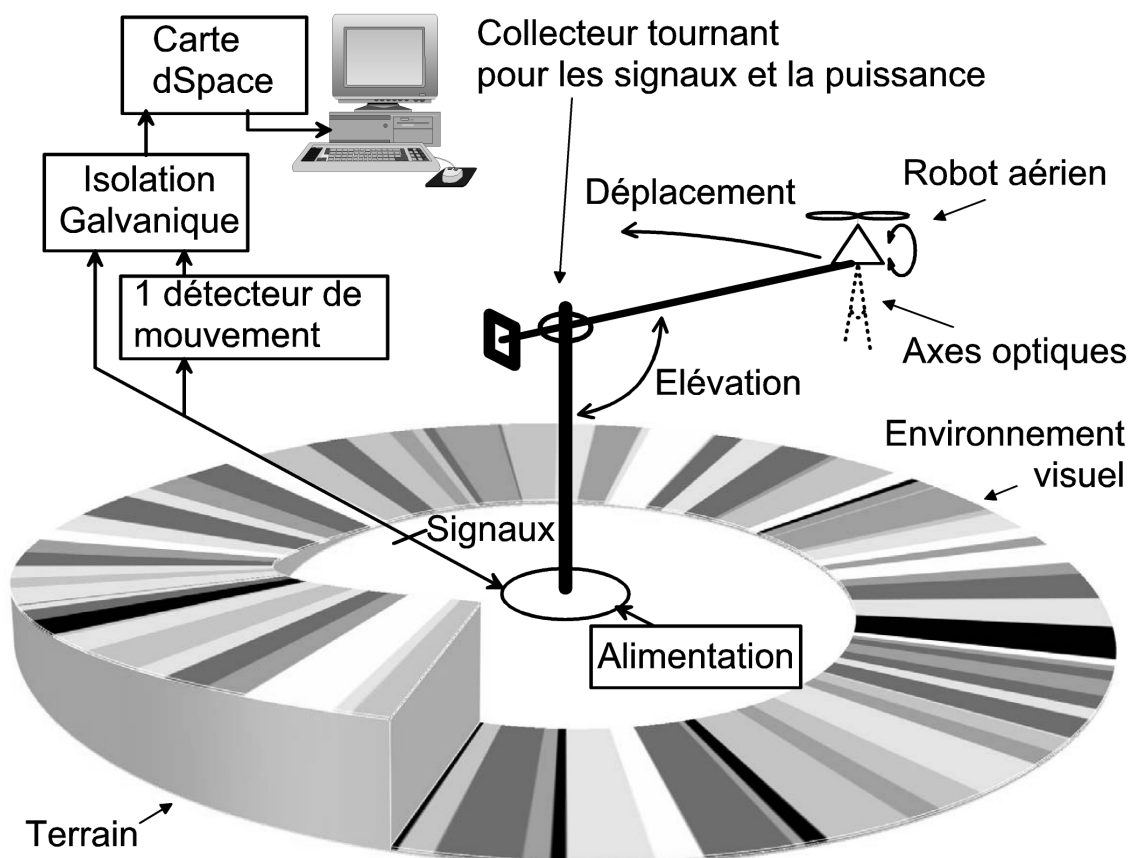


Figure V.1 Le banc d'essai en vol est composé d'un bras tournant pantographique léger (construit en carbone/aramide). Celui-ci supporte le robot, qui survole un disque imprimé plastifié mat (diamètre extérieur de 4,5m), dont les secteurs ont une largeur et un contraste aléatoires.

A l'extrémité du bras, le mini-robot aérien est monté sur l'axe d'un servomoteur dit « de tangage », qui permet à l'expérimentateur de fixer l'angle de tangage donc la valeur finale de la vitesse sol v_x du robot. Le robot présente ainsi un nombre de degrés de liberté délibérément réduit à trois : le déplacement, l'élévation et le tangage (x , z , Θ) (Figure V.1).

Dans un premier temps, un circuit DEM FPAA (cf. chapitre IV) a permis de traiter au sol les signaux visuels captés à bord de l'aéronef. Dans un second temps, le circuit DEM mixte (cf. chapitre IV) a été installé à bord de l'aéronef, au plus près des photorécepteurs.

V.1. Le micro-aéronef

Pour mettre en pratique le principe de guidage par flux optique (décrit au chapitre III), nous avons construit un appareil d'environ 100g comprenant un rotor, une électronique de commande et un œil électronique (Figure V.2). Ce micro-aéronef utilise l'ensemble propulsif (moteur + réducteur) d'un petit hélicoptère radio-commandé d'origine japonaise (Keyence). Pour faciliter l'expérimentation, nous avons ajouté un train d'atterrissage dont les roues se situent à une distance $l=0.30\text{m}$ au-dessous de l'œil. Les altitudes portées sur les trajectoires, notamment celles du chapitre VII, correspondent à $z-l$, c'est-à-dire à l'altitude du train d'atterrissage.

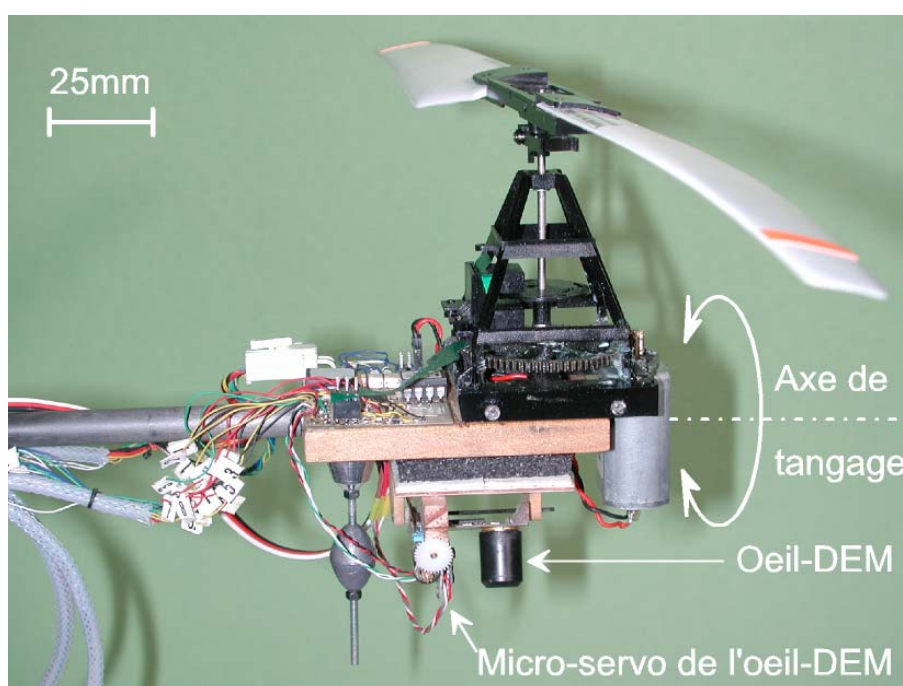


Figure V.2 La vitesse de rotation du rotor est mesurée par un capteur optronique de bord et asservie au sol. Un micro-servo (masse : 2,5 grammes) réalise automatiquement une contre-rotation de l'œil qui contrebalance le tangage imposé à l'appareil, de sorte que l'axe de visée moyen de l'œil est maintenu autour de la verticale ($\Phi = 90^\circ$).

V.1.1. Les actionneurs de l'aéronef

- Le groupe de propulsion produit la poussée de l'aéronef. La poussée F_N dépend directement, et de façon monotone et croissante, de la vitesse de rotation du rotor :

$$F_N = \frac{1}{2} \rho \cdot C_N \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot R \cdot N_{Rotor} \right)^2 \quad \text{Équation V.1}$$

Avec : ρ , masse volumique de l'air ; C_N , coefficient de portance ; R , rayon du rotor et N_{Rotor} , vitesse de rotation du rotor.

Ainsi, couplé à une commande de tangage, ce groupe de propulsion assure à la fois la sustentation et la propulsion en avant de l'aéronef.

Cet ensemble est composé de:

- i. Un rotor bipale de 5 grammes,
- ii. Un réducteur 15:1,
- iii. Un moteur DC Mabuchi dont nous commandons la vitesse de rotation en Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI) et dont les caractéristiques sont les suivantes :

Masse du <i>moteur</i>	32 g
Consommation maximale du <i>moteur</i> (moteur bloqué)	2,2 A
Tension d'alimentation du <i>moteur</i>	7,2 V
Dimensions du <i>moteur</i>	35 × 20 × 15 mm
Type de signal de commande du <i>moteur</i>	Variation de largeur d'impulsions à 6,26 KHz
Diamètre de l' <i>hélice</i>	30cm
Masse du <i>groupe de propulsion</i> avec son support et le réducteur	50 g
Consommation nominale du <i>groupe de propulsion</i> en charge	1,5A

Tableau V.1 Caractéristiques du groupe de propulsion produisant la poussée de l'aéronef

- Un servomoteur installé au bout du bras pantographique commande le tangage de l'aéronef. Ses caractéristiques sont les suivantes :

Masse	18 g
Consommation maximale / moteur bloqué	500 mA
Tension d'alimentation	5 V
Dimensions	28 × 13 × 30 mm
Temps de montée pour 10°	0,04 s
Couple de sortie	0,31 N.m
Type de signal de commande	Variation de largeur d'impulsions entre 1 et 2ms à 50Hz

Tableau V.2 Caractéristiques du Servo-moteur DS361 Graupner commandant le tangage de l'aéronef

- Un micro-servomoteur linéaire monté à bord du robot actionne l'orientation de l'œil de manière à maintenir verticale sa ligne de visée moyenne quel que soit le tangage imposé à l'appareil :

Masse	2,4 g
Consommation maximale	100 mA
Tension d'alimentation	5 V
Dimensions	21 × 13 × 9 mm
Temps de montée pour la pleine course	0,2 s
Force de sortie	1,75 N
Type de signal de commande	Variation de largeur d'impulsions entre 1 et 2ms à 50Hz

Tableau V.3 Caractéristiques du Servo-moteur (WES-Technik) commandant la contre-rotation de l'œil pour maintenir sa direction de visée verticale vers le bas.

V.1.2. Le capteur de vitesse de rotation du rotor de l'aéronef

Le seul capteur proprioceptif de l'aéronef (c'est-à-dire sensible à une variable égo-centrée), en plus du DEM, est un capteur de vitesse de rotation du rotor (appelée *vitesse rotor*).

Un capteur optique à fourche délivre un signal dont la fréquence est égale au quadruple de la fréquence de rotation de l'hélice, grâce à quatre fentes présentes sur un disque monté sur l'axe rotor. Le signal de fréquence délivré par le capteur optique est traité par la carte d'entrées/sorties afin de fournir un signal continu en tours par minute.

V.2. Le système de commande et de visualisation

Un ordinateur muni d'une carte DSP à Entrées/Sorties analogiques et numériques (dSpace), couplée au logiciel Matlab/Simulink, permet de commander la vitesse rotor, l'angle de tangage de l'aéronef et l'axe de visée du DEM.

V.2.1. Carte d'entrée/sortie munie d'un DSP et environnement logiciel

Pour ajouter un degré de flexibilité supplémentaire au niveau de la mise en œuvre des lois de commande, nous avons choisi l'architecture dSpace. Cette architecture s'appuie, au niveau matériel, sur une carte PCI à base de processeur DSP qui vient s'insérer dans un PC (Figure V.3). Au niveau logiciel, cet outil s'intègre parfaitement dans l'environnement Matlab/Simulink car il permet de tester directement, dans une boucle réelle, un schéma de

commande conçu sous Simulink. De plus, il est possible de changer à la volée tous les paramètres du correcteur en ligne afin d'ajuster finement les performances de la boucle fermée.

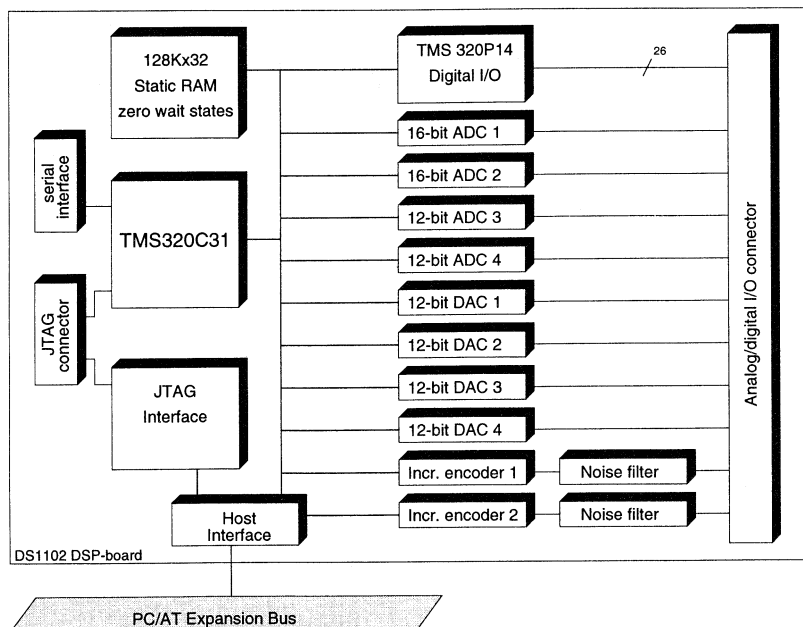


Figure V.3 Synoptique de la carte d'entrée-sortie dSpace DS1102

Le cœur de cette carte est un processeur spécialisé en traitement du signal (DSP) TMS320C31 de chez Texas. Un second DSP (TMS 320P14) est positionné en esclave du premier DSP maître.

Cette carte est pourvue d'une interface analogique (4 Convertisseur Numérique-Analogique « DAC » et 4 Convertisseur Analogique-Numérique « ADC ») et d'une interface série (« serial interface »), de ports « capture » et de « Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI) » présents dans le DSP esclave.

V.2.2. Les capteurs pour la visualisation

Pendant les expérimentations, de nombreux paramètres sont visualisés en temps réel sur l'ordinateur : en premier lieu, la vitesse de rotation du rotor et la sortie du DEM, puis d'autres variables nécessaires à l'évaluation des performances de l'aéronef, telles que l'élévation et la position azimutale.

Capteur d'élévation

Une mesure d'altitude est disponible grâce à un micro-potentiomètre de type servo (Figure V.4), à très faible couple (0,5g.cm) monté sur le pôle central. Un engrenage multiplicateur accroît par un facteur 3 la rotation de potentiomètre par rapport à la rotation du bras (dont le débattement en élévation est limité $-40^\circ < \theta < 70^\circ$). Ce potentiomètre est alimenté en 0-5V.

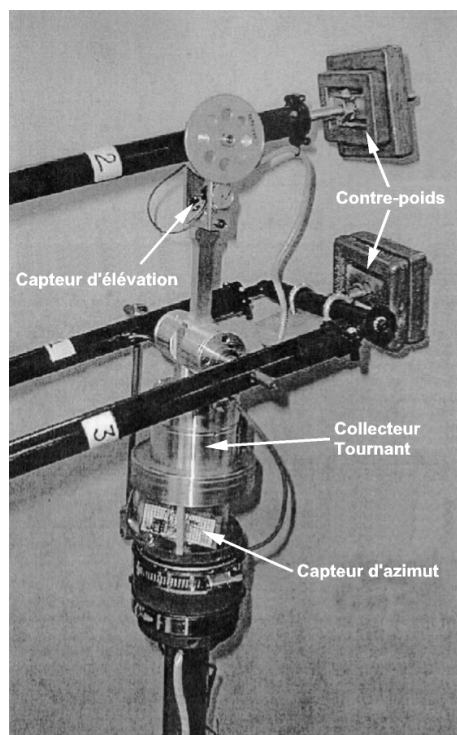


Figure V.4 Instrumentation du bras tournant au niveau de son axe de rotation
(Netter 2000)

Capteur d'azimut

La mesure de la vitesse azimutale de l'aéronef est réalisée à l'aide d'un codeur optique incrémental (de 500 traits/tours) positionné au niveau de la liaison pivot permettant la rotation du bras (Figure V.4). Une seconde piste présentant 1 trait/tour donne une référence d'orientation azimutale et permet de déclencher un compteur dont la sortie donnera la position azimutale de l'aéronef sur chaque tour.

Accéléromètres

Deux accéléromètres (un vertical et l'autre tangential) mesurent l'angle de tangage du robot ainsi que les vibrations auxquelles il est soumis. Leurs caractéristiques sont les suivantes :

Accéléromètre vertical CC5V1G de VTI HAMLIN	
Masse	<1 gramme
Consommation	2 mA
Tension d'alimentation	5V
Dimensions	12,7 × 6,4 × 12,7 mm
Sensibilité	750 mV / m.s ⁻²
Bande passante	115 Hz
Gamme de mesure	±3g
Décalage sur la mesure en sortie	+1g ≡ 2,5V
Signal de sortie	Analogique 0-5V

Tableau V.4 Caractéristiques de l'accéléromètre vertical

Accéléromètre tangentiel C21H1G de VTI HAMLIN	
Masse	<1 gramme
Consommation	2 mA
Tension d'alimentation	5V
Dimensions	9 × 5 × 11 mm
Sensibilité	2000 mV / m.s ⁻²
Bande passante	50 Hz
Gamme de mesure	±1g
Décalage sur la mesure en sortie	0g ≡ 2,5V
Signal de sortie	Analogique 0-5V

Tableau V.5 Caractéristiques de l'accéléromètre tangentiel

V.2.3. La topologie du câblage et des alimentations du banc d'essai en vol

Un collecteur tournant à 45 contacts et à faibles frottements permet d'acheminer par des liaisons filaires les signaux sensoriels issus de l'aéronef, de même que les signaux moteurs et la puissance qui leur sont destinés. La taille du banc de test (4,5m de diamètre extérieur) implique un câblage de longueur importante. Par exemple, la longueur des fils entre la carte d'isolation (côté PC/dSpace) et l'aéronef est de 5 mètres (Figure V.5). Une telle longueur de fils peut poser des problèmes d'atténuation des signaux. C'est pourquoi nous avons privilégié les signaux tout ou rien (MLI, par exemple).

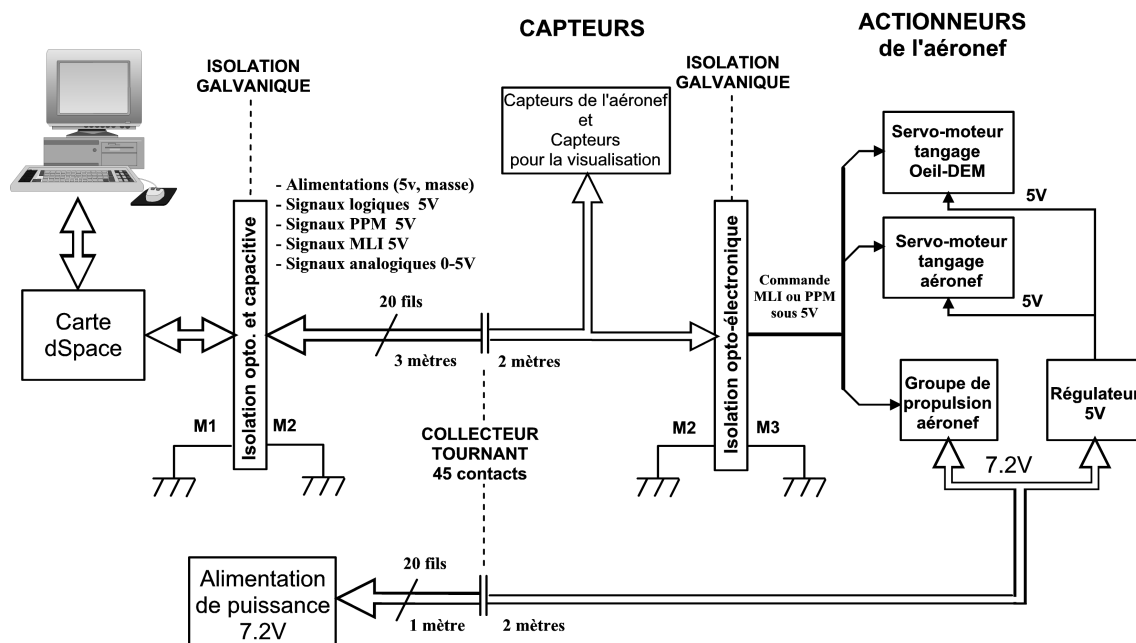


Figure V.5 Le banc de test ne compte pas moins de trois alimentations primaires (alimentation PC/dSpace, alimentation Capteurs, alimentation de puissance Actionneurs) et 2 isolations galvaniques, l'une pour protéger la carte dSpace des chocs électriques, l'autre pour éliminer le bruit de ligne sur les signaux capteurs produit par l'alimentation de puissance. Un collecteur tournant miniature à 45 pistes, à faible frottement et faible inertie, permet d'acheminer les signaux et la puissance jusqu'au bras tout en permettant sa libre rotation.

Afin de limiter les bruits de lignes générés par les actionneurs sur les capteurs, trois alimentations distinctes sont utilisées :

1. L'alimentation du PC et de la carte d'entrées/sorties dSpace,
2. L'alimentation capteur (0-5V),
3. Une alimentation de puissance (0-7,2V) destinée aux actionneurs. Les deux servo-moteurs sont alimentés via un régulateur (0-5V) pour adapter leur tension d'alimentation et pour limiter sur leur alimentation les perturbations émises par le groupe de propulsion de l'aéronef.

Pour séparer ces 3 alimentations, deux isolations galvaniques sont utilisées:

1. Carte d'isolation galvanique pour protéger la carte dSpace d'éventuels chocs électriques pendant l'expérimentation (réalisée pendant le stage IUP de Mathieu RIGAL 2001),
2. Une isolation optoélectronique des signaux de commande des actionneurs pour éliminer le bruit de ligne provenant de la puissance.

V.3. Asservissement de la vitesse de rotation du rotor de l'aéronef

L'aéronef est équipé d'un rotor de masse -donc d'inertie- si faible que nous pouvons commander sa poussée en agissant simplement sur la vitesse de rotation (appelé *vitesse rotor*), exprimée en tours par minutes [tpm]. C'est là une solution bon marché qui permet de s'affranchir de la complexité plus grande d'un rotor à pas variable tel que celui équipant les hélicoptères classiques (dit « grandeur ») ou les modèles réduits habituels. Nous avons donc mis en place une boucle locale d'asservissement de la vitesse de rotation du rotor.

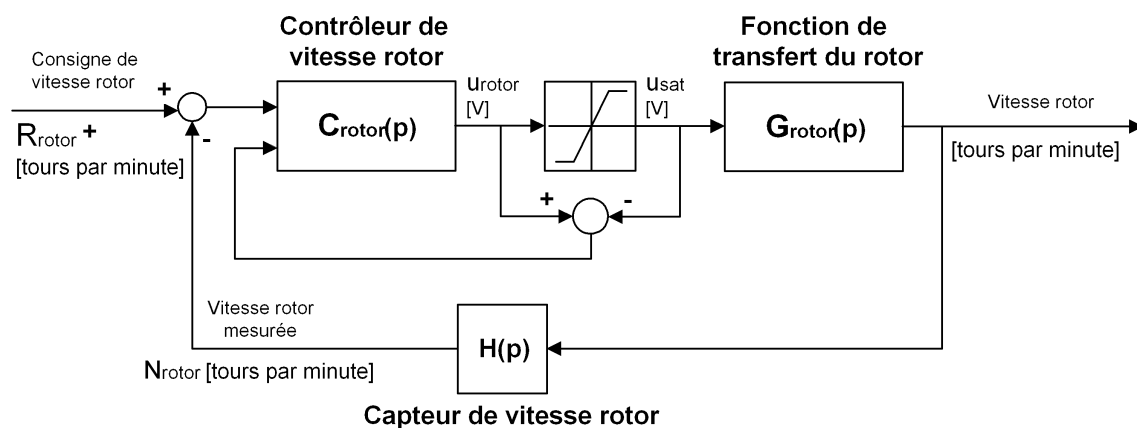


Figure V.6 Schéma bloc de la boucle d'asservissement de la vitesse rotor, avec son *antiwindup*

L'avantage de ce bouclage interne est de rejeter les perturbations multiples susceptibles d'affecter la vitesse rotor :

- variation de la tension d'alimentation (perturbation interne),
- variation de caractéristique du moteur due à la température (perturbation interne),
- perturbations aérodynamiques produites au niveau du rotor (perturbation de sortie).

La mise en œuvre de boucle d'asservissement de vitesse exige l'identification, au préalable, des caractéristiques dynamiques du rotor.

V.3.1. Identification de la fonction de transfert de vitesse rotor

La figure V.7 montre une série d'échelons appliqués sur la commande du rotor, autour d'un point de fonctionnement, afin d'obtenir un modèle du transfert rotor.

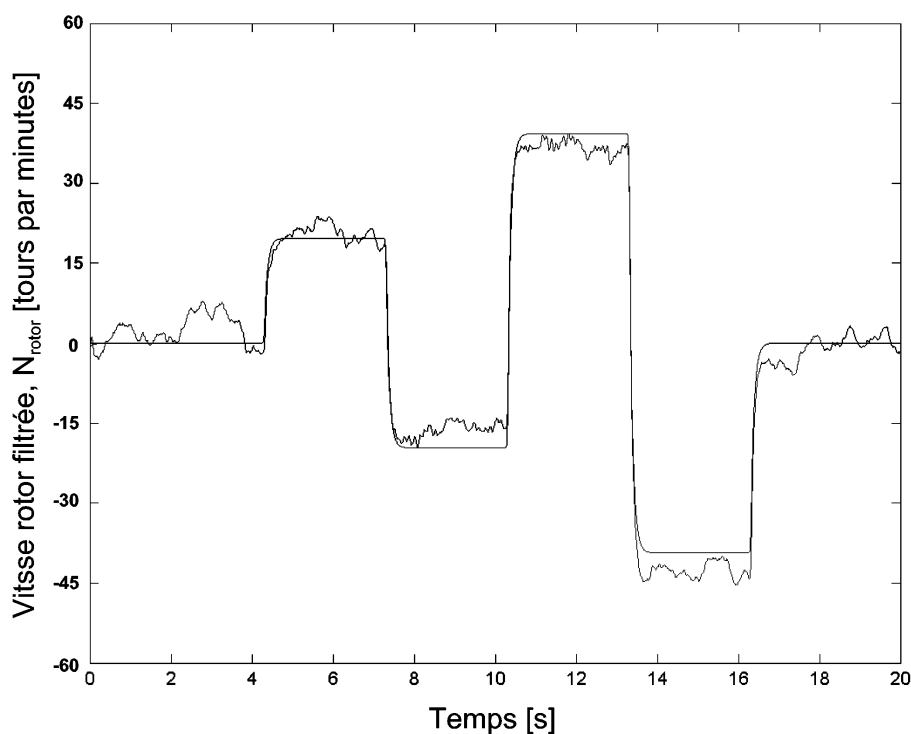


Figure V.7 Comparaison entre la vitesse de rotation rotor du système à identifier et celle de son modèle (la fonction de transfert $G_{\text{rotor}}(p)$).

On remarque que, malgré la faible amplitude des échelons, le système se distingue par une variation du *gain statique*. En effet, l'erreur objet-modèle change de signe selon que l'on se trouve d'un côté ou de l'autre du point de fonctionnement.

Après la collecte des données, nous filtrons de façon parallèle, à l'aide d'un filtre de Butterworth du 4^{ème} ordre (pulsation de coupure égale à 100rad/s), à la fois la commande U_{rotor} et la sortie N_{rotor} pour atténuer le bruit capteur et pour faciliter l'étape d'identification. Puis, à partir des réponses indicielles de la Figure V.7, on identifie la dynamique de transfert du rotor, $G_{\text{rotor}}(p)$, à une fonction de transfert du premier ordre car la réponse à un échelon présente une

tangente à l'origine verticale et son régime est apériodique :

$$G_{rotor}(p) = \frac{K_{rotor}}{\tau_{rotor}p + 1} \quad \text{Équation V.2}$$

$$K_{rotor} = 217 [\text{tours par minute/V}], \tau_{rotor} = 0.077 [\text{s}]$$

Cette identification a été réalisée à l'aide de la boîte à outils *identification* de MATLAB, en utilisant une méthode fondée sur l'erreur de prédiction. Nous avons constaté que les variations paramétriques de gain et de constante de temps étaient de l'ordre de $\pm 20\%$ dans la gamme de fonctionnement du rotor. Par contre, à très bas régime, le gain et la constante de temps sont doublés.

V.3.2. Fonction de transfert du capteur de vitesse rotor

La fonction de transfert $H_{rotor}(p)$ du capteur de vitesse rotor est la suivante :

$$H_{rotor}(p) = 1 \quad \text{Équation V.3}$$

Le capteur de vitesse rotor (paragraphe V.1.2) peut mesurer des vitesses rotor jusqu'à 150 000 tours par minute, et il ne présente aucune limitation dans le domaine de vitesses utilisées (entre 0 et 3000 tours par minute). Par contre, la mesure est relativement bruitée et les courbes montrées à la figure V.7 ont subi un filtrage passe-bas comme indiqué ci-dessus.

V.3.3. Synthèse du correcteur de vitesse rotor

Pour asservir la vitesse du rotor, nous avons choisi un correcteur $C_{rotor}(p)$ de type PID filtré.

Nous avons réglé ce correcteur en répartissant les différents effets (proportionnel, intégral et dérivateur). L'action intégrale permet de rendre l'erreur statique nulle. L'action dérivée augmente les performances du système en diminuant notamment le temps de montée. Le filtre passe-bas additionnel permet de faire en sorte que le bruit ne se répercute pas sur la commande (le capteur délivrant un signal relativement bruité).

$$C_{rotor}(p) = K_{rotor} \left(\frac{1 + \tau_i p}{\tau_i p} \right) \left(\frac{1 + \tau_1 p}{1 + \tau_2 p} \right) \left(\frac{1}{1 + \tau_f p} \right) \quad \text{Équation V.4}$$

avec $K_{rotor} = 0,0054 [\text{V/tours par minute}]; \tau_i = 0,0255 [\text{s}];$
 $\tau_1 = 0,0666 [\text{s}]; \tau_2 = 0,0222 [\text{s}]; \tau_f = 0,01 [\text{s}]$

En pratique, l'action intégrale est mise en parallèle du reste du correcteur afin d'ajouter une action classique à désaturation d'actionneur (*anti-windup*) (Peng et al. 1996). Ainsi, les

échelons de grande amplitude, comme ceux qui se produisent, par exemple, à la mise en route du rotor, n'augmentent pas l'action intégrale de façon disproportionnée et ne tendent pas à déstabiliser le système bouclé.

Le terme à avance de phase remonte la phase à la fréquence $\omega_U=40\text{rad/s}$ (correspondant au gain unitaire), soit $6,36\text{Hz}$ (Figure V.8). Dans ce correcteur, la marge de phase est importante (75°) afin de ne pas déstabiliser la système à bas régime, régime auquel le gain et la constante de temps du système sont à peu près doublés

Ce correcteur est mis en œuvre sur la carte E/S dSpace.

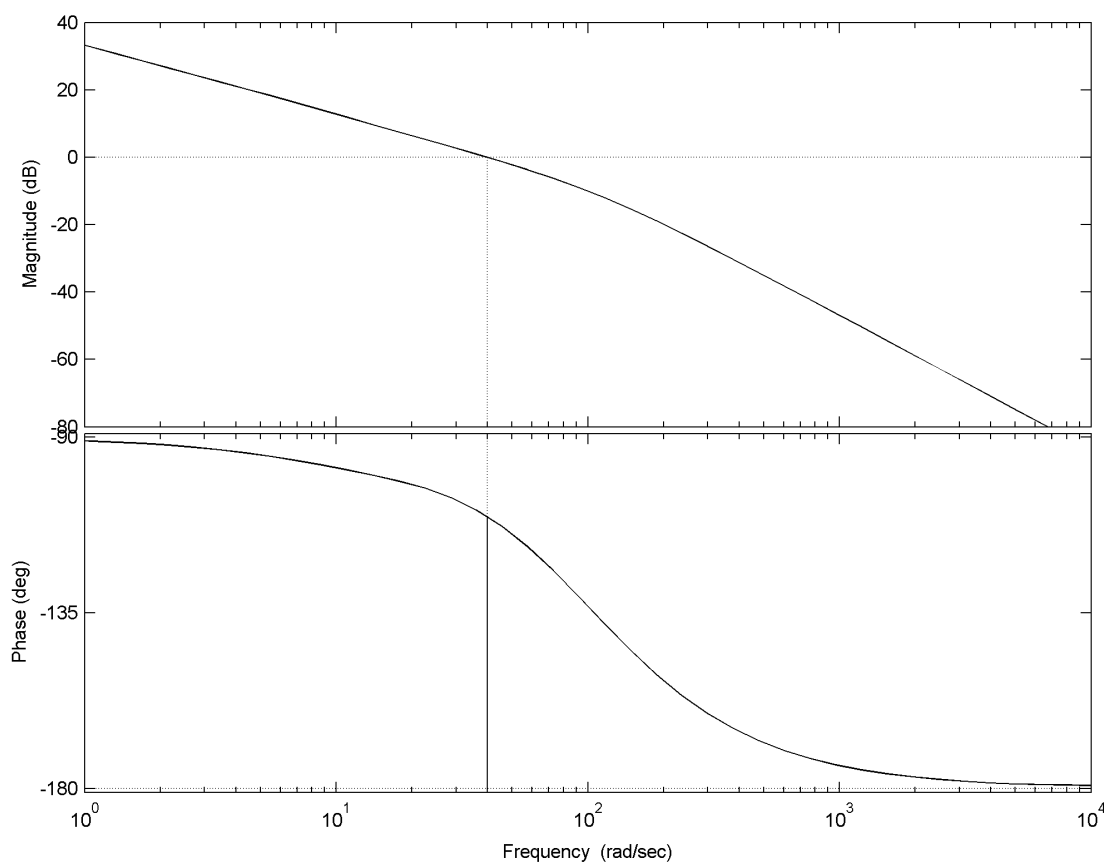


Figure V.8 Diagramme de Bode du transfert de la boucle de l'asservissement de vitesse rotor $H_{\text{rotor}} \times C_{\text{rotor}} \times G_{\text{rotor}}$ (cf. Figure V.6).

V.3.4. Performances de l'asservissement de vitesse rotor

Nous testons les performances du correcteur en appliquant des échelons de consigne de vitesse rotor d'amplitude importante. Ces amplitudes permettent de tester l'asservissement de part et d'autre du point de fonctionnement.

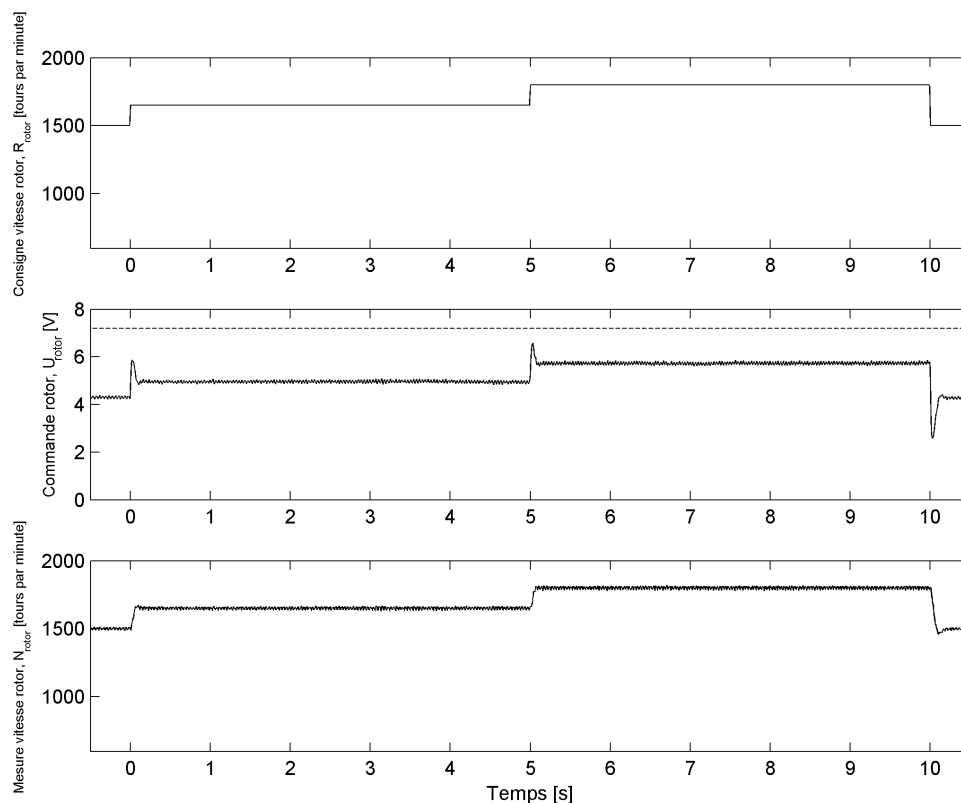


Figure V.9 Tests de l'asservissement de vitesse rotor pour des échelons de consigne d'amplitude importante de 150 tours par minutes appliqués autour du point de fonctionnement (1500 tpm) aux instants $t=0$ s; $t=5$ s et $t=10$ s.

La réponse du rotor (Figure V.9) à des échelons de consigne est satisfaisante car le dépassement maximum reste de l'ordre de 10% en dépit des variations paramétriques.

Le temps de montée lors d'un échelon de consigne est de 50ms, ce qui, comme nous le verrons, est très faible comparativement à la dynamique d'élévation (cf. paragraphe V.5.1).

La commande rotor U_{rotor} ne présente ni d'importants niveaux de tensions ni de rebonds, qui pourraient générer de forts appels de courant susceptibles d'endommager le moteur et l'ensemble propulsif.

Enfin, on constate que le niveau de bruit de la mesure n'est pas amplifié par le bouclage.

V.4. Le bras tournant pantographique

L'aéronef est installé à l'extrémité d'un système de 3 bras tournants pantographiques (Netter et Franceschini, 1999) en fibres de carbone et aramide. Pour diminuer l'inertie ramenée de ce support, nous avons réduit la masse des bras par rapport à la version précédente, qui accueillait un aéronef beaucoup plus lourd.

On équilibre d'abord ce système pantographique, avant d'installer l'aéronef à son extrémité, par 2 contrepoids de 1kg chacun (placés à ~ 15 cm de l'axe) (Figure V.10). Le système pantographique permet au robot captif de rester verrouillé en roulis quelle que soit son altitude (Figure V.10).

Ainsi, le robot évolue à la surface d'une portion de sphère de centre O. Pour simplifier la lecture des résultats, les coordonnées de l'aéronef sont projetées sur un cylindre dont l'axe est confondu avec celui du poteau central du banc de test -la droite (OH)-. C'est ce cylindre que l'on développe pour représenter les trajectoires de l'aéronef dans un plan vertical ($\bar{x}$, $\bar{y}$) notamment au chapitre VII.

Le robot parcourt, à chaque tour, une distance horizontale moyenne de 12 mètres (voir traits pointillés épais de la Figure V.16).

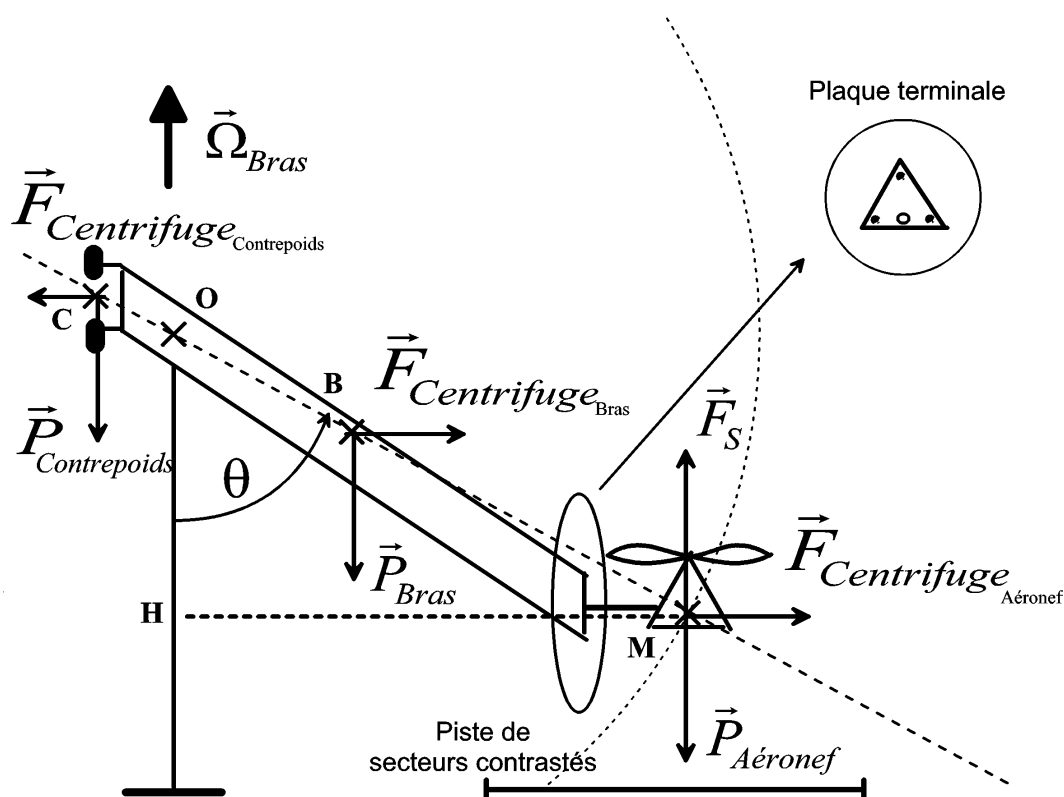


Figure V.10 Synoptique du bras tournant

Dans un premier temps, nous établirons la fonction de transfert d'élévation d'un aéronef non captif (paragraphe V.4.1). Dans un second temps, nous mettrons en évidence l'influence de la contention sur cette fonction de transfert, qui fait apparaître des forces d'inertie additionnelles (paragraphe V.4.2) ainsi que des positions d'équilibres instables (paragraphe V.4.3). Puis nous conclurons sur l'intérêt d'utiliser un bras tournant pour notre application.

V.4.1. Fonction de transfert d'élévation associée à un aéronef libre à voilure tournante

Rappelons ici que les forces associées à un aéronef libre à voilure tournante selon $\vec{z}$ (cf. chapitre III) sont:

1. La force de sustentation $\vec{F}_S$ dont l'amplitude est à peu près égale, pour de faibles angles de tangage, à l'amplitude de la poussée F_N (cf. paragraphe III.7.1 et équation III.10), la poussée dépendant elle-même directement de la vitesse de rotation du rotor (cf. Équation V.1),
2. Son poids $\vec{P}_{aéronef}$,
3. La force $\vec{f}_v$, liée aux frottements visqueux selon $\vec{z}$.

Appliquons le théorème de la résultante dynamique en projection sur $\vec{z}$.

$$m_{Aéronef} \frac{d^2 z}{dt^2} + f_v \frac{dz}{dt} = F_N + P_{Aéronef}$$

$$d'où \quad \frac{\Delta z}{\Delta F_N} = \frac{\frac{1}{f_v}}{p \left(1 + \frac{m_{Aéronef}}{f_v} p \right)} \quad \text{Équation V.5}$$

Ainsi, dans le cas d'un *aéronef libre*, la fonction de transfert en élévation (issue d'une modélisation physique) fait apparaître un terme intégral (1/p). En réponse à un échelon de poussée, ce système divergerait : la valeur finale de l'altitude serait infinie. Nous allons voir maintenant que la fonction de transfert du même aéronef fixé à l'extrémité du bras précédemment décrit est de forme légèrement différente, et qu'en particulier ce terme intégrateur disparaît.

V.4.2. Influence des forces d'inertie sur l'aéronef

Couple gyroscopique

Tout d'abord on peut écarter toute perturbation sur le système liée au couple gyroscopique. Les axes de rotation du rotor et du bras étant presque coaxiaux (l'angle de tangage reste inférieur à 10°), ce couple peut être considéré comme nul.

Force centrifuge

Contrairement au cas d'un aéronef libre, la rotation du bras tournant supportant l'aéronef introduit des forces d'inertie, en particulier des forces centrifuges que l'on peut décomposer en trois forces :

1. $\vec{F}_{Centrifuge\ Aéronef}$, Force centrifuge liée à la masse de l'aéronef, que l'on peut considérer comme étant appliquée en son centre de gravité (point M),
2. $\vec{F}_{Centrifuge\ Bras}$, Force centrifuge liée à la masse des bras, que l'on peut considérer pour simplifier comme étant appliquée au point B (on approxime OB à un tiers de la longueur du bras soit OB=0,6m, cf. Figure V.10),
3. $\vec{F}_{Centrifuge\ Contrepoids}$, Force centrifuge liée aux contrepoids du bras pantographique appliquée au point C (OC=0,15m soit un douzième de longueur du bras, cf. Figure V.10),

Soit l'expression des forces centrifuges :

$$\begin{aligned} F_{Centrifuge\ Aéronef} &= m_{Aéronef} \cdot OM \cdot \sin \theta \cdot \Omega_{Bras}^2 \\ F_{Centrifuge\ Bras} &= m_{Bras} \cdot OB \cdot \sin \theta \cdot \Omega_{Bras}^2 \\ F_{Centrifuge\ Contrepoids} &= m_{Contrepoids} \cdot OC \cdot \sin \theta \cdot \Omega_{Bras}^2 \end{aligned} \quad \text{Équation V.6}$$

Sur la Figure V.10, le système mécanique isolé (soit l'ensemble {aéronef, bras, contrepoids}) subit les moments des forces centrifuges. Ces moments s'ajoutent de façon à ramener l'ensemble mécanique à l'horizontale.

Soit la somme des moments produits par les forces centrifuges :

$$\begin{aligned} M_{\Sigma \vec{F}_{Centrifuge}} &= M_{\vec{F}_{Centrifuge\ Aéronef}} + M_{\vec{F}_{Centrifuge\ Bras}} + M_{\vec{F}_{Centrifuge\ Contrepoids}} \\ \text{avec } OM &= 1,8m ; OC = 0,15m = \frac{OM}{12} \text{ et } OB = 0,6m = \frac{OM}{3} \\ M_{\Sigma \vec{F}_{Centrifuge}} &= \left(F_{Centrifuge\ Aéronef} + \frac{1}{3} F_{Centrifuge\ Bras} + \frac{1}{12} F_{Centrifuge\ Contrepoids} \right) \cdot OM \cdot \cos \theta \end{aligned} \quad \text{Équation V.7}$$

Le bras étant équilibré en statique par les contrepoids, les moments dus au poids du bras et au poids des contrepoids sont opposés. Les produits de leur masse par leur distance au centre O sont donc égaux :

$$\begin{aligned}
 m_{Bras} \cdot OB &= m_{Contrepoids} \cdot OC \\
 \Leftrightarrow \frac{1}{3} m_{Bras} &= \frac{1}{12} m_{Contrepoids}
 \end{aligned}
 \tag{Équation V.8}$$

Bornons la somme des moments créée par les 3 forces centrifuges :

$$avec HM \leq OM \tag{Équation V.9}$$

$$M_{\Sigma \vec{F}_{Centrifuge}} \leq \left(m_{Aéronef} + \left(\left(\frac{1}{3} + \frac{1}{12} \right) \cdot \frac{1}{12} \cdot m_{Contrepoids} \right) \right) \cdot \Omega_{Bras}^2 \cdot OM^2 \cdot \frac{\sin 2\theta}{2}$$

Ainsi, le moment produit par la force centrifuge est maximum pour $\theta = \pi/4$.

Enfin, calculons la somme des moments pour $v_x = 1,5 \text{ m/s}$ et $\theta = \pi/4$:

$$\begin{aligned}
 avec \Omega_{Bras} &= \frac{2\pi \times v_x}{12} \text{ rad / s}; OM = 1,8 \text{ m}; m_{Aéronef} = 0,1 \text{ kg}; m_{Contrepoids} = 2 \text{ kg} \\
 M_{\Sigma \vec{F}_{Centrifuge}} \Big|_{\theta = \frac{\pi}{4}} &= 0,16 \text{ N.m}
 \end{aligned}
 \tag{Équation V.10}$$

Calculons le moment produit par le poids de l'aéronef à $\theta = \pi/4$:

$$\begin{aligned}
 M_{P_{Aéronef}} &= m_{Aéronef} \cdot g \cdot \sin \theta \cdot OM \\
 M_{P_{Aéronef}} \Big|_{\theta = \frac{\pi}{4}} &= 1,26 \text{ N.m}
 \end{aligned}
 \tag{Équation V.11}$$

Comparons le moment produit par la force centrifuge au moment produit par le poids de l'aéronef :

$$\frac{M_{\Sigma \vec{F}_{Centrifuge}}}{M_{\vec{P}_{Aéronef}}} \Big|_{\theta = \frac{\pi}{4} \text{ et } v_x = 1,5 \text{ m/s}} \leq 0,13
 \tag{Équation V.12}$$

On peut donc dire que, lorsque la vitesse reste de l'ordre de 1,5 m/s par seconde, l'effet des forces centrifuges peut être négligé : il reste inférieur à 13% des moments produits par le poids et la poussée de l'aéronef (Équation V.12). Par contre, il devient de plus en plus important lorsque croît la vitesse de l'aéronef. Ainsi, lorsque le bras tourne à plusieurs mètres par seconde, l'aéronef subit une importante perturbation due aux forces centrifuges.

Le moment qui naît ainsi tend à ramener le bras pantographique à l'horizontale.

Étudions maintenant la stabilité des points d'équilibre pour en déduire la forme de la dynamique de l'élévation lorsque la vitesse de rotation du bras est nulle, pour la comparer à celle de l'aéronef libre.

V.4.3. Analyse de la stabilité des points d'équilibre de l'aéronef

On assimile le problème de stabilité des points d'équilibre du bras tournant au problème de la balance romaine. Cette démonstration souligne l'influence de l'instabilité des points d'équilibre sur la dynamique d'élévation.

Pour mettre en évidence les phénomènes mis en jeu, il est nécessaire de simplifier le système.

1. On analyse le mouvement dans le plan $(\vec{y}_0, \vec{z}_0)$ avec $\Omega_{\text{Bras}}=0$ (ainsi nous négligeons l'influence des forces centrifuges),
2. On améliore la compréhension du problème en notant :

$$m_1 = m_{\text{Contrepoids}} ; l_1 = OC$$

$$m_2 = \frac{m_{\text{Bras}} \times OB}{OM} ; l_2 = OM$$

Ainsi, on analyse un système de masses ramenées de part et d'autre du point pivot O (Figure V.11).

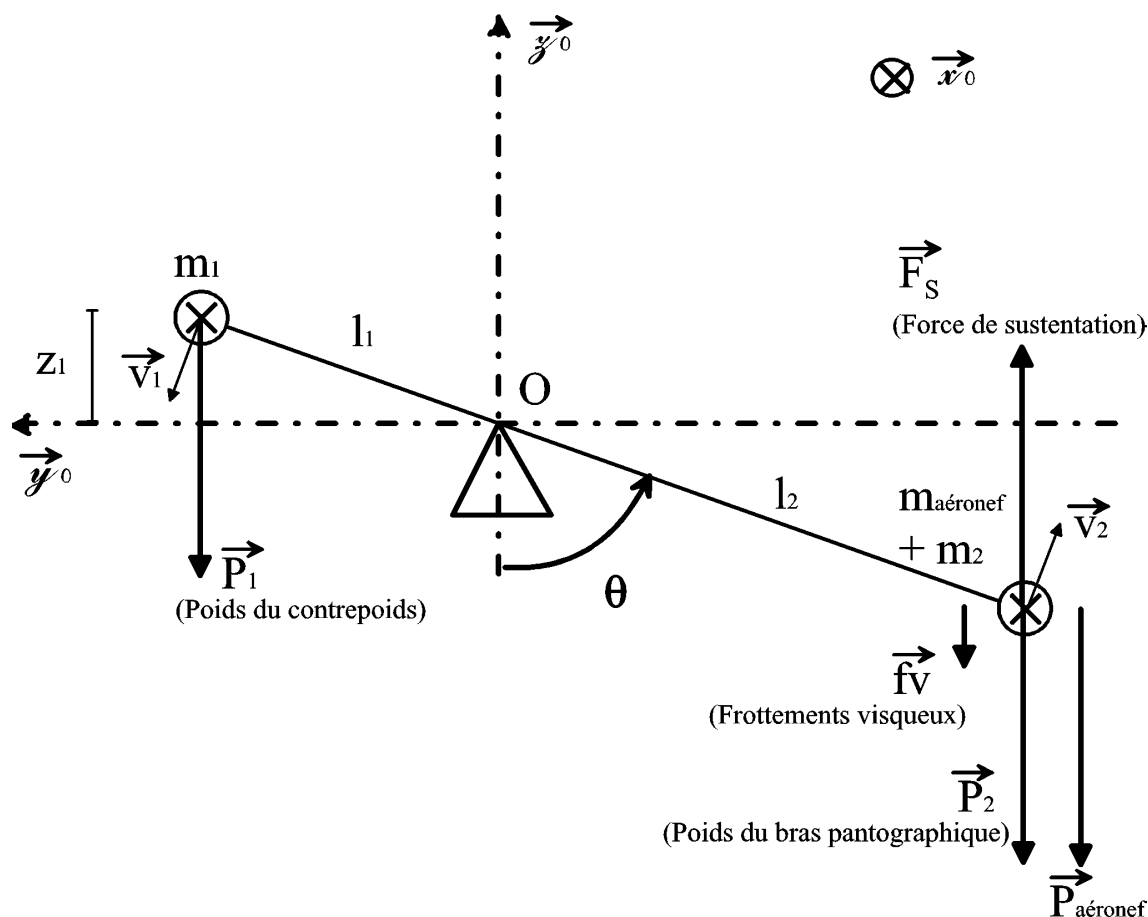


Figure V.11 Bilan des forces agissant sur le support de l'aéronef autour de son point d'équilibre stable

Considérons un système de forces équilibré appliqué au seul bras tournant muni de son contrepoids (sans l'aéronef).

Le système de forces se réduit à la présence de deux poids (poids des contrepoids et du bras

pantographique) qui produisent deux moments parfaitement antagonistes (comme pour la balance romaine) :

$$\vec{M}_{m1/O} + \vec{M}_{m2/O} = m_1 \cdot l_1 \cdot g \cdot \cos \theta_0 \cdot \vec{x}_0 - m_2 \cdot l_2 \cdot g \cdot \cos \theta_0 \cdot \vec{x}_0 = 0 \quad \text{Équation V.13}$$

L'énergie potentielle des forces conservatives en fonction de la position angulaire du bras s'écrit :

$$Ep\{m_1 + m_2\} = (m_1 l_1 + m_2 l_2) \cdot g \cdot \cos \theta + Cte$$

Déterminons la dérivée seconde par rapport à l'angle θ :

$$\frac{\partial^2}{\partial \theta^2} Ep\{m_1 + m_2\} = -(m_1 l_1 + m_2 l_2) \cdot g \cdot \cos \theta$$

$$\text{Donc pour } \theta \in \left] 0; \frac{\pi}{2} \right[\cup \left] \frac{\pi}{2}; \pi \right[\Rightarrow \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} Ep\{m_1 + m_2\} < 0 \quad \text{Équation V.14}$$

Toutes les orientations θ du bras correspondent à des altitudes d'équilibre mais des positions d'équilibre instable car la dérivée seconde de l'énergie potentielle en ces points est négative (Théorème de Lejeune-Dirichlet). Même en l'absence d'autres forces, le bras ne peut rester à une altitude d'équilibre instable : il ne peut que converger vers la seule altitude d'équilibre, en limite de stabilité, à savoir l'altitude correspondant à la position horizontale ($\theta=90^\circ$), et ce grâce aux frottements du système. En l'absence de frottement, le bras oscillerait éternellement autour de cette seule altitude d'équilibre stable.

Couple stabilisant

Considérons le système autour du point d'équilibre stable connu $\theta_0=90^\circ$ et supposons que la force de sustentation développée par l'aéronef compense parfaitement son poids :

$$\vec{F}_{S_0} = -\vec{P}_{aéronef} \quad \text{Équation V.15}$$

Le moment résultant de ces deux forces est nul.

Calculons les puissances virtuelles avec $\vec{v}_1$ et $\vec{v}_2$ les vitesses linéaires liées respectivement aux masses m_1 et m_2 :

$$P_v = \vec{P}_1 \cdot \vec{v}_1 + \vec{P}_2 \cdot \vec{v}_2$$

$$P_v = (m_1 \cdot l_1 + m_2 \cdot l_2) \cdot g \cdot \dot{\theta} \cdot \sin \theta \quad \dot{\theta} = \Omega_{\text{élévation}} \quad \text{Équation V.16}$$

Considérons maintenant un décalage $\Delta\theta$ par rapport à la position d'équilibre stable en θ_0 :

$$\Rightarrow \theta = \theta_0 + \Delta\theta$$

Ainsi pour de petits angles ($|\Delta\theta| \leq 30^\circ$) (donc pour $\cos \Delta\theta \approx 1$, $\sin \Delta\theta \approx \Delta\theta$ et

$\cos(\theta_0 + \Delta\theta) \approx \cos \theta_0$), les puissances virtuelles s'écrivent :

$$\begin{aligned} P_v(\theta_0 + \Delta\theta) &= P_v(\theta_0) + (m_1 \cdot l_1 + m_2 \cdot l_2) \cdot g \cdot \Omega_{\text{élévation}} \cdot \cos \theta_0 \cdot \Delta\theta \\ \frac{\partial}{\partial \theta} P_v &= \frac{P_v(\theta_0 + \Delta\theta) - P_v(\theta_0)}{\Delta\theta} = (m_1 \cdot l_1 + m_2 \cdot l_2) \cdot g \cdot \Omega_{\text{élévation}} \cdot \cos \theta_0 \\ \Delta P_v &= (m_1 \cdot l_1 + m_2 \cdot l_2) \cdot g \cdot \Omega_{\text{élévation}} \cdot \cos \theta_0 \cdot \Delta\theta \end{aligned} \quad \text{Équation V.17}$$

Alors, le couple stabilisant de rappel élastique ΔC_s s'écrit :

$$\Delta C_s = \frac{\Delta P_v}{\Omega_{\text{élévation}}} = (m_1 \cdot l_1 + m_2 \cdot l_2) \cdot g \cdot \cos \theta_0 \cdot \Delta\theta \quad \text{Équation V.18}$$

C'est le couple stabilisant ΔC_s qui ramène le bras à la position d'équilibre strictement stable lorsque l'on contraint le système à s'en écarter.

Stabilité dynamique

Appliquons le Théorème du Moment Cinétique au système $\{m_1, m_2\}$ en projection suivant le vecteur $\vec{x}_0$ (les forces de frottements visqueux sont globalisées au niveau de l'aéronef):

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} \bigg|_{\theta=\theta_0+\Delta\theta} = (\vec{M}_{m1/O} + \vec{M}_{m2/O} + \vec{M}_{fv/O} - \Delta \vec{C}_s) \cdot \vec{x}_0 \quad \text{Équation V.19}$$

avec

$$\begin{aligned} \vec{M}_{m1/O} &= m_1 l_1 \cdot \cos \theta_0 \cdot \vec{x}_0, & \text{Moment du poids } \vec{P}_1 \\ \vec{M}_{m2/O} &= -m_2 l_2 \cdot \cos \theta_0 \cdot \vec{x}_0, & \text{Moment du poids } \vec{P}_2 \\ \vec{M}_{fv/O} &= -f \cdot \frac{dz}{dt} \cdot l_2 \cdot \cos \theta_0 \cdot \vec{x}_0, & \text{Moment des forces de frottements visqueux} \\ \Delta \vec{C}_s &= (m_1 l_1 + m_2 l_2) \cdot g \cdot \cos \theta_0 \cdot \Delta\theta \cdot \vec{x}_0, & \text{Couple stabilisant de rappel élastique} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{donc } J \frac{d^2 \theta}{dt^2} \bigg|_{\theta=\theta_0+\Delta\theta} &= -f \cdot \frac{dz}{dt} \cdot l_2 \cdot \cos \theta_0 - \Delta C_s \\ \text{avec } \vec{M}_{m1/O} &= -\vec{M}_{m2/O} \end{aligned} \quad \text{Équation V.20}$$

Perturbons le point d'équilibre stable par variation de la force de poussée :

$$\vec{F}_N = \vec{F}_{N_0} + \Delta \vec{F}_N \quad \text{Équation V.21}$$

Nous obtenons pour de petits angles ($|\Delta\theta| < 30^\circ$) (avec $\Delta\theta = \Delta z / l_2$) :

$$\begin{aligned} J \frac{d^2}{dt^2} \Delta\theta &= -f \cdot \frac{dz}{dt} \cdot l_2 \cdot \cos \theta_0 - (m_1 l_1 + m_2 l_2) \cdot g \cdot \cos \theta_0 \cdot \Delta\theta + \Delta F_N \cdot l_2 \cdot \cos \theta_0 \\ \frac{J}{l_2^2} \frac{d^2}{dt^2} \Delta z + \frac{f \cdot l_2^2}{J} \frac{d}{dt} \Delta z + \left(\frac{m_1 l_1 + m_2 l_2}{l_2^2} \right) \cdot g \cdot \Delta z &= \Delta F_N \end{aligned} \quad \text{Équation V.22}$$

Il s'agit d'une fonction de transfert de second ordre qui s'écrit sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} \frac{d^2}{dt^2} \Delta z &= K_z \omega_z^2 \Delta F_N - 2\xi_z \omega_z \frac{d}{dt} \Delta z - \omega_z^2 \Delta z \\ \Rightarrow \frac{\Delta z}{\Delta F_N} &= \frac{K_z \times \omega_z^2}{p^2 + 2\xi_z \omega_z p + \omega_z^2} \end{aligned} \quad \text{Équation V.23}$$

De plus, la variation de poussée ΔF_N dépend directement de la variation de vitesse de rotation du rotor ΔN_{Rotor} (cf. Équation V.1). C'est pourquoi on peut comparer cette fonction (Équation V.23) à la fonction de transfert d'élévation $G_z(p)$ que nous allons identifier autour d'un point de fonctionnement au chapitre V.5.1 ci-dessous (equ. V.5.1).

On remarque qu'ici la fonction de transfert d'élévation ne contient pas de terme intégrateur, contrairement au cas de l'aéronef totalement libre de ses mouvements (cf. Équation V.5).

En pratique, à vitesse sol nulle ($v_x=0$ et $\Omega_{\text{bras}}=0$), donc sans aucun effet de la force centrifuge, on confirme ce résultat lié à l'absence d'intégrateur en observant qu'en réponse à un échelon de vitesse de rotation du rotor la valeur finale de l'altitude est finie (et non pas infinie comme dans le cas de l'aéronef libre).

V.5. Modélisation par fonction de transfert du système aéronef

Les dynamiques liées à l'aéronef captif utilisé dans cette étude sont complexes car elles reposent en plus des phénomènes aérodynamiques (déjà complexes en eux-mêmes) sur des perturbations permanentes telles que le couple stabilisant et la force centrifuge (voir paragraphe V.4).

Une approche de type « boîte noire » a été choisie pour l'identification des dynamiques liées aux deux degrés de liberté, à savoir les dynamiques de déplacement (en $\mathbf{x}$) et d'élévation (en $\mathbf{z}$). Les deux entrées correspondantes sont respectivement la commande de tangage (dont dépend directement la *direction* de la poussée) et la consigne de vitesse rotor (dont dépend directement l'*amplitude* de la poussée).

V.5.1. Modélisation et identification du transfert d'élévation

L'altitude est contrôlée par variation de la vitesse rotor. Le bouclage interne présenté au paragraphe précédent permet de commander la dynamique d'élévation de l'aéronef en pilotant la consigne de vitesse rotor.

Pour simplifier le système, nous considérons la dynamique entre la vitesse rotor et l'altitude

comme étant prépondérante sur la dynamique d'asservissement de la vitesse rotor présentée au paragraphe V.3.1. L'action intégrale présente au sein du correcteur de cet asservissement de la vitesse rotor permet d'annuler l'erreur statique ; ainsi en régime permanent la vitesse rotor est fidèle à la consigne rotor.

Identifions à présent la fonction de transfert G_z entre la consigne de vitesse rotor R_{rotor} [tours par minute] et l'altitude z [m].

Autour d'un point de fonctionnement du système défini par une vitesse sol v_x de 1,5m/s, une hauteur sol h de 1m et une vitesse rotor de 1575 tours par minute, nous appliquons au système un échelon de consigne de vitesse rotor au système (Figure V.12).

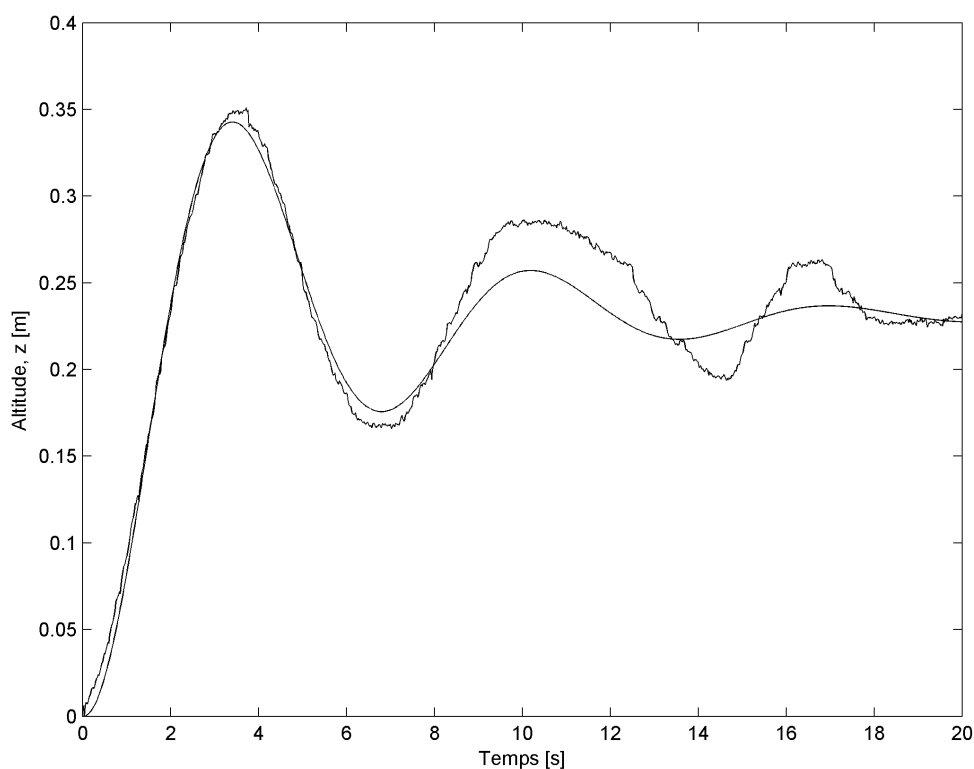


Figure V.12 Réponse en altitude de l'aéronef à un échelon de consigne de vitesse rotor de 45 tours par minute, comparée à la réponse du système identifié $G_z(p)$

En première approximation, nous identifions la dynamique d'élévation à une fonction de transfert du second ordre, $G_z(p)$, car lors de l'échelon, la réponse présente une tangente à l'origine non nulle et que son régime est périodique :

$$G_z(p) = \frac{K_z \times \omega_z^2}{p^2 + 2\xi_z \omega_z p + \omega_z^2} \quad \text{Équation V.24}$$

$$K_z = 0,00512 \text{ [m/tours par minute]}, \xi_z = 0,223 \text{ et } \omega_z = 0,951 \text{ [rad/s]}$$

Pourtant, lorsque l'on compare les réponses du modèle et du système, l'erreur entre la réponse du système et celle de l'objet est importante. Ainsi, la dynamique d'élévation apparaît sensiblement complexe. Ceci s'explique par le fait qu'elle résulte de l'aérodynamique complexe d'une voilure tournante, de l'influence des forces d'inertie et de la stabilité des points d'équilibres, ces deux dernières causes étant liées au banc d'essai en vol.

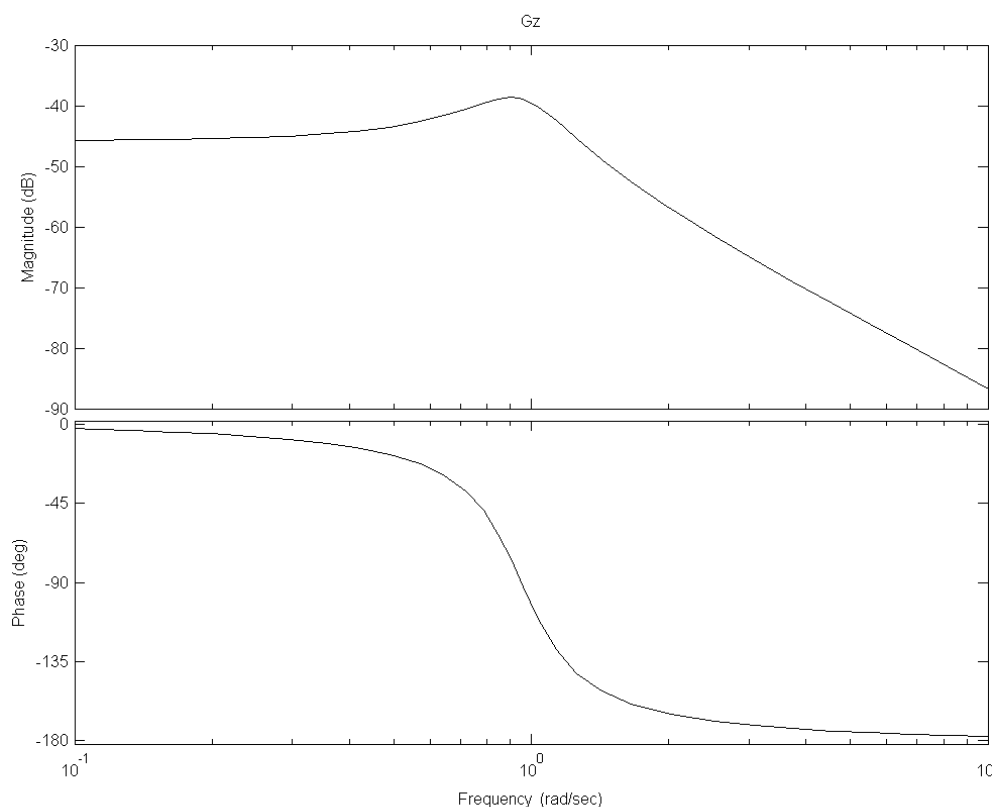


Figure V.13 Diagramme de Bode de la fonction de transfert d'élévation G_Z

Sur la figure V.13, $G_Z(p)$ présente une résonance de 7dB, ce qui rend le système oscillant, et une pulsation naturelle de 0,95 rad/s, ce qui rend le système relativement lent.

Nous avons étudié la dynamique d'élévation en plusieurs points de fonctionnement et cette résonance existe dans « l'enveloppe de vol » comprise entre 1 à 3 m/s et de 0 à 2 mètres d'altitude.

D'autre part, le gain K_Z dépend de façon croissante de la vitesse rotor dans une gamme de $\pm 50\%$. Les variations paramétriques de la pulsation ω_Z et de l'amortissement ξ_Z sont plus faibles. On peut conclure que cette fonction de transfert est caractérisée par de fortes variations paramétriques liées au point de fonctionnement choisi par la vitesse rotor.

Même si le modèle décrit n'est qu'une approximation du système réel, il a le mérite de permettre d'envisager la mise au point d'un bouclage visuo-moteur.

V.5.2. Modélisation et identification de la fonction de transfert de déplacement

Nous identifions la dynamique de déplacement à une fonction de transfert $G_{\text{vair}}(p)$ entre la tension de commande du servomoteur de tangage, $u_{\text{servoTangage}}$ [V] et la vitesse de l'air, v_{air} [m/s], autour d'un point de fonctionnement correspondant à une vitesse de 1,5m/s. Lors des essais visant à l'identification de ce système, la vitesse par rapport à l'air v_{air} est égale à la vitesse par rapport au sol v_x (paramètre mesurable sur le banc) car nous ne perturbons pas le système avec du vent.

Nous appliquons sur la commande du servomoteur de tangage des échelons symétriques engendrant un basculement de $\pm 2,5^\circ$ (Figure V.14).

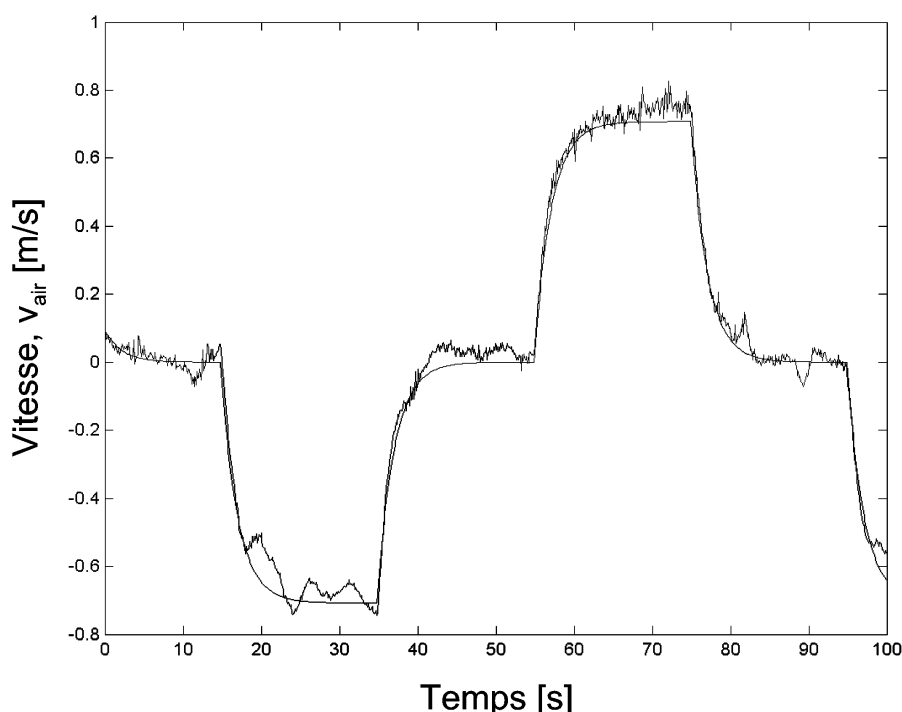


Figure V.14 Comparaison entre la vitesse v_{air} en sortie du modèle et la vitesse réelle de l'aéronef pour les mêmes commandes d'échelon en tangage.

En première approximation, nous identifions la dynamique de déplacement à une fonction de transfert du premier ordre $G_{\text{vair}}(p)$:

$$G_{\text{vair}}(p) = \frac{K_{\text{vair}}}{\tau_{\text{vair}}p + 1} \quad \text{Équation V.25}$$

$$K_{\text{vair}} = 0,944 \text{ m.s}^{-1}/\text{V} ; \tau_{\text{vair}} = 2,15 \text{ s}$$

La constante de temps du servomoteur ($\tau \cong 0,05 \text{ s}$) est négligeable par rapport à la constante de temps aéro-mécanique.

Cette fonction de transfert est assez peu affectée par des variations paramétriques, dès lors que la vitesse de vol est inférieure à 3m/s (correspondant à l'angle de tangage maximum de 10°).

V.5.3. Système aéronef simplifié

De par ses 2 entrées et ses 2 sorties, le système comporte différents couplages. Le gain K_z (cf. Équation V.24) dépend de la vitesse v_{air} (et donc de la commande du servomoteur de tangage) de façon décroissante dans une gamme de $\pm 25\%$ tandis que la pulsation propre ω_z et l'amortissement ξ_z varient dans une moindre proportion. Nos résultats expérimentaux montrent que le couplage entre la consigne de vitesse rotor R_{rotor} [V] et la vitesse v_{air} [m/s] est très faible : la vitesse de vol reste pratiquement constante alors même que la poussée rotor (via la vitesse du rotor) est modifiée sans cesse par le bouclage visuomoteur (Chapitre VII).

En dépit de légers couplages, il est donc possible de contrôler l'altitude et la vitesse de l'air de manière relativement indépendante : cette condition est nécessaire à la mise en œuvre du pilote automatique OCTAVE sur ce banc d'essai en vol (cf. chapitre III).

Ainsi, on simplifie le système aéronef en le réduisant à 2 fonctions de transfert étudiées aux paragraphes précédents (Figure V.15) :

1. $G_{v_{\text{air}}}(p)$ est la *fonction de transfert de déplacement*, qui lie la commande du servomoteur de tangage, $u_{\text{servoTangage}}$ [V] à la vitesse de l'air, v_{air} [m/s],
2. $G_z(p)$ est la *fonction de transfert d'élévation*, qui lie la vitesse rotor, R_{rotor} [tours par minute] à l'altitude, z [m].

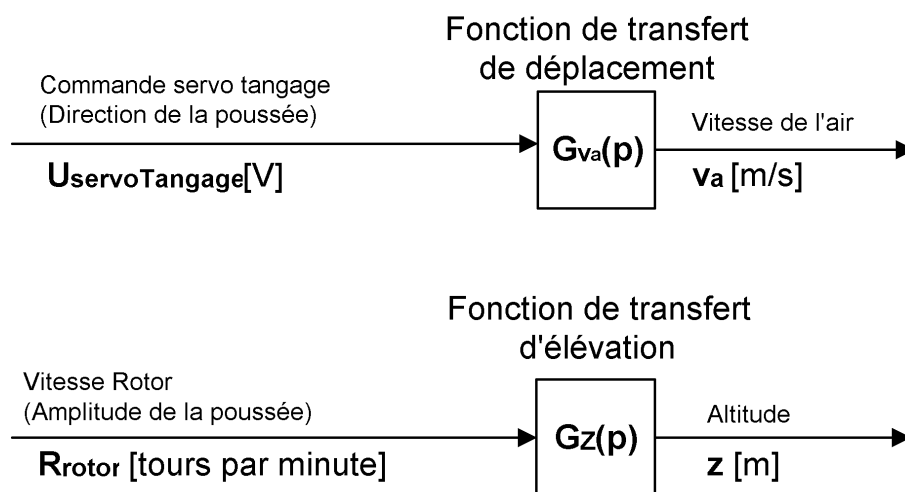


Figure V.15 Les 2 fonctions de transfert du système aéronef simplifié

Intéressons-nous maintenant à la manière dont ce banc d'essai en vol a été équipé d'un environnement visuel apte à tester à la fois la robustesse du traitement visuel et la robustesse du pilote automatique OCTAVE.

V.6. L'environnement (contrastes, relief et vent)

V.6.1. Les contrastes au sol

Un disque de carton texturé composé de 86 secteurs est posé sur le sol pour simuler un environnement richement contrasté (Figure V.16). La texture de ce disque résulte d'un double tirage aléatoire du niveau de gris n associé à chaque secteur ($n \in \{0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1\}$) et de leur largeur angulaire α telle que $0,5^\circ < \alpha < 17^\circ$. Vues d'un aéronef survolant la piste à $h=1\text{m}$, les fréquences spatiales s'étaleraient ainsi de $0,06 \text{ c}/^\circ$ à $1,75 \text{ c}/^\circ$ (cycles par degré). Mesuré dans la même gamme spectrale que l'œil du robot (dont le maximum de sensibilité se situe vers 850nm , donc dans le proche infra-rouge), le contraste effectif (cf. chap. IV.2) entre deux secteurs successifs est relativement faible (de 4% à 30 %). Ces différentes gammes de contraste et de fréquence spatiale nous ont permis de tester la robustesse de l'estimation du flux optique.

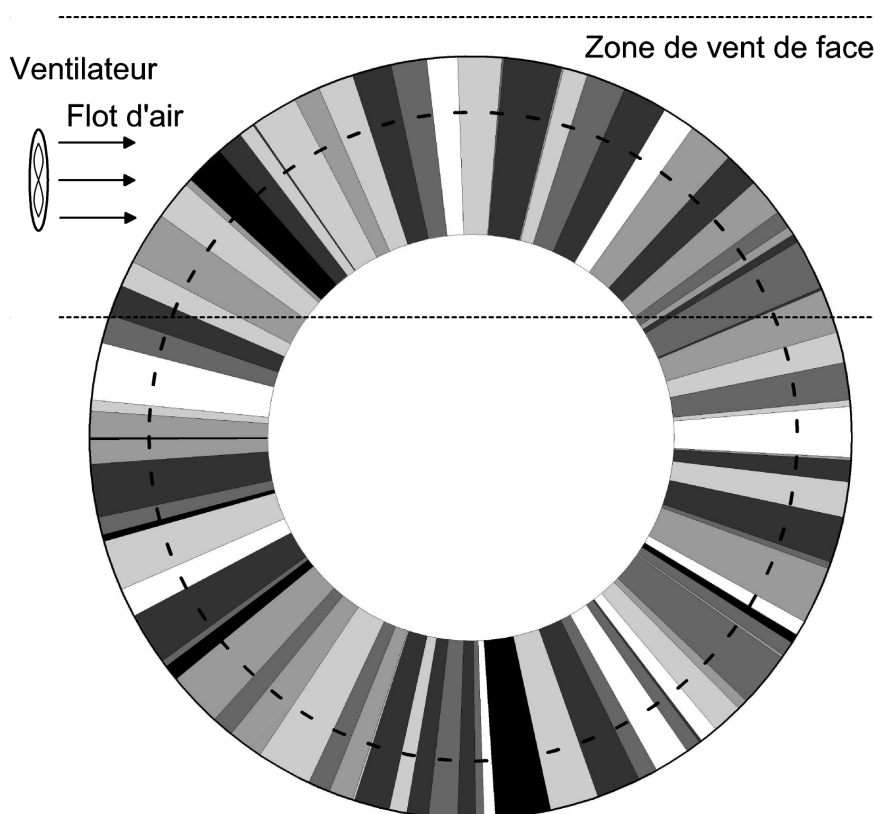


Figure V.16 La trajectoire moyenne du robot volant (cercle en pointillés) est une circonférence de 12 mètres au-dessus d'un terrain richement texturé. Un ventilateur (diamètre de pale : 0,40m, hauteur du centre des pales $\sim 1\text{m}$) permet d'apporter une perturbation aérodynamique majeure sur une partie de l'arène, ceci afin de tester la réaction au vent de l'aéronef.

V.6.2. Le relief

Une rampe circulaire (Figure V.1) couvrant un tiers de l'arène monte progressivement jusqu'à l'altitude 50cm avant de s'arrêter de manière abrupte.

Ce relief artificiel permet de tester la réaction de la boucle visuomotrice au terrain, dont nous savons qu'il peut être considéré comme une véritable perturbation de sortie du système OCTAVE.

Le profil de relief est présenté à la figure V.17 dans le plan vertical ($\bar{x}$, $\bar{y}$) au sein duquel évolue l'aéronef. C'est dans ce plan que seront présentées ultérieurement (au chapitre VII) les trajectoires du robot.

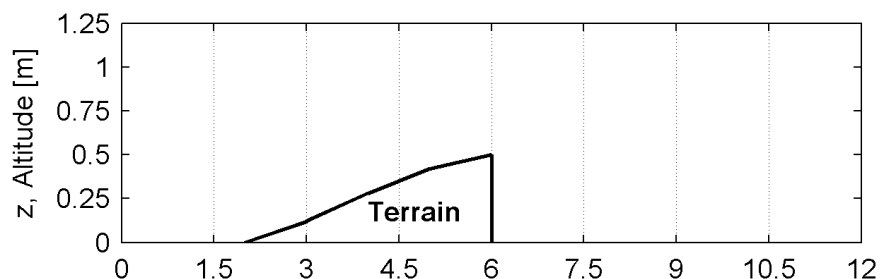


Figure V.17 Profil du relief créé par la rampe circulaire

V.6.3. Le vent

Le ventilateur (Figure V.16) permet d'appliquer des vents dont la vitesse est comprise entre 0,5 m/s et 1,5m/s. Le courant d'air généré n'est pas laminaire et il est limité en largeur. Néanmoins, il permet de tester la réponse du système à un vent de face.

V.7. Conclusion sur le banc d'essai en vol

L'utilisation d'un banc de test est nécessaire pour augmenter le niveau de connaissance et valider un principe visuomoteur avant de réaliser des tests en vol libre. Notre banc d'essai en vol permet à l'expérimentateur de réaliser de manière reproductible et sûre des tests visuomoteurs essentiels, tout en enregistrant un grand nombre de variables (position, vitesse, altitude), et tout en contrôlant à tout moment des paramètres essentiels comme les contrastes et les fréquences spatiales de l'environnement visuel, le relief ou même l'éclairage ambiant.

De plus, le bras tournant permet un mouvement continu de l'appareil sans interruption aucune, sans aller/retour ni rupture de charge. Il s'agit d'un avantage essentiel de ce type de banc par rapport à un banc de type linéaire.

Un autre type de bras tournant a été proposé récemment, qui ne bascule pas en élévation. Le bras tournant supportant l'appareil, est relié à une potence coulissant verticalement le long

d'un poteau central, entraîné lui-même en rotation (Milam et Murray, 1999). Ce système (Figure V.18) permet :

- de supprimer le moment de rappel en élévation introduit par la force centrifuge (cf. paragraphe V.4.2),
- de rendre stable l'ensemble des points d'équilibre du système et ainsi de retrouver dans la fonction de transfert d'élévation le terme intégrateur propre à un appareil libre (Équation V.5).

Un tel bras tournant a néanmoins pour inconvénient, outre sa réalisation mécanique plus complexe, d'introduire des forces d'inertie et de frottement visqueux supplémentaires sur la dynamique d'élévation (influence de la masse des contrepoids et du frottement des poulies).

Le compromis que nous avons fait a été d'alléger le bras tournant pantographique mis au point précédemment (Netter et Franceschini, 1999) en réduisant la section de ses trois bras et la masse de la plaque d'extrémité afin de minimiser encore l'inertie du bras.

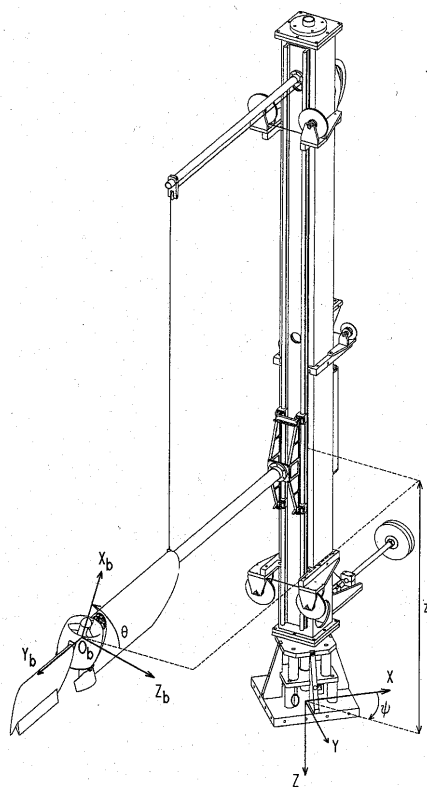


Figure V.18 Schéma de banc de test utilisé au Caltech pour commander une hélice carénée (Milam et Murray, 1999)

VI. La boucle visuo-motrice OCTAVE

VI.1. Simulation de la boucle visuomotrice.....	126
VI.1.1. La simulation des sorties photorécepteurs (« Phase A »).....	128
VI.1.2. Validation de la simulation du traitement DEM (« Phase B »).....	130
VI.1.3. Simulation de la dynamique d'élévation (« Phase D »).....	132
VI.2. Mise en œuvre de la régulation de flux optique sur le banc d'essai en vol.....	132
VI.2.1. Linéarisation de la boucle de régulation du flux optique.....	133
VI.2.2. Synthèse du correcteur de la boucle visuo-motrice.....	136

Le principe de guidage visuel par *régulation de flux optique* (décrit au chapitre III) est mis en œuvre dans la boucle visuomotrice OCTAVE. Ce chapitre décrit la simulation puis la mise en œuvre sur le micro-aéronef de cette boucle de *régulation du flux optique*.

Nous avons procédé de façon méthodique en simulant d'abord le comportement de l'aéronef piloté par le système OCTAVE. Afin de faciliter la mise au point du correcteur sur le processus réel, il est apparu commode de réaliser la simulation à l'aide du logiciel *Simulink*, bien adapté aux tests d'une boucle de régulation synthétisée sous forme d'un schéma-bloc, dans lequel chaque bloc exprime une fonction de transfert.

VI.1. Simulation de la boucle visuomotrice

La simulation de la boucle visuomotrice complète comprend 4 phases (Figure VI.1):

Phase A. Simulation des sorties photorécepteurs, qui dépendent de la position et de la vitesse de l'aéronef par rapport aux différents fronts de contrastes (Étapes 1 à 3 du traitement DEM, paragraphe IV.2),

Phase B. Simulation de la sortie du circuit électronique de traitement DEM, qui dépend des sorties photorécepteurs et des caractéristiques du traitement DEM (niveau des seuils, gamme de mesure, ...) (Étapes 4 à 9 du traitement DEM, paragraphe IV.2),

Phase C. Simulation du calcul de la commande rotor à partir de la sortie DEM et de la consigne de flux optique,

Phase D. Simulation de la position et de la vitesse angulaire de l'œil par rapport aux contrastes, deux paramètres qui dépendent de la commande rotor ainsi que des vitesses et positions angulaires antérieures de l'œil.

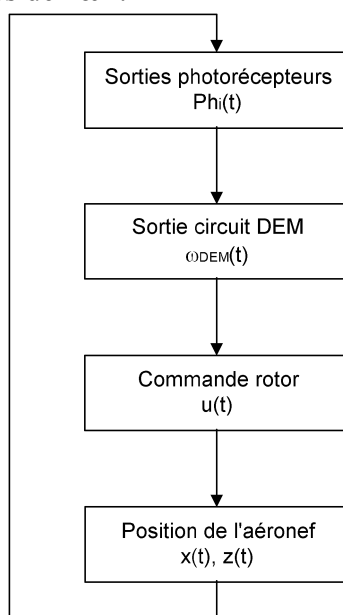


Figure VI.1 Synoptique de la simulation de la boucle visuo-motrice

La représentation de ces 4 phases sous forme de schéma bloc (chacune étant exécutée de façon séquentielle par intervalle de temps, $\delta t=0,001s$) est relativement aisée car il s'agit essentiellement pour les phases B à D, de fonctions de transfert décrivant le lien entre entrée et sortie temporelle (Figure VI.2). Par contre, la simulation des signaux de sortie photorécepteur (Phase A) nécessite un traitement non pas seulement temporel mais spatio-temporel, qui doit décrire, pour chaque intervalle de temps, la sortie photorécepteur en fonction de la position angulaire des bords contrastés (paragraphe V.3) présents dans son champ visuel. C'est pourquoi un bloc *Simulink* particulier a été utilisé, appelé *s-function* : il permet de simuler des systèmes entièrement définis par l'utilisateur. La phase A est particulièrement complexe car le signal de sortie d'un photorécepteur dépend non seulement de deux variables essentielles (l'altitude et la position de l'aéronef) mais aussi de nombreux paramètres, à savoir la sensibilité angulaire des photorécepteurs et la luminance des différents secteurs présents dans le champ visuel (Figure VI.2). Or la luminance des différents secteurs angulaires est une fonction continue par morceaux qui dépend de la position angulaire φ des bords contrastés présents à chaque instant dans le champ visuel du robot (Figure VI.3).

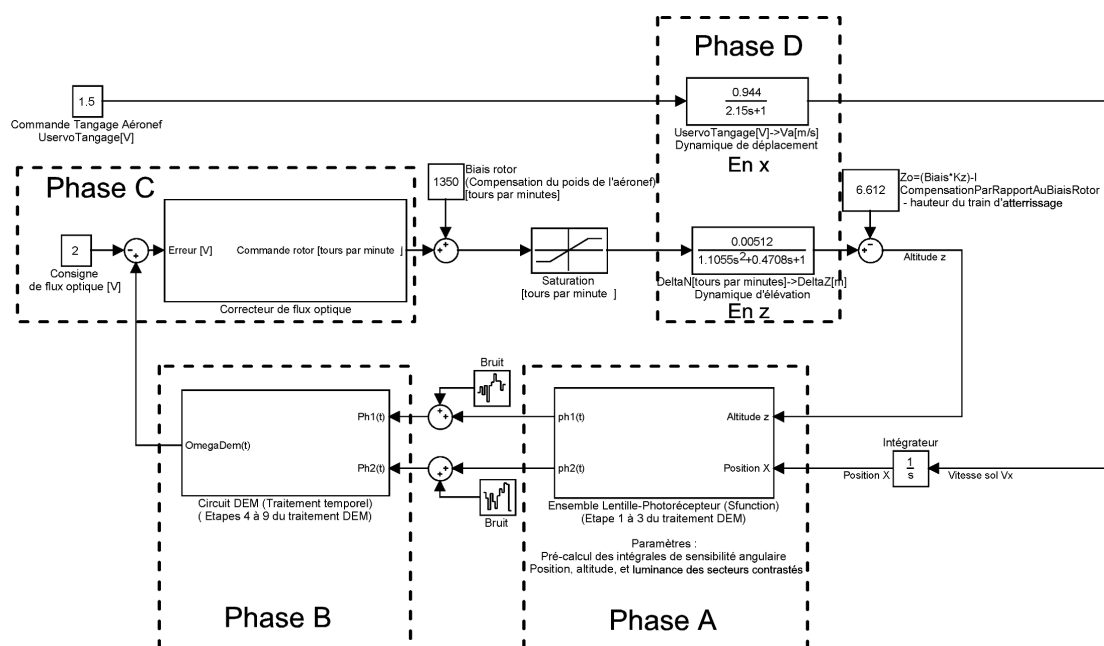


Figure VI.2 Schéma *Simulink* de la boucle visuo-motrice, avec sa décomposition en quatre phases A, B, C, D. Un bruit peut être rajouté en sortie de chaque photorécepteur pour simuler, par exemple, la présence d'une perturbation de fréquence 100Hz (due à l'éclairage artificiel ambiant) ou une perturbation vers 30 Hz (causée par une vibration à la fréquence rotor).

VI.1.1. La simulation des sorties photorécepteurs (« Phase A »)

Pour s'approcher le plus possible de la réalité et pouvoir ainsi comparer les sorties simulées aux sorties réelles, nous avons utilisé en simulation le même motif optique contrasté que celui du panorama devant être survolé par l'aéronef (du moins sa développante le long de sa circonférence moyenne).

L'interaction entre l'ensemble lentille+photorécepteur et l'environnement visuel (Phase A) a été simulée à chaque pas de temps δt pour chaque photorécepteur i en reprenant les 3 premières étapes du traitement DEM :

Etape 1. La simulation de l'**échantillonnage spatial** nécessite le calcul de la position angulaire $\varphi_{i,n}$, $\varphi_{i,n+1}$ afin de localiser tous les fronts de contraste n dans le champ visuel angulaire de chacun des photorécepteurs,

$$\varphi_{1,n} = \arctan\left(\frac{x - x_n}{h}\right) - \frac{\Delta\varphi}{2}; \quad \varphi_{2,n} = \arctan\left(\frac{x - x_n}{h}\right) + \frac{\Delta\varphi}{2} \quad \text{Équation VI.1}$$

Avec :

- $\varphi_{1,n}$, $\varphi_{2,n}$ position angulaire des bords contrastés pour chacun des 2 photorécepteurs,
- x , position référencée de l'œil de l'aéronef,
- x_n , position référencée des bords contrastés au sol,
- h , hauteur sol de l'aéronef.

Etape 2. La simulation du **filtrage spatial** passe-bas nécessite :

- Une approximation numérique de l'intégrale $S_{i,n}$ de la sensibilité angulaire des photorécepteurs entre les positions angulaires de chaque secteur numéroté n et de leur luminance I_n (Martin, 1995) (cf. figure VI.3b) :

$$S_{i,n}(t) = \int_{\varphi_{i,n}(t)}^{\varphi_{i,n+1}(t)} I_n \times A(\varphi) d\varphi \quad \text{Équation VI.2}$$

La sensibilité angulaire des photorécepteurs (chapitre IV) est approximée par une fonction gaussienne (Pichon, 1991) :

$$A(\varphi) = e^{-K\left(\frac{\varphi}{\Delta\rho}\right)^2} \quad \text{Équation VI.3}$$

- Une addition des contributions de chaque secteur (N_c , étant le nombre total de secteurs) pour former le signal de sortie photorécepteur (cf. figure VI.3b) :

$$S_i(t) = \sum_{n=1}^{N_c} S_{i,n}(t) \quad \text{Équation VI.4}$$

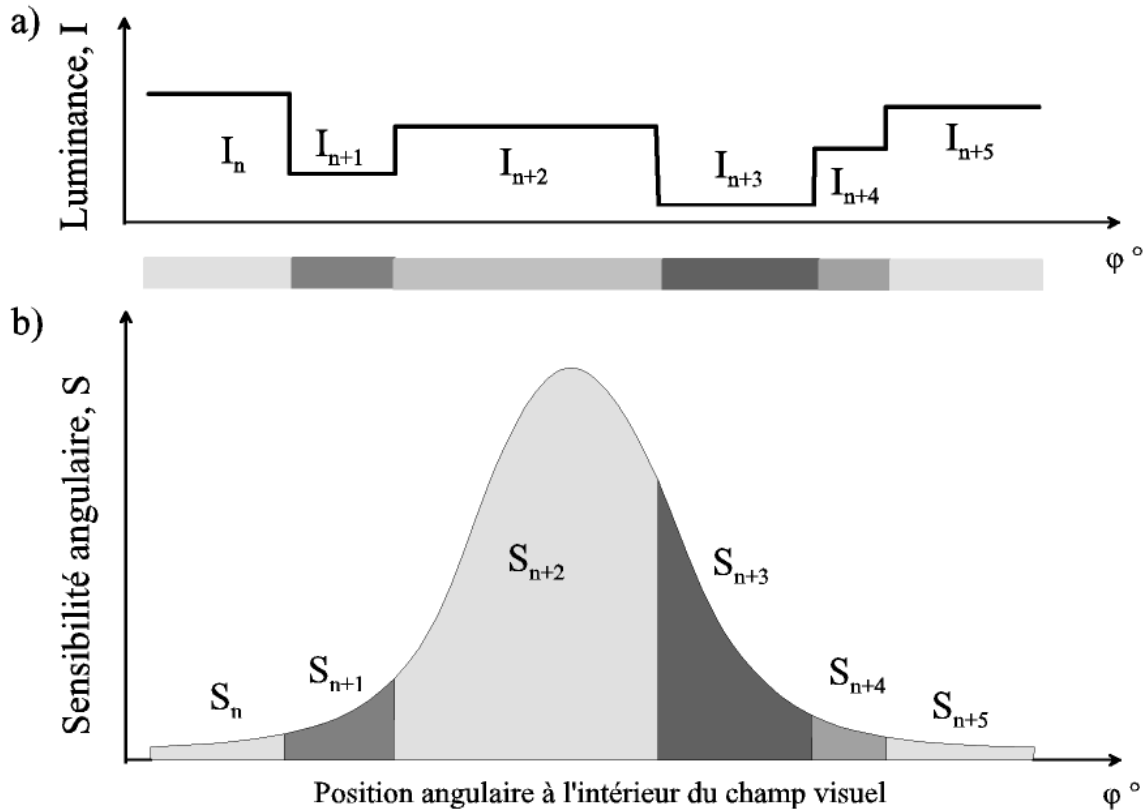


Figure VI.3 a) Fonction continue par morceau de la luminance angulaire à l'intérieur du champ visuel à un instant donné,
 b) Contributions à un instant donné de chaque secteur pour simuler le signal visuel photorécepteur. Chaque contribution est calculé en intégrant par morceau la sensibilité angulaire du photorécepteur (cf. équation VI.2 et VI.4).

Etape 3. La **photodétection** étant linéaire (car nous utilisons un montage photoconducteur linéaire), on a :

$$Ph_i(t) = K_I \times S_i(t) \quad \text{Équation VI.5}$$

La simulation approxime la sortie de chacun des photorécepteurs en utilisant la numérisation temporelle et spatiale. La précision de ces approximations dépend fortement de deux paramètres :

1. le pas élémentaire spatial $\delta\phi$, qui fixe la précision avec laquelle sont réalisés l'échantillonnage et le filtrage spatial,
2. le pas élémentaire temporel δt , qui fixe la précision avec laquelle est simulé le traitement temporel du DEM.

Toute diminution de ces deux paramètres, donc toute augmentation de la précision, ne se réalise qu'au dépens du temps de simulation. Notre compromis a été de choisir un intervalle temporel $\delta t = 0,001s$ et un intervalle spatial $\delta\phi = 0,005^\circ$. Malgré ce choix de hautes résolutions temporelle et spatiale, le temps de simulation (sous MATLAB/Simulink) reste assez court : il

n'est que deux fois plus lent que le temps réel, avec un PC de fréquence d'horloge égale à 730 MHz. Choisir un intervalle spatial plus grand conduit à une numérisation moins précise de la sensibilité gaussienne et donc à un repliement du spectre spatial. Il apparaîtrait ainsi un bruit numérique sur la sortie photorécepteur simulée.

L'intervalle de temps choisi $\delta t=0,001s$ correspond au pas d'échantillonnage utilisé dans le micro-contrôleur du circuit DEM mixte, qui associe filtrages analogique et numérique (Chapitre IV).

Des 4 phases évoquées au paragraphe précédent, c'est cette phase A qui requiert le plus long temps de calcul. Nous lui avons donc accordé une attention particulière afin de l'optimiser :

- en pré-calculant puis stockant en mémoire vive la matrice triangulaire des intégrales $S_{i,n}$ de la sensibilité angulaire des photorécepteurs entre 2 positions angulaires quelconques à l'intérieur du champ visuel (Taille 2000×2000 valeurs en format *double* codées sur 8 octets, soit 32Mo),
- en utilisant une *S-function* écrite en langage C sous *Simulink* pour simplifier l'utilisation de cette fonction et en minimiser le temps d'exécution.

VI.1.2. Validation de la simulation du traitement DEM (« Phase B »)

La simulation de la sortie DEM (Phase B) reprend pas à pas les différentes étapes 4 à 9 (décrites au chapitre IV) du circuit de traitement temporel DEM.

Afin d'accélérer la simulation, les filtres temporels présents dans le circuit DEM ont été simulés sous forme discrète en appliquant la transformation bilinéaire.

Une comparaison entre les données réelles et simulées des signaux visuels, après filtrage passe-bande, et de la sortie du circuit DEM a permis de valider les deux premières phases de la simulation (Phases A et B de la figure VI.2).

Pour comparer au plus près les données, l'altitude réelle du terrain a été prise en compte dans la simulation (Figure VI.4).

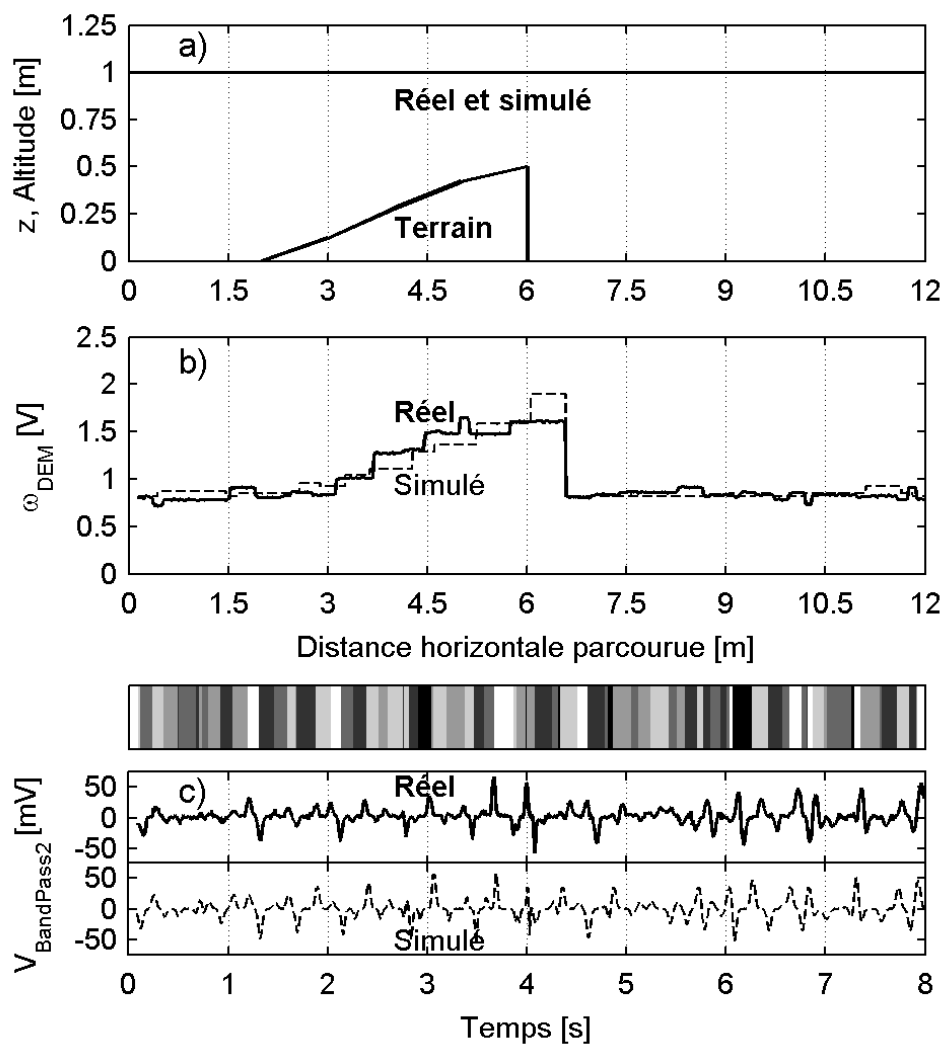


Figure VI.4 Comparaison entre les données réelles (traits pleins) et simulées (traits pointillés) du DEM en translation pure.

- a) L'œil (ensemble lentille+photorécepteurs) équipé de son circuit DEM mixte se déplace au-dessus du motif contrasté à une altitude constante ($z=1$ m) et à vitesse constante ($v_x=1,5$ m/s),
- b) La sortie DEM est d'amplitude très similaire en simulation et en réalité,
- c) Chaque variation de signal observé en sortie du filtre passe-bande du DEM (cf. figure IV.6) présente une amplitude semblable en simulation et en réalité.

VI.1.3. Simulation de la dynamique d'élévation (« Phase D »)

La simulation de la dynamique d'élévation de l'aéronef (Phase D) s'appuie sur la fonction de transfert d'élévation $G_z(p)$ (Chapitre V).

Un problème se pose toutefois car le micro-aéronef reste au sol tant que sa force de poussée n'atteint pas son poids, créant ainsi une zone morte. Lorsque la poussée de l'aéronef compense tout juste son poids, la vitesse de rotation du rotor N_{biais} est de 1350 tours par minute. Un biais de compensation N_{biais} est donc ajouté à la commande rotor pour compenser le poids de l'aéronef (Figure VI.2).

En sortie du transfert d'élévation, on soustrait l'altitude fictive z_0 produite par cette compensation d'entrée (Figure VI.2). Cette altitude fictive est égale au produit du gain de la fonction de transfert d'élévation par le biais de compensation auquel on soustrait l'altitude l de l'aéronef lorsqu'il repose sur le sol (l étant la hauteur du train d'atterrissage) (Équation VI.6).

$$z_0 = (N_{\text{biais}} \times K_z) - l \quad \text{Équation VI.6}$$

Une seconde solution aurait été de supprimer le biais au signal de commande de vitesse rotor avant son entrée dans la fonction de transfert d'élévation.

La phase C est simulée en dupliquant le comparateur et le correcteur de la boucle du flux optique mis en place sur la banc d'essai en vol (cf. chap. VI.2 ci dessous).

VI.2. Mise en œuvre de la régulation de flux optique sur le banc d'essai en vol

Dans le chapitre V, nous avons vu qu'un asservissement local permet d'imposer au rotor une vitesse de rotation de consigne. C'est cette vitesse de consigne, qui va résulter, ici du traitement visuomoteur. Or, la boucle visuomotrice est composée d'un capteur de flux optique (circuit DEM associé à l'ensemble lentille+photorécepteur -cf. chapitre IV-), d'un soustracteur et d'un correcteur $C_\omega(p)$ (Figure VI.5). La consigne de vitesse rotor est donc le signal de commande délivré par le correcteur $C_\omega(p)$.

Ce régulateur de flux optique est mis en œuvre intégralement sur la carte d'Entrées/Sorties DSP du banc d'essais en vol.

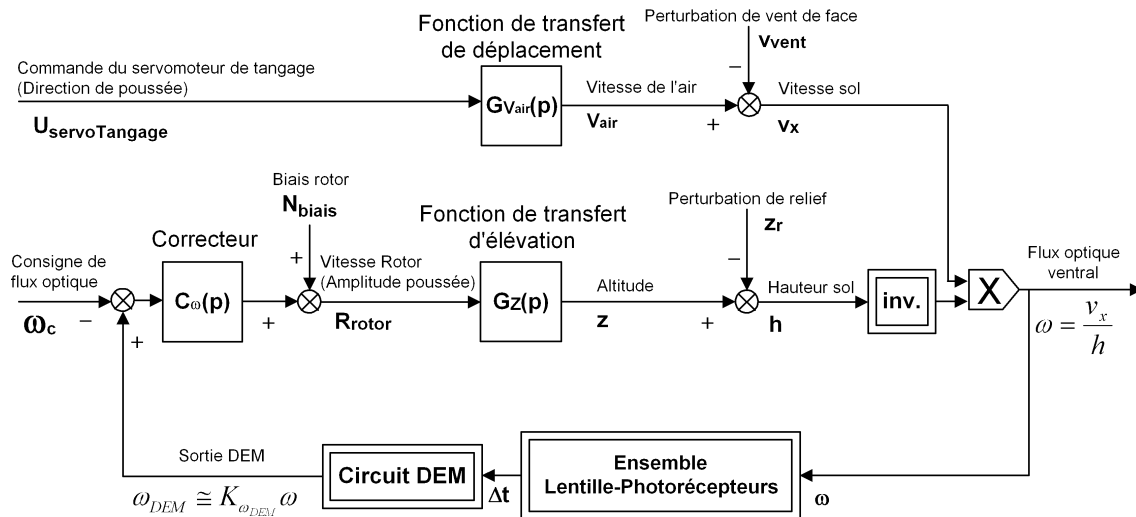


Figure VI.5 Mise en œuvre du pilote automatique OCTAVE sur le micro-aéronef

Les deux entrées du système sont l'angle de tangage, qui va déterminer la vitesse sol v_x , et la commande du rotor, qui va déterminer l'altitude z . Le correcteur $C_\omega(p)$ commande la poussée de façon à réguler le flux optique : lorsque l'estimation du flux optique ω_{DEM} est plus importante que la consigne de flux optique ω_c , $C_\omega(p)$ augmente la vitesse du rotor. L'accroissement de poussée résultant augmente alors la hauteur sol, et tend ainsi à rétablir le flux optique à sa valeur de consigne. Le micro-aéronef au sol a besoin d'une poussée suffisante pour contrebalancer son propre poids : cette zone morte est compensée en ajoutant un biais N_{biais} sur la commande rotor.

Enfin, le schéma de la figure VI.5 fait apparaître 2 perturbations susceptibles d'affecter la sortie et trois non-linéarités.

Chacune de ces non-linéarités demande à être linéarisée en vue de la synthèse du correcteur $C_\omega(p)$. Puis, nous évaluerons la fréquence de mise à jour de l'estimation du flux optique. Enfin, nous identifierons les perturbations qui agissent sur cette boucle visuomotrice linéarisée.

VI.2.1. Linéarisation de la boucle de *régulation du flux optique*

Pour mettre au point le correcteur de la boucle de flux optique, nous avons choisi de linéariser la boucle de régulation autour d'un point de fonctionnement (Figure VI.6). On prend ici comme point de fonctionnement $h \approx 1\text{m}$; $v_x \approx 1,5\text{m/s}$ et $\omega = v_x/h \approx 100^\circ/\text{s}$.

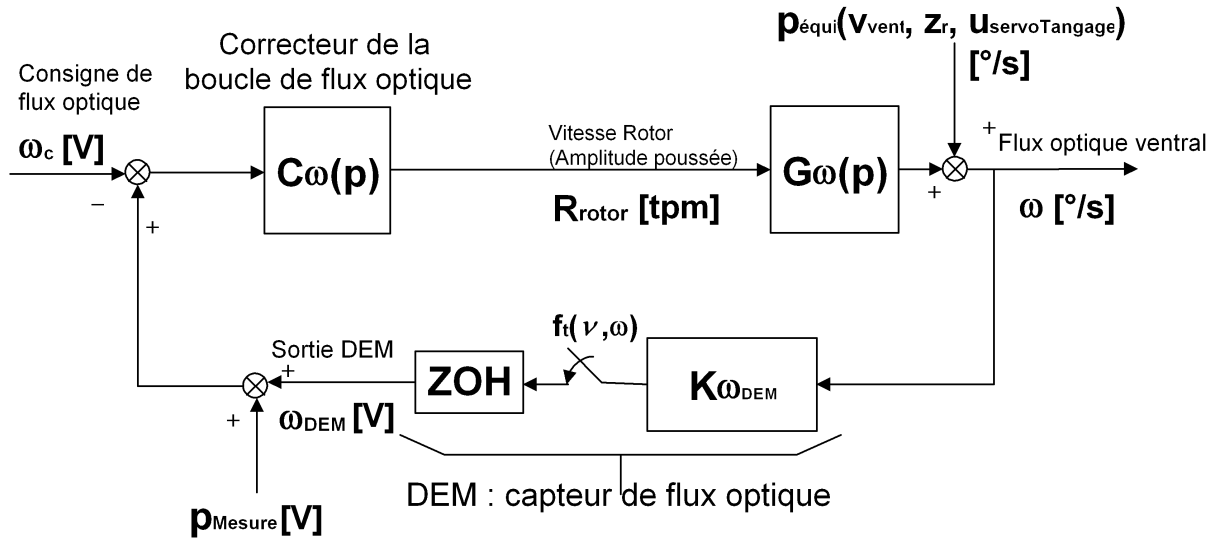


Figure VI.6 Linéarisation de la boucle de régulation du flux optique

Linéarisation de la dynamique entre la vitesse rotor et le flux optique ventral

Soit G_ω la fonction de transfert entre la vitesse rotor et le flux optique ventral.

Cette linéarisation s'appuie sur la fonction de transfert d'élévation, identifiée au chapitre V, pour une hauteur sol h de l'ordre de 1 m et pour une vitesse sol v_x de 1,5 m/s.

La fonction inverse présente sur la figure VI.5 transformant implicitement h en $1/h$, est approximée par la pente de sa tangente au point de fonctionnement, donc par un gain de $-1 \text{ [m}^{-2}\text{]}$ ainsi qu'il résulte de l'équation VI.7.

$$\frac{d}{dh} \left(\frac{1}{h} \right) = -\frac{1}{h^2} \approx -1 \text{ [m}^{-2}\text{]} \quad \text{pour } h \approx 1 \text{ m} \quad \text{Équation VI.7}$$

La pondération du flux optique par la vitesse sol est remplacée par un gain de 1,5 (correspondant au point de fonctionnement pour la vitesse sol de l'aéronef, égale à 1,5 m/s).

G_ω s'exprime donc par:

$$G_\omega(p) = \frac{K_\omega \times \omega_z^2}{p^2 + 2\xi_z \omega_z p + \omega_z^2} \quad \text{Équation VI.8}$$

avec $K_\omega \approx K_z \times v_x \times \frac{d}{dh} \left(\frac{1}{h} \right) \approx -0,00768 \text{ [rad.s}^{-1} / \text{rpm]}$

pour $h \approx 1 \text{ m}$; $K_z = 0,00512 \text{ [m/rpm]}$ et $v_x \approx 1,5 \text{ [m/s]}$

Linéarisation du DEM (capteur de flux optique)

On linéarise la caractéristique du DEM en fonction du flux optique en calculant la pente de la tangente au point de fonctionnement (qui est de 100 deg/s) :

$$K_{\omega_{DEM}} \approx 1,5 \left[V / rad.s^{-1} \right] \quad (\text{pour le DEM FPAA}) \quad \text{Équation VI.9}$$

$$\text{pour } \omega = \frac{v_x}{h} \approx \frac{1,5}{1} \left[rad.s^{-1} \right] \approx 100 \left[deg.s^{-1} \right]$$

NB: Lorsque l'on réalise la même linéarisation pour le DEM mixte, on trouve $K_{\omega_{DEM}} \approx 1$, ce qui impose d'insérer, un gain de 1,5 dans la boucle en sortie du circuit DEM (Figure VI.5 et Figure VI.6).

Fréquence moyenne de renouvellement de la mesure de flux optique

Le DEM ne délivrant pas une information continue de flux optique, on fait apparaître un échantillonneur bloqueur d'ordre zéro actionné à chaque renouvellement de mesure du flux optique par le DEM et maintenant sa valeur entre deux renouvellements (Figure VI.6). La fréquence moyenne f_t de ce renouvellement de mesure dépend du produit de la fréquence spatiale des contrastes dans le champ visuel par le flux optique (cf. équation IV.15 au paragraphe IV.8.2).

On peut estimer cette fréquence moyenne de renouvellement de l'ordre de 7Hz en considérant le flux optique égal à 100°/s et la fréquence spatiale des contrastes réellement détectés de l'ordre de 0,07 c/° (soit une fréquence proche de la borne inférieure de la gamme de fréquence spatiale du disque imprimé mesurée à h=1m).

Perturbations sur la boucle de régulation du flux optique

A ce stade, on peut identifier deux types de perturbations :

1. une perturbation équivalente en sortie sur le flux optique ($p_{\text{équi}}[^\circ/s]$) qui dépend à la fois du relief, de la commande en tangage ou même de la vitesse de vent,
2. une perturbation équivalente sur la mesure capteur ($p_{\text{mesure}}[V]$) qui reflète les aléas de la mesure du flux optique effectué par le DEM en matière d'erreurs de correspondance, dues par exemple à des vibrations.

Seule la perturbation équivalente en sortie peut être rejetée par la boucle de régulation.

VI.2.2. Synthèse du correcteur de la boucle visuo-motrice

Un correcteur à avance de phase dont la sortie est filtrée, $C_\omega(p)$, est introduit dans la boucle pour augmenter la marge de phase et l'amortissement et améliorer ainsi les performances dynamiques.

Nous avons synthétisé ce correcteur par approche fréquentielle à partir du modèle linéarisé de telle façon que la pulsation correspondant au gain unitaire soit de $\omega_u=3\text{rad/s}$ (correspondant à une fréquence 10 fois inférieure à la fréquence de renouvellement de la mesure de flux optique) et de telle façon qu'il assure une marge de phase de 60 degrés. Cette marge de phase importante est nécessaire eu égard aux variations paramétriques de la fonction de transfert d'élévation et aux non-linéarités présentes dans la boucle.

Après itération, nous avons obtenu le correcteur $C_\omega(p)$ suivant:

$$C_\omega(p) = K_C \left(\frac{\tau_1 p + 1}{\tau_2 p + 1} \right) \left(\frac{1}{\tau_3 p + 1} \right) \quad \text{Équation VI.10}$$

$$\text{avec } K_C = 180[\text{tours par minutes} / V]; \quad \tau_1 = 1,5s; \quad \tau_2 = 0,12s; \quad \tau_3 = 0,05s$$

On voit que le correcteur inclut aussi un filtre passe-bas du premier ordre (constante de temps τ_3) qui vient lisser les erreurs intempestives de la mesure du flux optique. Ce correcteur de la boucle visuomotrice est mis en oeuvre sur la carte temps réel dSpace.

Nous avons vérifié expérimentalement que la boucle visuomotrice est stable dans une gamme de 1 à 3 m/s pour la vitesse sol et dans une gamme de 0 à 2 m pour l'altitude.

Calcul du gain statique du transfert de boucle :

Le gain statique global de la boucle de régulation de flux optique est :

$$K = -K_C \times K_\omega \times K_{\omega_{\text{DEM}}} \approx 2 \quad \text{Équation VI.11}$$

La faible valeur de ce gain, jointe à l'absence d'intégrateur dans la boucle, conduit à une erreur statique importante, de l'ordre 50%.

Ainsi, le flux optique est maintenue autour d'une valeur deux fois plus faible que sa consigne exprimée en Volts. Par exemple, une consigne de flux optique $\omega_c=1,8$ [V] correspondant, pour le DEM mixte, à une vitesse angulaire de $200^\circ/\text{s}$, conduit l'aéronef à maintenir constant un flux optique de $90^\circ/\text{s}$ correspondant à $\omega_c/2=0,9$ [V] (cf. figure IV.24).

Il n'est pas possible d'augmenter le gain du système pour cause d'instabilité.

Par ailleurs, une action intégrale sur le correcteur n'a pas été mise en oeuvre sur le banc de test pour 2 raisons :

1. En présence d'intégrateur, une absence de renouvellement de la mesure DEM (que ce soit

une saturation, un problème capteur ou une absence de nouvelle détection due à une carence de contraste) provoque une variation non maîtrisée de l'action intégrale, rendant le comportement de l'aéronef impossible à prédire, provoquant de graves problèmes de sécurité (notamment à la mise en route et à l'arrêt de l'aéronef) et compliquant du fait l'expérimentation. Une action à désaturation d'actionneur (*anti-windup*) ne résoudrait pas complètement ce problème car la commande pourrait rester saturée dans l'attente d'une hypothétique nouvelle mesure DEM.

2. Une action intégrale introduit un déphasage de -90° et tend ainsi à déstabiliser un système.

Un pseudo-intégrateur pourrait convenir seulement s'il était mis en œuvre à des fréquences inférieures à $0,6\text{rad/s}$ ($0,1\text{Hz}$), c'est à dire avant la fréquence de résonance (cf. Figure VI.7). Mais, dans tous les cas, l'action intégrale n'améliorerait nullement les performances dynamiques du système mais au contraire les dégraderait à cause de la dispersion fréquentielle. Or, le cahier des charges impose à l'aéronef avant tout de bonnes performances dynamiques pour qu'il puisse éviter un obstacle au sol et maintenir un flux optique constant malgré les variations de vitesse, particulièrement marquées lors du décollage et de l'atterrissage.

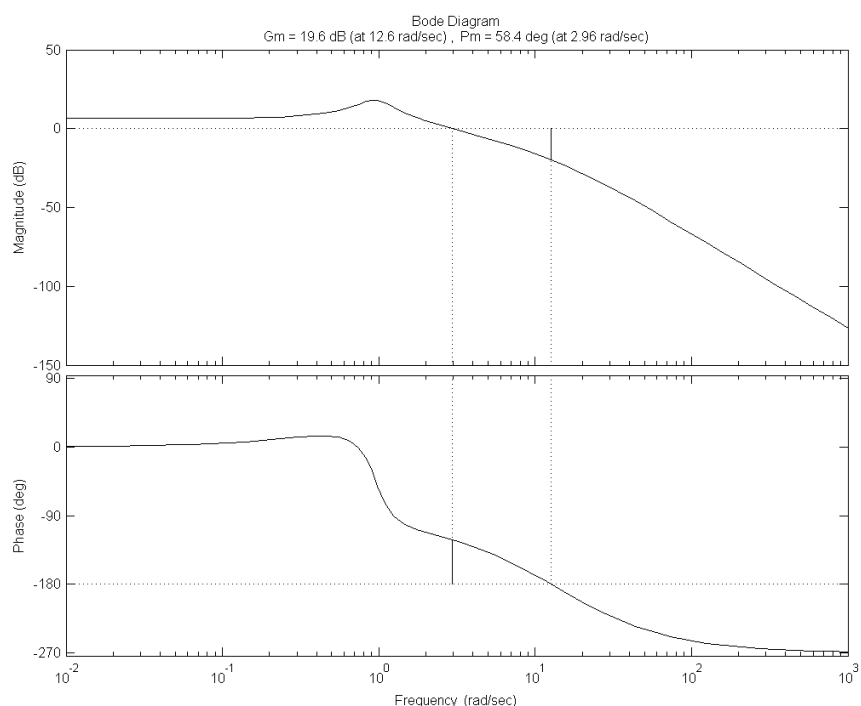


Figure VI.7 Diagramme de Bode du transfert de boucle $-C_\omega \times G_\omega \times K_{\omega_{DEM}}$

Le signe négatif est dû au signe du comparateur : cette « comparaison » n'est pas classique car on soustrait une consigne du flux optique à une mesure de flux optique (Figure VI.6). De plus, il est à noter que le gain K_ω de la fonction de transfert $G_\omega(p)$ est négatif.

Le correcteur à avance de phase permet de remonter la phase à la pulsation $\omega_i = 3\text{rad/s}$, correspondant au gain unitaire et ainsi à assurer des marges suffisantes ($Pm=60^\circ$; $Gm=20\text{dB}$), nécessaires pour un système particulièrement non-linéaire soumis à de nombreuses variations paramétriques.

Il est à noter que dans le cas d'un aéronef libre, un intégrateur est présent dans la fonction de transfert d'élévation de l'aéronef (paragraphe V.4.1). Dans le cas de l'aéronef libre, un correcteur à avance de phase serait donc suffisant pour obtenir une erreur statique nulle et rejeter de façon asymptotique les perturbations de sortie.

Ici, le principal avantage du correcteur à avance de phase est sa facilité d'ajustement lors de sa mise en œuvre expérimentale. Cette flexibilité ne se retrouve pas sur un correcteur plus complexe, en dépit de l'amélioration des outils de synthèse.

Le correcteur $C_\omega(p)$ est inclus dans la simulation (Phase C) afin de comparer les données réelles et simulées de la trajectoire de l'aéronef et de la sortie du DEM.

Comme nous le verrons dans le chapitre suivant, les trajectoires obtenues sur le robot viennent valider les simulations.

Évaluons maintenant les performances de cette boucle visuomotrice en la soumettant notamment à des perturbations de terrain.

VII. Comportement et performances du micro-robot aérien captif

<i>VII.1. Suivi de terrain automatique.....</i>	<i>140</i>
VII.1.1. Trajectoires du robot en fonction de l'angle de tangage.....	140
VII.1.2. Trajectoires en fonction de la consigne de flux optique.....	142
VII.1.3. Reproductibilité des trajectoires.....	143
VII.1.4. Comparaison entre les données simulées et les données réelles de la boucle visuomotrice	145
<i>VII.2. Décollage automatique.....</i>	<i>146</i>
<i>VII.3. Atterrissage automatique.....</i>	<i>147</i>
<i>VII.4. Réaction au vent.....</i>	<i>150</i>

Dans ce chapitre, nous décrivons les performances du robot captif équipé du pilote automatique OCTAVE, en termes de trajectoires. Nous montrons d'abord que la *régulation du flux optique* permet au robot d'éviter les collisions avec le sol en maintenant automatiquement une distance de sécurité et ainsi de suivre le terrain survolé. Nous montrons ensuite que cette même *régulation du flux optique* conduit, de manière simple, à un décollage automatique et à un atterrissage automatique. Enfin nous montrons que ce même principe conduit à un comportement particulièrement intéressant en présence de vent.

Les trajectoires présentées dans ce chapitre ont été obtenues en utilisant l'ensemble lentille-photorécepteur n°1 ($\Delta\varphi_1=\Delta\rho_1=4,2^\circ$). Ces trajectoires sont portées en fonction de l'altitude $\mathbf{z-l}$ du train d'atterrissage (z étant l'altitude de l'œil et l la longueur du train d'atterrissage).

VII.1. Suivi de terrain automatique

Nous avons disposé un tiers du disque imprimé (soit une longueur de 4 m) sur un plan incliné (“rampe circulaire” décrit au chapitre V) montant jusqu'à l'altitude de 0,5m. Ce relief affecte la boucle de *régulation du flux optique* comme une perturbation de sortie majeure (cf. Figures VI.5 et VI.6). Dans ce paragraphe, nous étudions les trajectoires produites par le robot en fonction des 2 paramètres du pilote automatique, à savoir l'angle de tangage (résultant d'une commande du servo de tangage) et la consigne ω_c du flux optique (cf. Figure VI.5).

VII.1.1. Trajectoires du robot en fonction de l'angle de tangage

Les trajectoires obtenues pour diverses vitesses sol (résultant de diverses commandes du servomoteur de tangage $\mathbf{u}_{\text{servoTangage}}$, cf. figure VI.5) montrent que le robot évite la pente en suivant le terrain (Figure VII.1) quelle que soit la vitesse sol. Le système OCTAVE conduit donc le robot à changer automatiquement son altitude et à s'adapter ainsi au relief survolé. Par ailleurs, on constate que plus le robot se déplace rapidement, plus il est repoussé loin du sol. On peut donc dire qu'une régulation de flux optique commandant la poussée rotor génère automatiquement une hauteur sol “de sécurité”, car celle-ci varie de manière appropriée avec la vitesse sol. Ce pilotage automatique se produit dans une large gamme de vitesses (1 à 3 m/s à la Figure VII.1) sans que la boucle de contrôle ait besoin d’être adaptée de quelque manière que ce soit à ce changement de vitesse. Le robot aérien équipé du système OCTAVE contrôle donc sa hauteur sol de manière étonnante car *ni la vitesse sol ni la hauteur sol n'ont besoin d'être explicitement mesurées ou connues à bord*. Cette façon de procéder tranche considérablement avec les pilotes automatiques de l'aéronautique traditionnelle, qui s'appuient sur des mesures explicites de hauteur et de vitesse et exigent donc autant de capteurs

spécifiques.

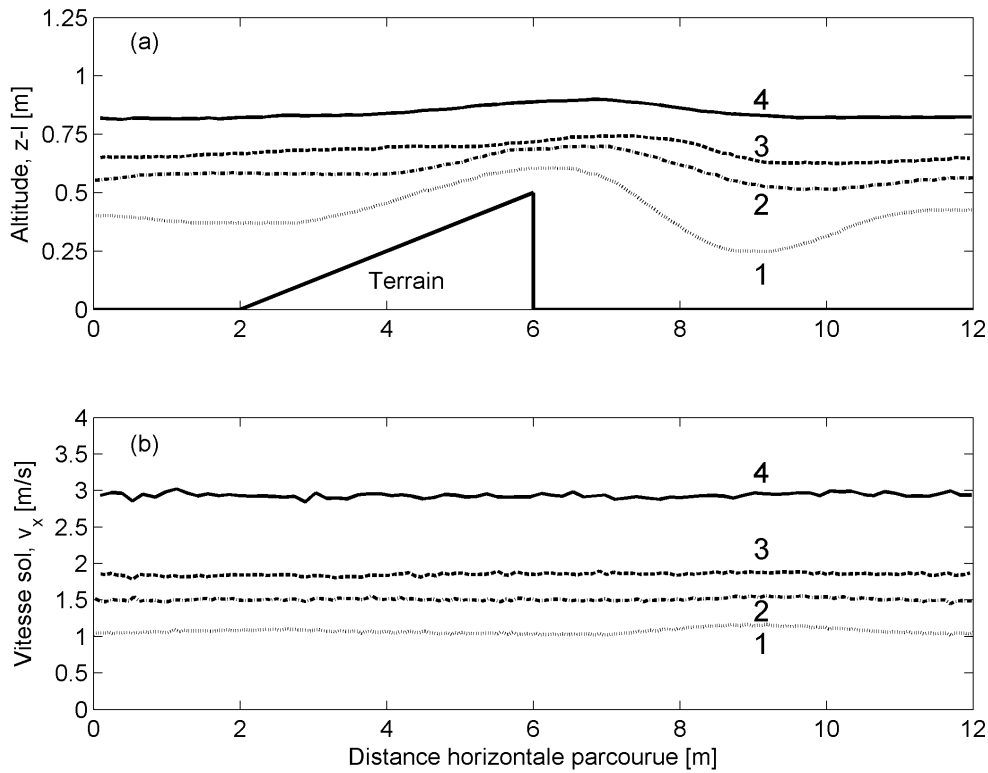


Figure VII.1 a) Trajectoires du minirobot aérien évitant un relief pentu (cf. figure V.17) à diverses vitesses sol (1≡1m/s; 2≡1,5m/s; 3≡1,8m/s; 4≡3m/s).

b) La vitesse sol reste pratiquement constante pour chacune des trajectoires présentées, ce qui montre que les variations de la vitesse rotor (qui contrôle la poussée de manière à éviter le terrain) influent peu sur la vitesse sol.

On remarque sur les trajectoires de la figure VII.1 que l'aéronef épouse la forme du terrain sous-jacent d'autant mieux qu'il vole à vitesse réduite (comparer les trajectoires à 1m/s et à 3m/s). Il y a pour cela trois raisons :

1. Le moment de rappel à l'horizontale dû à la force centrifuge croît avec la vitesse (cf. paragraphe V.4.2). Ainsi, plus la vitesse est importante, plus le système est perturbé par ce moment de rappel.
2. Il existe un couplage entre l'altitude et la vitesse (cf. paragraphe V.5.3). Le gain K_z (donc le gain de la boucle visuomotrice K_ω) varie de façon décroissante avec la vitesse. Ainsi, le gain de la boucle visuomotrice est plus faible lorsque les vitesses sont élevées.
3. La mesure du flux optique ω présente une sensibilité qui varie avec la hauteur sol, h :

En effet : $\omega = \frac{v_x}{h}$, on obtient :

$$\frac{\partial \omega}{\partial h} = -\frac{1}{h^2} \cdot v_x = -\frac{\omega}{h}$$

Équation VII.1

Ainsi, plus la hauteur sol est élevée, plus la variation relative du flux optique due à une

variation de hauteur sol (causée par exemple par le relief) est faible. De la même manière, plus la hauteur sol est faible, plus la variation relative du flux optique due à une variation de hauteur sol est importante.

Ainsi, le flux optique d'un avion volant à plusieurs centaines de mètres au-dessus du sol ne subira que peu de variations causées par un relief de quelques mètres alors que le flux optique de cet avion volant à quelques dizaines de mètres subira une variation plus importante pour ce même relief. Ce dernier effet est mis en évidence à l'état pur à la figure VII.2, où la vitesse reste constante.

VII.1.2. Trajectoires en fonction de la consigne de flux optique

La consigne de flux optique est le second paramètre du pilote automatique OCTAVE. Les quatre trajectoires montrées en Figure VII.2a ont été obtenues pour une même vitesse (1 m/s) mais pour 4 consignes de flux optique distinctes. On constate que chacune de ces consignes conduit à une hauteur sol différente. Non seulement le robot évite les obstacles quelle que soit la consigne de flux optique, mais plus cette consigne est élevée, plus le robot navigue en rase-mottes, tout en épousant la forme du relief.

La lecture en temps réel de la valeur du flux optique (Figure VII.2b) en montre les fluctuations. Ces fluctuations ont pour origine, d'une part les « erreurs de correspondance » au niveau du traitement DEM (Pichon, 1991) et d'autres part les vibrations mécaniques de l'œil, causées par l'aéronef lui-même (la fréquence rotor moyenne de 29Hz se situant malheureusement dans la bande passante du filtrage temporel du circuit DEM). Le point important est que le système OCTAVE en boucle fermée filtre ces fluctuations, qui ne viennent aucunement déstabiliser la boucle.

En figure VII.2b, on peut également remarquer que plus la hauteur sol est importante, moins les variations dues au relief influent sur la mesure du flux optique (cf. Équation VII.1). Ainsi, par exemple, la variation de hauteur sol sur la trajectoire est plus faible pour la trajectoire n°4 que pour le trajectoire n°1 (Figure VII.2a). La raison en a été expliquée à la fin du paragraphe précédent (para. VII.1.1).

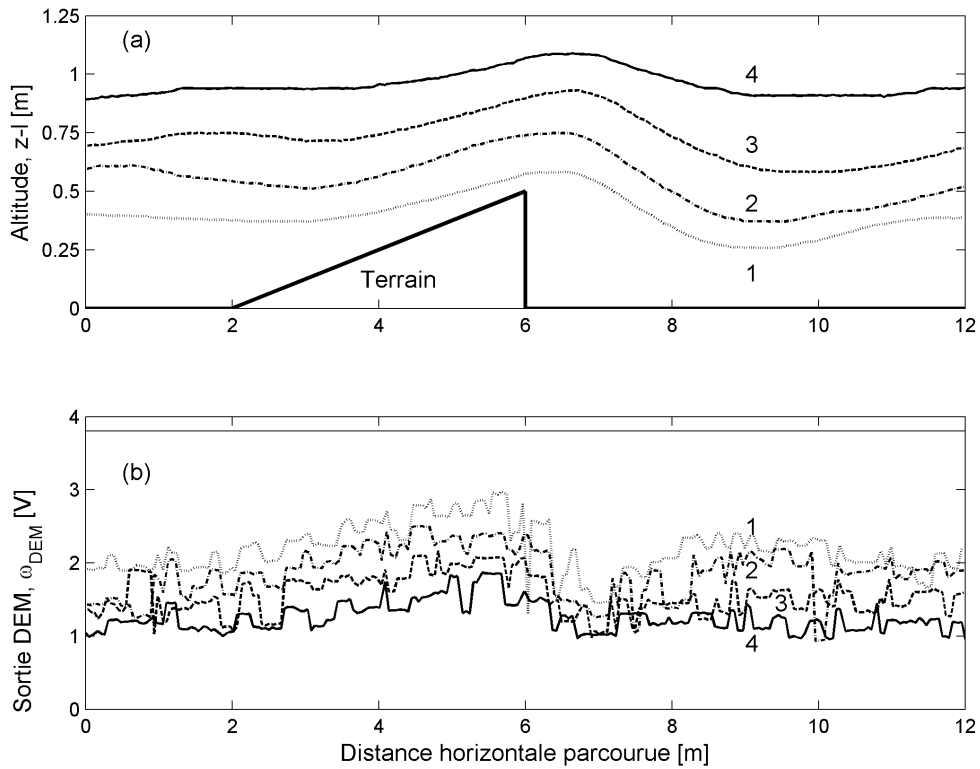


Figure VII.2 a) Quatre trajectoires enregistrées pour une même vitesse sol (1m/s) mais pour différentes consignes de flux optique ω_e . Le robot évite le relief pentu dans tous les cas, et sa hauteur sol est d'autant plus élevée que la consigne de flux optique est basse.

b) Sortie DEM mesurée au cours de chacune des quatre trajectoires (IIa) ($\omega_{DEM} = 1V$ correspond à $\omega \approx 45^\circ/s$, $2V \approx 80^\circ/s$ et $3V \approx 180^\circ/s$). Les mesures successives du circuit DEM reflètent les détections successives des nombreux bords contrastés présents sur le relief survolé.

VII.1.3. Reproductibilité des trajectoires

Les trajectoires du robot, enregistrées pendant dix tours consécutifs à une vitesse $v_x = 1,2m/s$ (Figure VII.3), montrent que le robot suit le terrain de manière fiable, sans aucun crash, et ce malgré la présence de perturbations aérodynamiques (telles que l'effet de sol et les turbulences de l'air, elles-mêmes causées par le passage du robot quelques secondes auparavant).

Ici encore, la « perturbation de terrain » atteint progressivement une altitude de 0,5m sur 4 mètres. Il s'agit donc d'une perturbation en rampe. En boucle ouverte, pour la même altitude, la perturbation équivalente p_{equi} due à la pente du relief atteindrait $150^\circ/s$ (car le flux optique serait de $85^\circ/s$ en l'absence de relief et augmenterait progressivement jusqu'à $235^\circ/s$ au sommet de la rampe à $z_{relief} = 0,5m$).

On observe que le régulateur rejette quand même plus de la moitié de cette perturbation : le flux optique n'atteint en effet que $155^\circ/s$ au maximum alors qu'il serait de $235^\circ/s$ en l'absence de régulation (boucle ouverte).

Comparons maintenant le temps de montée du système à la durée de la perturbation.

La durée (environ 3 secondes) de la perturbation en rampe (localisée entre 2 et 6 mètres) est du même ordre que le temps de montée de la boucle visuomotrice (la pulsation naturelle du système étant de $\omega_z=0,95\text{rad/s}$ à cause de l'inertie ramenée du bras, le temps de montée est égal, en première approximation, à $t_r \cong 1,8/\omega_z \cong 2\text{s}$ (Franklin et al. 1994). Donc la valeur finale à $\pm 1\%$ n'est atteinte qu'à $t_s \cong 22\text{s}$ ($1/\xi_z \omega_z \cong 4,6/0,21 \cong 22\text{s}$ d'après Franklin et al. 1994).

Ainsi, on observe que lorsque le robot parcourt une distance de 6 mètres, il n'a rejeté que 50% de la perturbation à cause de l'erreur statique d'environ 50% et de l'erreur de traînée (qu'implique une perturbation de rampe) et en dépit du léger dépassement introduit par la boucle de régulation du flux optique.

Lorsque le robot atteint la distance de 6 mètres, la disparition du relief au sol crée un échelon de perturbation du flux optique d'amplitude $150^\circ/\text{s}$. Le robot rejette cette perturbation en effectuant un léger dépassement.

Bien que le robot n'ait pas le temps d'atteindre sa valeur finale avant que n'apparaisse la prochaine perturbation en rampe, le système demeure stable.

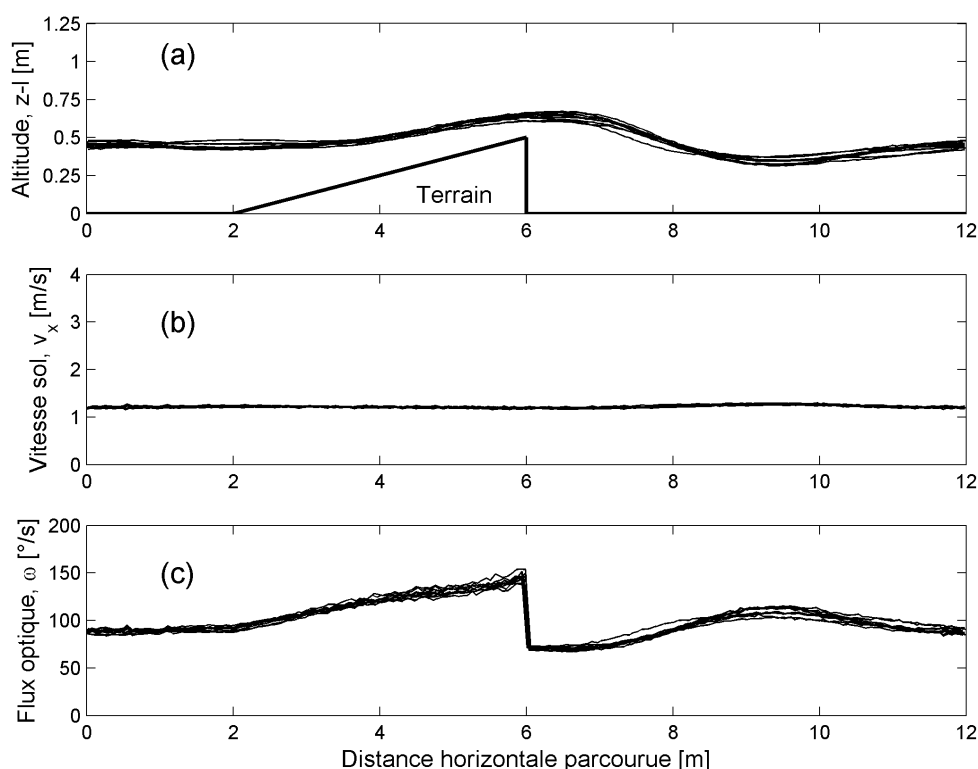


Figure VII.3 Dix trajectoires consécutives superposées obtenues pour une même vitesse, $v_x \approx 1,2\text{m/s}$ et une même consigne de flux optique.

- a) Le robot évite le relief pentu en réalisant un suivi de terrain,
- b) La vitesse sol reste pratiquement constante ($v_x \approx 1,2\text{m/s}$) tout au long de la trajectoire,
- c) Le flux optique tend à être maintenu autour de $85^\circ/\text{s}$ par la boucle visuomotrice mais l'erreur est importante au sommet de la rampe.

La régulation est loin d'être parfaite mais le point important est que cette structure de commande, à savoir une *régulation du flux optique*, permet de faire naître un comportement

fiable de suivi de terrain.

VII.1.4. Comparaison entre les données simulées et les données réelles de la boucle visuomotrice

Si l'on compare la boucle visuomotrice réelle et celle simulée, les données réelles sont très similaires aux données simulées (Figure VII.4), à la fois pour le flux optique estimé par le traitement DEM et pour les trajectoires de l'aéronef.

Ces trajectoires valident également la simulation de la régulation de flux optique et la simulation de la dynamique d'élévation.

On remarque en figure VII.4.b que l'estimation réelle du flux optique est plus perturbée que sur l'estimation résultant de la simulation. La raison en est que le traitement visuel DEM réel subit les vibrations de l'aéronef, vibrations qui ne sont pas incluses dans la simulation présentée ici.

Ainsi, ces résultats (Figure VII.4) permettent de montrer que l'ensemble de la boucle visuomotrice réelle se comporte de manière assez semblable à la boucle visuomotrice simulée.

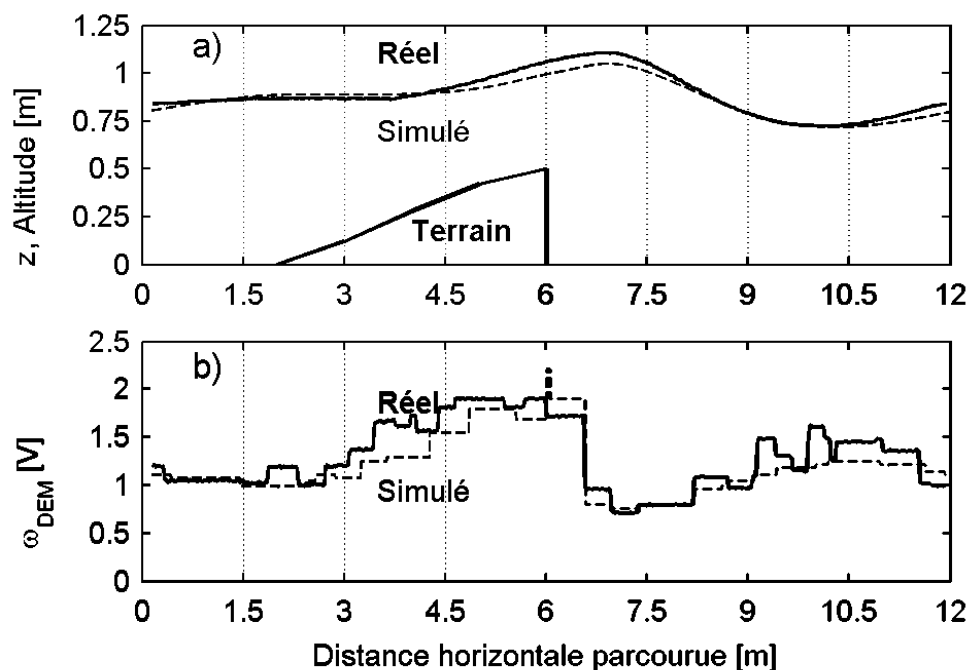


Figure VII.4 Données réelles (traits pleins) et simulées (traits pointillés) de la trajectoire du robot et de l'estimation du flux optique survolant le terrain pentu

En boucle fermée, la simulation inclut, en plus du traitement DEM, la dynamique du robot et la régulation du flux optique. La boucle visuomotrice régule le flux optique en adaptant la poussée de l'aéronef de manière à rejeter la perturbation de relief. Ainsi, la mesure du flux optique ω_{DEM} varie autour de 1,2 V.

VII.2. Décollage automatique

Dans toutes les expérimentations suivantes, la rampe matérialisant le relief pentu a été enlevée du banc de test, rendant ainsi le terrain plat.

Pour initier un décollage automatique, l'idée est d'augmenter progressivement l'angle de tangage de l'aéronef de sorte que l'axe du rotor bascule en avant. Cette zone d'augmentation de l'angle de tangage est appelée « zone de piqué ». Dans cette zone, la vitesse sol v_x va augmenter progressivement. On doit s'attendre alors à ce que le micro-aéronef augmente automatiquement sa hauteur sol de façon à maintenir constant le flux optique (c'est-à-dire le rapport vitesse sol sur hauteur sol), puisque la boucle visuomotrice tend à chaque instant à maintenir le flux optique mesuré ω_{DEM} constant.

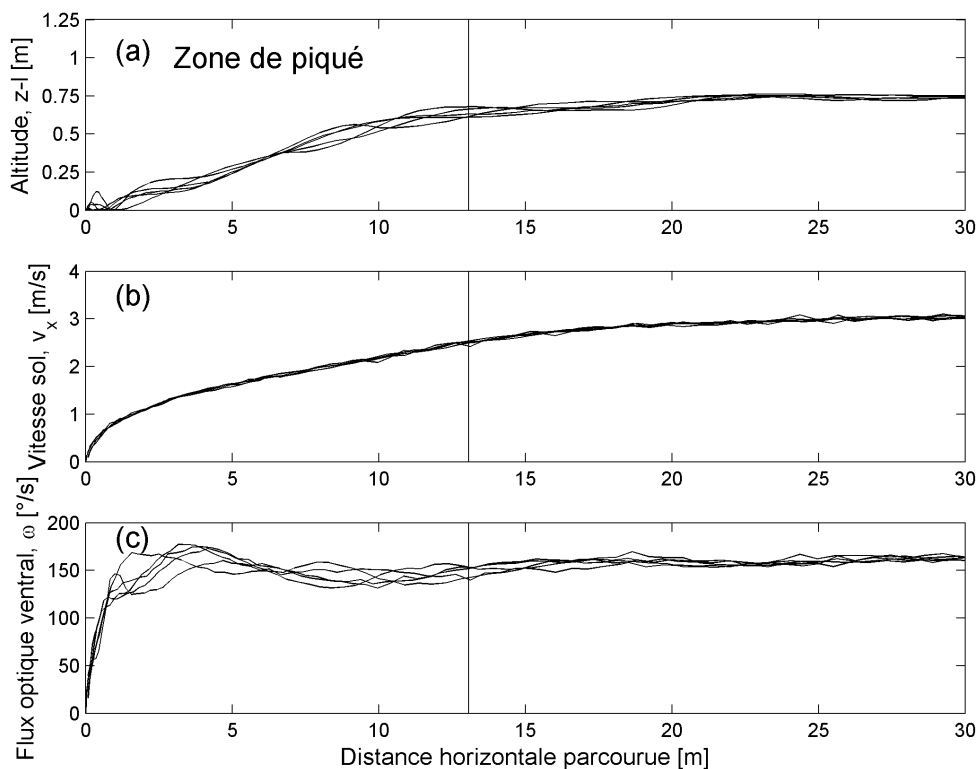


Figure VII.5 Décollage automatique sous contrôle visuel

Au départ, la vitesse de rotation du rotor est ajustée à une valeur correspondant tout juste à la sustentation de l'aéronef. La régulation du flux optique est alors enclenchée. Dans la zone de piqué, l'aéronef s'incline vers l'avant donc sa vitesse sol augmente (b). Il en résulte un décollage progressif et reproductible (a) qui est en permanence sous le contrôle du système visuel. Le flux optique ventral (c) est régulé tout au long du décollage jusqu'à l'altitude de croisière. Le flux optique dépasse sa consigne lors du décollage avant de se maintenir à une valeur nominale (environ 150°/s).

Ces cinq trajectoires montrent la reproductibilité de la manœuvre de décollage.

La figure VII.5 montre les résultats de cette stratégie. En appliquant un basculement linéaire (rampe temporelle) durant 10 secondes sur la commande de tangage, l'aéronef s'incline vers l'avant progressivement jusqu'à atteindre une inclinaison de 10°. Le résultat est une augmentation continue de la vitesse de l'aéronef (Figure VII.5b) et la nécessité pour l'aéronef

de s'élever dans les airs pour augmenter sa hauteur sol proportionnellement à sa vitesse sol (Figure VII.5a). Ainsi, se produit de manière remarquablement simple un décollage automatique, durant lequel la boucle fermée assure toute sécurité (rejet de perturbations, par exemple aérodynamiques, durant le décollage).

Sur la figure VII.5, sont superposées cinq trajectoires au cours desquelles l'aéronef est sous le contrôle permanent de sa vision. On constate que la boucle de *régulation du flux optique* rend le décollage automatisé très reproductible. Ainsi, le pilote automatique OCTAVE montre sa capacité à contrôler l'altitude de vol d'un aéronef avec souplesse et sécurité.

La distance de 30 mètres qui correspond à l'altitude finale de l'aéronef est parcourue en 16 secondes. Cette valeur est à rapprocher du temps de stabilisation t_s égal à 22s calculé au paragraphe précédent.

VII.3. Atterrissage automatique

Pour réaliser un atterrissage à partir d'une vitesse de croisière donnée, l'idée est de cabrer progressivement l'aéronef de façon à diminuer progressivement sa vitesse sol v_x . La boucle visuo-motrice devrait faire le reste en diminuant conjointement la hauteur sol de l'aéronef de façon à maintenir constant le rapport $v_x/h=\omega$. Cette *régulation de flux optique* devrait permettre à l'aéronef de se poser au sol à vitesse nulle.

La figure VII.6 montre les trajectoires obtenues en boucle ouverte et en boucle fermée lorsqu'on impose à l'aéronef un cabrage progressif en rampe (l'angle de tangage passe de 10° à 0° en 10 secondes), qui vient réduire progressivement sa vitesse sol. On constate qu'en boucle ouverte (figure VII.6a, trajectoires en pointillés), l'aéronef ne réussit pas à atterrir car sa poussée est maintenue à un niveau constant.

Inversement, en boucle fermée, l'aéronef atterrit, en surmontant les perturbations, notamment celle due au moment de la force centrifuge (qui rappelle l'aéronef vers le haut) et celle due à l'effet de sol (qui tend à contrecarrer sa descente au sol).

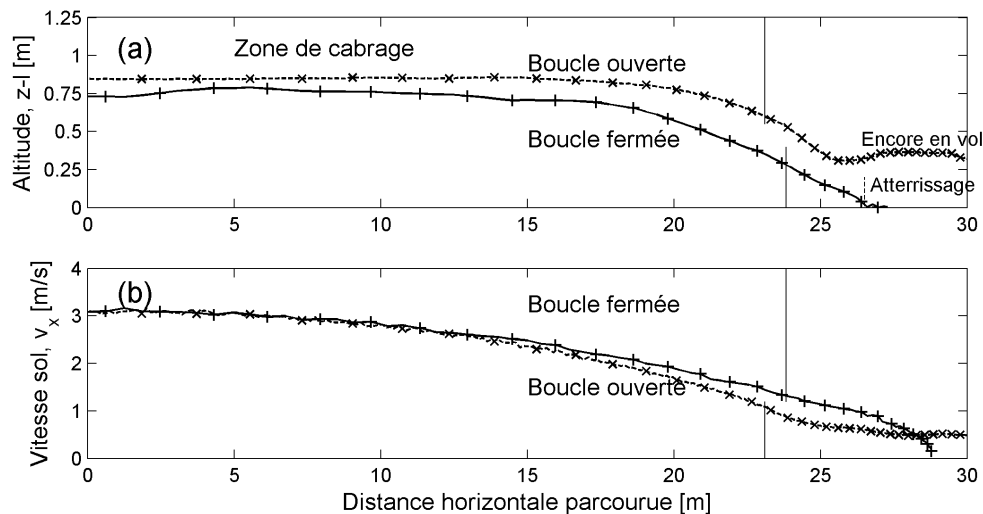


Figure VII.6 Trajectoires de l'aéronef lors d'un cabrage progressif, en boucle ouverte et en boucle fermée

L'aéronef diminue son angle de tangage dans la zone de cabrage : il en résulte une diminution progressive de sa vitesse par rapport au sol (b).

Boucle ouverte (courbes en pointillés) : L'aéronef ne réussit pas à atterrir car sa sustentation ne diminue pas suffisamment.

La sustentation diminue car la force centrifuge et le moment qui lui est associé décroissent avec la vitesse sol. Lorsqu'une vitesse sol de l'ordre de 1,5m/s est atteinte, l'effet de la force centrifuge devient négligeable (cf. chapitre V) et la force de sustentation de l'aéronef dépend uniquement de sa poussée, qui demeure à un niveau constant en boucle ouverte correspondant à une altitude (cf. para. V.4.3). Ainsi, l'aéronef demeure en vol et n'atterrit pas (a).

Boucle fermée (courbes en traits pleins): Le cabrage de l'aéronef entraîne un atterrissage automatisé. Le robot décélère progressivement et dès que sa vitesse sol diminue (b), sa hauteur sol h diminue nécessairement car elle est sous le contrôle actif de la *boucle de régulation du flux optique* (a). Il en résulte un atterrissage automatisé, avec une vitesse sol proche de zéro au point de contact avec le sol.

Les cinq trajectoires superposées en figure VII.7 montrent que cette simple *régulation de flux optique* conduit à des atterrissages reproductibles et fiables. Comme précédemment, le pilote automatique conduit à une diminution progressive de la hauteur sol et de la vitesse sol.

Le temps nécessaire à l'aéronef pour atterrir dépend de la vitesse de cabrage. Mais, il dépend également de la « dynamique de déplacement » entre l'angle de tangage du robot et la vitesse par rapport au sol (qui inclut ici l'inertie du banc de test).

On peut remarquer que sur ces essais (figures VII.6 et VII.7), la vitesse sol n'est pas nulle lorsque l'aéronef touche le sol à l'atterrissage mais reste de l'ordre de 1m/s . Or, pour des raisons de sécurité, l'aéronef est muni d'un train d'atterrissage tel que la hauteur sol de l'œil à l'atterrissage est de $h=0,3m$.

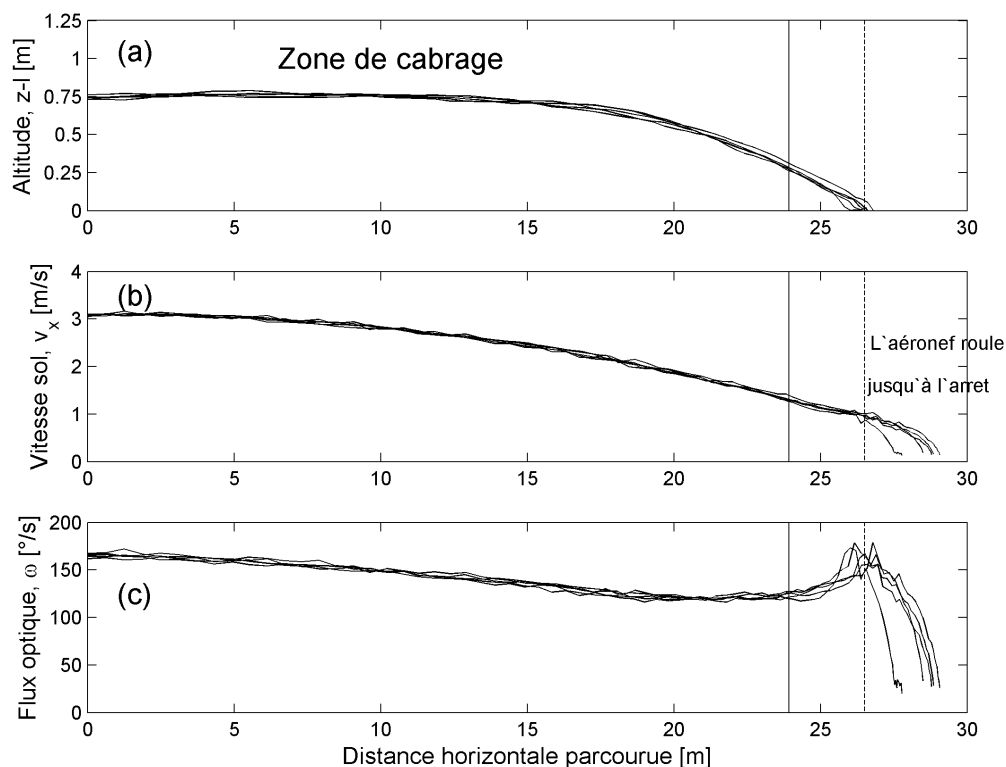


Figure VII.7 Manœuvres d'atterrissage automatique sous contrôle visuel.

(a) C'est un simple cabrage progressif de l'aéronef (ici réalisé de façon linéaire en fonction du temps dans la zone dite « de tangage ») qui commande l'atterrissage. Ces cinq trajectoires d'atterrissage superposées en montrent la reproductibilité.

(b) Lorsque le micro-aéronef touche le sol, son rotor s'arrête. Emporté par son élan, l'aéronef roule avant de s'arrêter quelques mètres plus loin.

(c) Le régulateur de flux optique tend à maintenir le flux optique à une consigne de 150°/s tout au long de la descente. Le flux optique augmente un peu lorsqu'il touche le sol mais l'appareil atterrit.

VII.4. Réaction au vent

Dans ce dernier jeu d'expériences, la course du robot a été délibérément perturbée par un vent de face (produit par un ventilateur, cf. chapitre V). Nous avons montré en effet au chapitre III que le vent constitue une perturbation de sortie importante susceptible de modifier la vitesse sol.

En boucle ouverte, l'altitude de l'aéronef n'est pas modifiée par cette perturbation.

En boucle fermée, par contre, lorsqu'un vent *arrière* vient augmenter la vitesse de l'aéronef par rapport au sol, le pilote automatique OCTAVE réagit en augmentant l'altitude de l'appareil, de façon à maintenir le flux optique constant (trajectoire non montrée ici).

En présence d'un vent de face, au contraire, la vitesse sol de l'aéronef diminue nécessairement et la réaction du pilote automatique OCTAVE devrait être alors de diminuer parallèlement l'altitude de façon à toujours maintenir le flux optique constant. C'est exactement ce qu'on observe expérimentalement, comme le montre la figure VII.8. Ici, la vitesse sol originelle est de 1,3m/s et la vitesse du vent de face atteint 0,5 m/s. On voit que le robot en présence d'un vent de face se rapproche automatiquement du sol (Figure VII.8, trajectoires en trait pointillé, correspondant à un faible vent de face, de 0,5m/s). En sortant de la zone ventée, l'aéronef n'est plus ralenti par le vent donc sa vitesse augmente et l'on voit l'appareil reprendre de l'altitude pour maintenir encore son flux optique ventral constant.

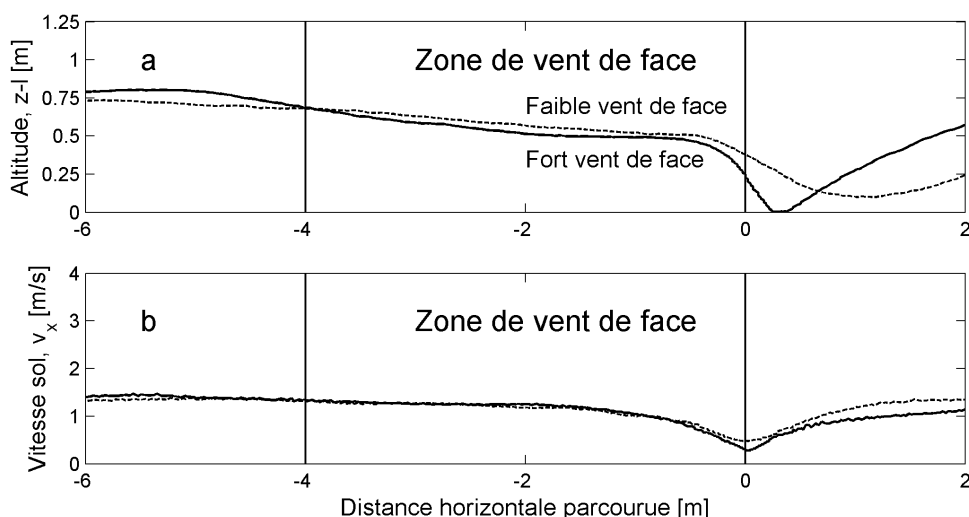


Figure VII.8 Réaction de l'aéronef équipé du pilote automatique OCTAVE en présence d'un vent de face (en trait pointillé : faible vent de face $v_{vent} \approx 0,5\text{m/s}$; en trait plein : fort vent de face $v_{vent} \approx 1,5\text{m/s}$)

On voit en (b) que tout vent de face réduit la vitesse sol.

Le pilote automatique OCTAVE réagit en diminuant automatiquement la hauteur du robot par rapport au sol (a). Plus le vent est fort, plus le mini-robot aérien se rapproche du sol, jusqu'à atterrir face au vent à une vitesse judicieusement faible (trait plein). Comme ce démonstrateur aérien n'a que peu de prise au vent, nous lui avons ajouté un plan (30cm $\times$ 20 cm) monté perpendiculairement à l'axe de déplacement, de façon à augmenter sa prise au vent.

Si, à présent, l'aéronef affronte un fort vent de face ($v_{vent} \approx 1,5\text{m/s}$), sa vitesse sol diminue

jusqu'à atteindre une valeur proche de zéro (Figure VII.8, trajectoires en traits pleins). Ainsi, l'aéronef amorce automatiquement un « atterrissage forcé », mais il le fait en toute sécurité puisque sa vitesse sol est considérablement réduite au moment où il prend contact avec le sol (Figure VII.8, trajectoire en trait plein, $v_{vent} \approx 1,5 \text{ m/s}$ et $v_x \approx 0,3 \text{ m/s}$).

Un *micro-switch* (microcontact) monté sur le train d'atterrissage aurait pu facilement arrêter le rotor au moment de l'atterrissage. Comme nous ne l'avons pas installé ici, on voit la vitesse sol augmenter de nouveau dès que l'appareil quitte la zone ventée (centrée autour de l'altitude $z=1\text{m}$ et limitée en excursion verticale -cf. chapitre V-). Le robot redécolle alors automatiquement, maintenant encore constant le flux optique v_x/h . Dans sa quête de maintenir constant le rapport entre la hauteur sol et la vitesse sol, le pilote automatique OCTAVE fait en sorte que ces deux variables varient toujours conjointement.

Après avoir présenté les comportements parfois surprenants de l'aéronef équipé du pilote automatique OCTAVE, il est judicieux de comparer ces comportements à ceux des insectes dans le chapitre Discussion.

VIII. Discussion

<i>VIII.1. Discussion générale sur le pilote automatique OCTAVE.....</i>	<i>154</i>
<i>VIII.2. Modélisation de l'atterrissage automatique.....</i>	<i>155</i>
<i>VIII.3. Comparaison avec les insectes</i>	<i>162</i>
<i>VIII.4. Recherches connexes.....</i>	<i>166</i>
<i>VIII.5. Les autres domaines d'application du pilote automatique OCTAVE.....</i>	<i>169</i>

VIII.1. Discussion générale sur le pilote automatique OCTAVE

Les précédents travaux de navigation aérienne basés sur le flux optique (notamment Mura et Franceschini, 1994) s'attachaient à estimer la distance aux obstacles à partir de l'information du flux optique. Or, une telle estimation demande la connaissance de la vitesse par rapport au sol. Si la connaissance de la vitesse par rapport au sol est relativement aisée à obtenir pour un robot terrestre, directement en contact avec le sol, la vitesse sol est plus difficile à évaluer par un aéronef, et sa mesure nécessite en général un équipement dédié du type radar-Doppler ou vélocimétrie laser.

En choisissant de réguler directement le flux optique ventral (c'est-à-dire le rapport entre la vitesse sol et la hauteur sol : v_x/h), nous avons montré que la régulation de ce rapport par réglage de la poussée conduit à un suivi de terrain et à l'évitement de collision sol. Ce suivi de terrain a pour propriété intéressante qu'il conduit à une hauteur sol croissant automatiquement avec la vitesse sol et pouvant ainsi être qualifiée de « hauteur de sécurité ». Nous avons également montré qu'une simple variation de la force propulsive permettait, en régulant ce rapport v_x/h , d'engager une manœuvre de décollage ou d'atterrissage *sans aucune connaissance explicite ni de la hauteur sol ni de la vitesse sol*. Un aéronef équipé d'OCTAVE serait donc incapable de retransmettre au sol par télémessure et la distance qui le sépare du sol et sa vitesse par rapport au sol.

Nous avons également montré qu'une perturbation de vent ne fragilisait aucunement la boucle de régulation et ne mettait pas en danger l'aéronef. En maintenant le rapport vitesse sol sur hauteur sol constant lors d'un vent arrière, l'aéronef augmente sa poussée de manière à rétablir une hauteur sol compatible à sa vitesse sol accrue.

De plus, en présence d'un fort vent de face, dont la vitesse s'approche de la vitesse par rapport à l'air de l'aéronef, celui-ci, plutôt que de reculer (emporté par le vent) se voit contraint d'atterrir. Cette réaction minimaliste est énergétiquement intéressante et sûre puisque cet atterrissage se fait à vitesse nulle.

Ainsi, dans tous les cas, l'aéronef équipé d'OCTAVE maintient sa hauteur sol proportionnelle à sa vitesse sol ; une propriété qui s'avère très intéressante sur le plan de la sécurité.

L'inutilité d'une connaissance explicite de la vitesse sol et de la hauteur sol, propre au pilote automatique OCTAVE, permet à un aéronef de s'affranchir d'un grand nombre de capteurs appartenant à l'avionique traditionnelle, à savoir :

- le tube *Pitot* pour mesurer la vitesse par rapport à l'air,
- le radar-Doppler pour mesurer la vitesse par rapport au sol,

- le radio-altimètre pour mesurer la hauteur sol,
- l'altimètre barométrique pour mesurer l'altitude absolue.
- le variomètre pour mesurer la vitesse de descente,

On peut d'ailleurs remarquer que -dans la limite de nos connaissances actuelles- cette avionique inventée pour les aéronefs au cours du siècle passé est absente de la suite de capteurs présente chez les insectes.

L'hypothèse évoquée par Kennedy d'une « vitesse rétinienne préférée » est devenue réaliste à partir du moment où l'on a démontré (20 ans après l'hypothèse de Kennedy en 1939) l'existence de *neurones détecteurs de mouvement* dont on peut dire qu'ils sont capables d'estimer le flux optique.

Revue ici dans le cadre de notre travail, l'hypothèse de Kennedy implique que les détecteurs élémentaires de mouvements sont sensibles au flux optique dans une certaine plage de mesure, plus ou moins étendue (cf. figure IV.24), plage au milieu de laquelle se situerait le flux optique maintenu constant. L'avantage est que la sensibilité et la résolution de ces détecteurs pourraient être optimisées à l'intérieur de cette plage de mesure.

Réguler le flux optique autour d'une valeur constante à l'aide d'un bouclage visuomoteur permet de limiter les contraintes de *filtrage* imposées au traitement DEM. En effet, la conversion des fréquences spatiales en fréquences temporelles (cf. équation IV.15 : $f_t = \omega \cdot v$) se réaliserait à flux optique constant. C'est à dire que l'étendue de la gamme de fréquences temporelles dépendrait seulement de l'étendue du spectre de fréquences spatiales. De plus, le filtre spatial passe-bas borne la fréquence maximum du spectre de fréquences spatiales et par là-même le spectre de fréquence temporel du signal visuel. Une telle limitation du spectre des signaux temporels facilite alors le positionnement des fréquences de coupure du filtre temporel passe-bande du traitement DEM. Il en résulte que les signaux visuels issus de diverses vitesses sol et hauteurs sol peuvent être traités à l'aide d'un traitement DEM à paramètres *constants*. Le traitement DEM ne nécessite donc ni adaptation, ni apprentissage de ces paramètres ce qui n'exclut pas qu'adaptation et apprentissage puissent exister pour d'autres raisons.

VIII.2. Modélisation de l'atterrissage automatique

Nous avons vu (Chapitre VII) que le pilote automatique OCTAVE permet d'atterrir à vitesse nulle. On constate que la trajectoire d'atterrissage, dans sa phase finale, est linéaire (Figure VIII.3), et nous allons démontrer ici que cette allure particulière de la trajectoire est une

conséquence du principe du maintien du flux optique.

Hypothèses :

1. Supposons le flux optique $\omega(t)$ parfaitement régulé à chaque instant à la valeur de consigne :

$$\omega(t) = \frac{v_x(t)}{h(t)} = Cste \quad \text{Équation VIII.1}$$

2. Considérons la fonction de transfert du premier ordre liant la vitesse v_x de l'aéronef à l'angle de tangage Θ (cf. équation V.25) :

$$\frac{\Delta v_x(p)}{\Delta \Theta(p)} = G_v(p) = \frac{H_0}{\tau \cdot p + 1} \quad \text{Équation VIII.2}$$

Étudions tout d'abord l'allure de la trajectoire d'atterrissage lors d'une variation en échelon du tangage.

Variation en échelon de l'angle de tangage

A l'instant $t=0$, appliquons sur l'aéronef en vol de croisière, incliné en tangage d'un angle Θ_0 (conduisant à une vitesse sol v_0), un échelon de cabrage d'un angle $\Delta\Theta = -\Theta_0$:

$$\Theta = \begin{cases} \Theta_0 & \text{si } t < 0 \\ 0 & \text{si } t \geq 0 \end{cases} \Rightarrow \Delta\Theta = -\Theta_0 \quad \text{Équation VIII.3}$$

La vitesse sol v_x et la vitesse de descente v_z s'expriment en fonction du temps par :

$$\Rightarrow \begin{cases} v_x(t) = v_0 = H_0 \times \Theta_0 \text{ pour } t \leq 0 \\ v_x(t) = v_0 - v_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = v_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \text{ pour } t > 0 \\ v_z(t) = \frac{dh}{dt} = \frac{dv_x}{dt} \frac{1}{\omega} \quad \forall t \end{cases} \quad \text{avec } \begin{cases} v_0 = H_0 \times \Theta_0 \\ \omega = Cste \end{cases} \quad \text{Équation VIII.4}$$

On exprime alors $v_z(t)$ en fonction de $v_x(t)$:

$$\begin{cases} v_x(t) = v_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \\ v_z(t) = -\frac{v_0}{\omega\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} \end{cases} \Leftrightarrow v_z(t) = -\frac{1}{\omega\tau} v_x(t) \quad \text{Équation VIII.5}$$

La simulation de ce système d'équations (équations VIII.1, VIII.2 et VIII.3) confirme que l'aéronef descend à pente constante $-1/\tau\omega$ conformément à l'équation VIII.5 (Figure VIII.1).

Ainsi, prouvons-nous que la régulation du flux optique permet, à elle seule, de maintenir implicitement cette pente de descente constante, sans qu'il soit besoin de l'évaluer à l'aide de

capteurs (l'aéronautique traditionnelle utilise, pour assurer un angle de descente constant des aéronefs, un équipement lourd, au sol et à bord, du type ILS -Instrument Landing System-).

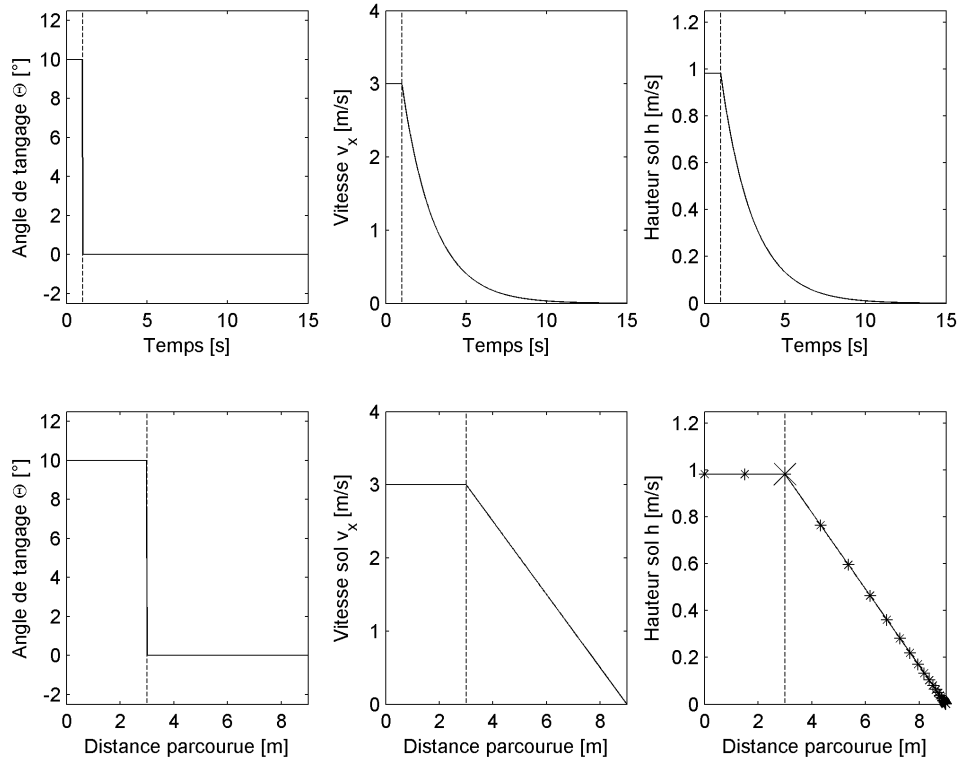


Figure VIII.1 Simulation des trajectoires théoriques d'un aéronef ($\omega=175^\circ/\text{s}$) pour un échelon de tangage (incluant la dynamique de déplacement : $\tau=2\text{s}$). Le trait pointillé indique l'instant et le point de la trajectoire où l'échelon de cabrage a été appliqué à l'aéronef.

Variation temporelle arbitraire de l'angle de tangage

On cabre l'aéronef jusqu'à rétablir un tangage nul en $t=t_0$. La variation de l'angle de tangage de l'aéronef atteint $\Delta\Theta=-\Theta_0$ en $t=t_0$.

$$\Theta(t_0) = 0$$

$$v_x(t_0) = v'_0$$

Équation VIII.6

Changeons de repère : soit $t'=t-t_0$

Étudions la trajectoire de l'aéronef lorsque le système n'est plus soumis à la variation de tangage : le système devient alors libre. Par une démonstration analogue à la démonstration ci-dessus, on exprime $v_z(t)$ en fonction de $v_x(t)$:

$$\begin{cases} v_x(t') = v'_0 e^{-\frac{t'}{\tau}} & \text{pour } t' \geq 0 \text{ soit } t \geq t_0 \\ v_z(t') = \frac{dv_x}{dt'} \frac{1}{\omega} & \text{pour } \forall t' \end{cases}$$

$$\Rightarrow v_z(t') = -\frac{1}{\omega\tau} v_x(t')$$

Équation VIII.7

L'équation VIII.7 conclut également au maintien d'une pente constante dès lors que le tangage ne varie plus.

La simulation d'une variation linéaire (en rampe) de l'angle de tangage (à partir des équations VIII.1, VIII.2 et VIII.6) (Figure VIII.2) - variation analogue à celle réalisée expérimentalement sur l'aéronef (Figure VII.7) - confirme que l'aéronef atteint le sol en suivant encore une trajectoire linéaire de pente $-1/\tau\omega$, conformément à l'équation VIII.7.

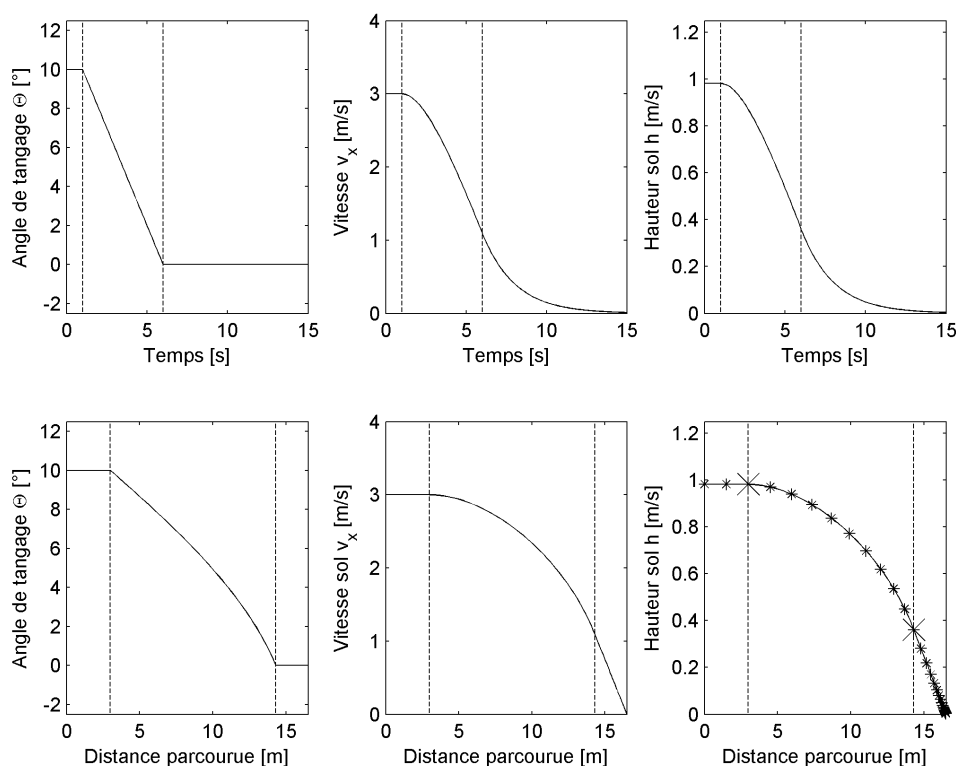


Figure VIII.2 Simulation des trajectoires théoriques d'un aéronef ($\omega=175^\circ/\text{s}$) pour une rampe de tangage effectuée en 5 secondes (incluant la dynamique de déplacement : $\tau=2\text{s}$). Les traits pointillés indiquent successivement l'instant de départ de la rampe de cabrage et l'instant de fin de la rampe de cabrage. On constate qu'à partir de la fin de la rampe de cabrage, l'atterrissage s'effectue à pente de descente constante.

La conclusion est qu'un aéronef soumis à une régulation de flux optique (système OCTAVE), et pourvu d'une dynamique de déplacement, décrit nécessairement une trajectoire d'atterrissage ayant une asymptote de pente $-1/\tau\omega$ dans le plan (x, h) . Cette pente dépend uniquement du produit de la constante de temps mécanique τ de l'aéronef par le flux optique maintenu. Le maintien d'un angle constant durant la descente résulte donc à la fois de la dynamique de déplacement (modélisée sous la forme d'un système du premier ordre) et de la loi de commande (qui impose une *régulation du flux optique*). Preuve est donc apportée que pour obtenir l'atterrissage d'un aéronef à pente constante, $k_{h/x}$, n'est nullement nécessaire de

mesurer ni la vitesse de descente v_z (au moyen d'un variomètre) ni la vitesse par rapport au sol (au moyen d'un radar-Doppler) ni de faire appel à un équipement lourd de type ILS :

$$k_{h/x} = -\frac{1}{\tau\omega} \quad \text{Équation VIII.8}$$

Nous aboutissons ainsi au résultat que le maintien d'une pente de descente constante est *automatique* : il s'agit d'une conséquence de la stratégie utilisée et aucunement d'un pré-requis, contrairement à une conclusion énoncée précédemment pour l'atterrissage de l'abeille (Srinivasan et al., 2000) (cf. au paragraphe p.161 de ce chapitre).

Pente de la descente finale du robot OCTAVE

Lisons sur les trajectoires du robot équipé d'OCTAVE sa pente de descente (Figure VIII.3).

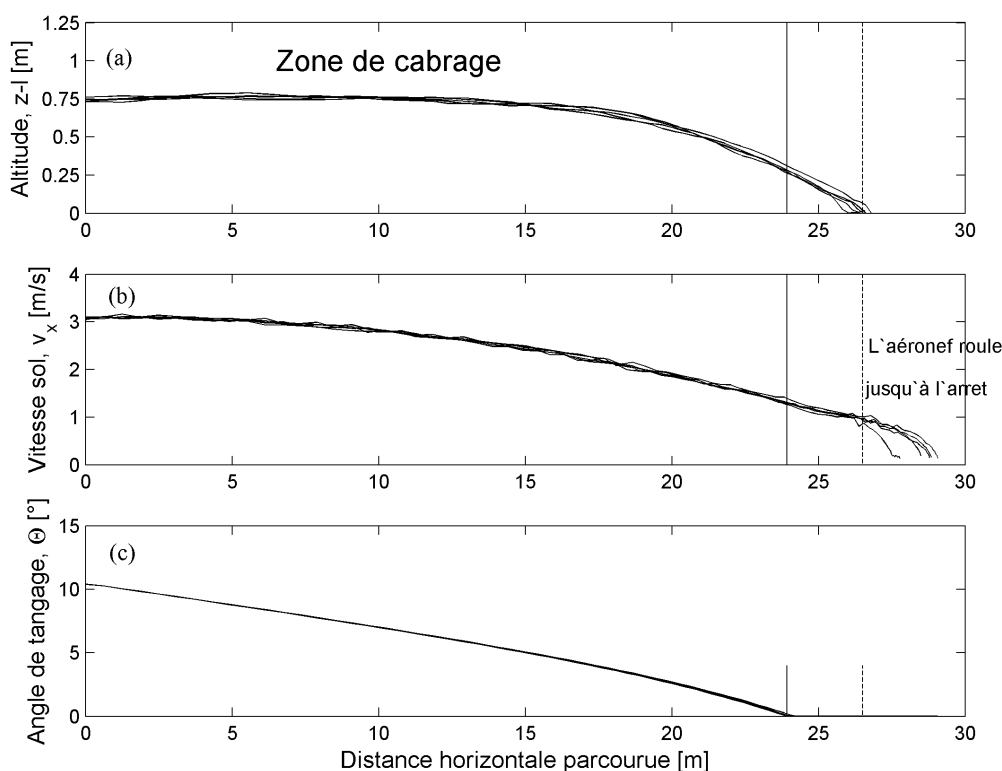


Figure VIII.3 Dès lors que l'aéronef est parfaitement redressé, le robot OCTAVE maintient une pente constante dans la phase finale de son atterrissage (trajectoire (a)).

Lecture graphique de la pente de la descente finale :

Soit une variation en h de 0,5m en en 3,75 m de distance parcourue

$$k_{h/x} \approx -0,5/3,75 \approx -0,13$$

Calculons la pente de descente du robot.

Calcul de $-1/\tau\omega$:

avec $\omega = 175^\circ/\text{s}$ et $\tau \approx 2,15\text{s}$ (conformément à l'identification réalisée au chapitre V)

$$-1/\tau\omega \approx -0,15$$

Ceci montre qu'à partir du moment où l'angle de tangage a été ramené à zéro (suite à la phase transitoire plus ou moins longue), le robot a bien une pente de descente voisine de $-1/\tau\omega$.

Pente de la descente finale des abeilles

Analysons maintenant 3 trajectoires d'atterrissage d'abeilles en mesurant la pente finale de leur descente (pente qu'elles semblent maintenir une fois parvenues à une altitude inférieure à environ 10cm).

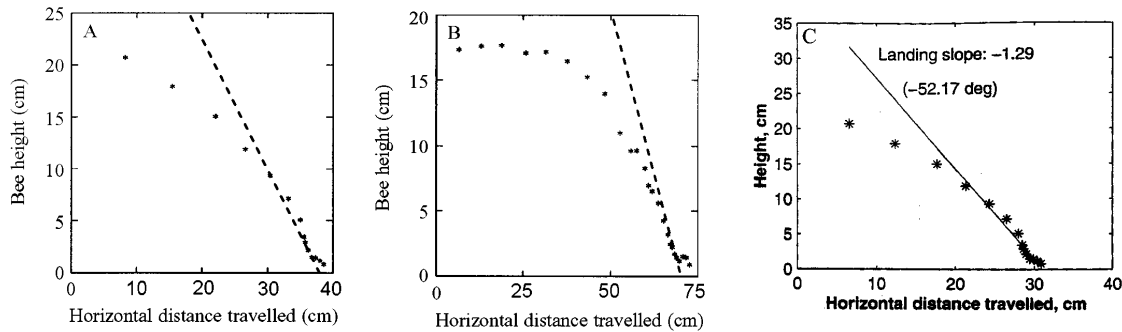


Figure VIII.4 Trois trajectoires d'atterrissage enregistrées chez diverses abeilles

Atterrissage A : Selon les auteurs, le flux optique a été maintenu à $\omega_A=480^\circ/s$ (Srinivasan et al.1996). On évalue graphiquement la pente à $k_{A_{h/x}} \approx -1,25$.

Atterrissage B : Selon les auteurs, le flux optique a été maintenu à $\omega_B=410^\circ/s$ (Srinivasan et al.1996). On évalue graphiquement la pente à $k_{B_{h/x}} \approx -1$.

Atterrissage C : Selon les auteurs, le flux optique a été maintenu à $\omega_C=478^\circ/s$ et la pente, lue graphiquement, est de $k_{C_{h/x}} \approx -1,29$ dans le plan (x, h) (Srinivasan et al. 2000).

Évaluons, à partir de la pente de descente finale de l'abeille, la constante de temps de sa fonction de transfert de déplacement :

$$\tau = -\frac{1}{k_{h/x} \cdot \omega} \quad \text{Équation VIII.9}$$

Application Numérique :

$$\tau_A \approx 0,095s ; \tau_B \approx 0,14s ; \tau_C \approx 0,093s$$

Pour 3 trajectoires différentes d'abeille, on retrouve une constante de temps mécanique du même ordre, à savoir environ 0,1s , valeur qui apparaît semble compatible avec la petite taille (1cm) de cet aéronef naturel.

Ainsi, sommes-nous enclins à établir un parallèle entre les courbes d'atterrissage du robot OCTAVE et celles des abeilles.

Il apparaît plausible que les 2 systèmes répondent à la même modélisation :

1. Régulation du flux optique ventral
2. Réponse du premier ordre pour la fonction de transfert de déplacement

Ceci rend probable que le comportement de l'abeille résulterait lui aussi d'une véritable régulation du flux optique ventral comme celle qui est utilisée dans le système OCTAVE.

Remise en cause de la modélisation de l'atterrissage de l'abeille selon Srinivasan et al., 2000

Notre modélisation remet en cause la stratégie d'atterrissage proposée par Srinivisan et collègues (Srinivasan et al. 2000), qui imposait 2 pré-requis :

1. Maintenir un angle de descente constant (sans que soit précisé d'ailleurs comment serait mesuré cet angle),
2. Réguler le flux optique en ajustant la vitesse par rapport au sol (sans préciser comment cette vitesse sol pourrait être mesurée).

D'ailleurs, la stratégie proposée par Srinivasan et ses collègues (Srinivasan et al. 2000) a été difficile à mettre en œuvre (voir échec de la mise en œuvre sur un avion : Chahl et Srinivasan 2004) :

- Il est apparu difficile de maintenir un angle de descente constant sans mesurer ni la vitesse de descente (par exemple, en dérivant le signal délivré par un radio-altimètre), ni la vitesse sol (par exemple, avec un radar-Doppler).
- Un aéronef ne peut agir directement sur sa vitesse sol mais seulement sur sa vitesse par rapport à l'air. Et la mesure d'une vitesse sol est difficile puisqu'elle exige d'embarquer, par exemple, un radar-Doppler.

Le principe d'atterrissage mis en œuvre sur un aéronef à voilure tournante proposé dans ce mémoire consiste, beaucoup plus simplement, à réguler le flux optique ventral en ajustant la poussée lors d'un cabrage déclenché par l'aéronef (Ruffier Franceschini 2004). Ce principe est peu exigeant en termes d'avionique (il n'exige qu'un capteur de flux optique) et il est biologiquement plausible au sens où il ne nécessite qu'une mesure de flux optique et une covariance de la force de sustentation et de poussée, toutes deux présentes chez les insectes (cf. chapitre II).

Application à un hélicoptère de grande taille

Un hélicoptère de plusieurs tonnes aura une constante de temps mécanique τ relativement importante de l'ordre de plusieurs dizaines de secondes. Il est également souhaitable pour certains atterrissages (par exemple sur un héliport) de maintenir un angle de descente $k_{h/x}$ important, de l'ordre de 45° . Avec le système proposé ici, sachant que la pente $k_{h/x} = -1/\tau\omega$, il suffirait de jouer sur la consigne de flux optique pour modifier le flux optique maintenu ω et ainsi pour obtenir l'angle de descente désiré.

Application numérique avec $k_{h/x}=-1$ (pente de 45°) et $\tau=20s$

$$\omega \approx 3^\circ/s$$

La mesure d'un flux optique aussi faible pourrait poser problème avec un œil comme celui du robot OCTAVE, dont l'angle inter-récepteur est élevé ($\Delta\phi_1=4^\circ$). Il pose moins de problème pour un œil comme l'œil humain dans lequel l'angle inter-récepteur peut descendre à une minute d'angle (soit un soixantième de degré) dans la fovéa. Par ailleurs, des travaux récents du laboratoire (Mura, 1995; Mura et Franceschini, 1996) ont montré que l'ajout d'une vibration rétinienne permet de mesurer de faibles flux optiques de translation.

L'analogie avec les insectes ne s'arrête pas à l'atterrissage, intéressons-nous maintenant aux autres comportements.

VIII.3. Comparaison avec les insectes

Outre les principes du pilote automatique OCTAVE (maintien d'une consigne de flux optique ventral, commande de la vitesse par rapport à l'air grâce à l'angle de tangage, covariance de la poussée et de la force de sustentation), les trajectoires générées par le robot concordent également avec les trajectoires générées par leur contrepartie biologique.

Le suivi de terrain

Le comportement des insectes en présence d'obstacles (voir Figure VIII.5) peut se comparer qualitativement au comportement de suivi de terrain du robot OCTAVE (chapitre VII).

Williams (1965) décrit ainsi le comportement de papillons face à l'obstacle : « [les papillons] préfèrent voler au-dessus de l'obstacle plutôt que de le contourner ». Il ajoute : « Lorsque les papillons doivent traverser des vallées profondes, ils volent vers le fond du ravin avant de le traverser ». Cette observation est compatible avec le principe de régulation du flux optique énoncé et mis en œuvre sur le mini-robot aérien.

Il ajoute encore : « Lorsqu'un arbuste se trouve sur leur passage, les papillons blancs volent jusqu'à sa cime et redescendent de l'autre côté ; pourtant, un détour de quelques mètres leur aurait permis de minimiser leurs efforts ». Il est clair qu'un tel comportement ne peut résulter que d'une action réflexe et non d'un choix longuement « réfléchi ».

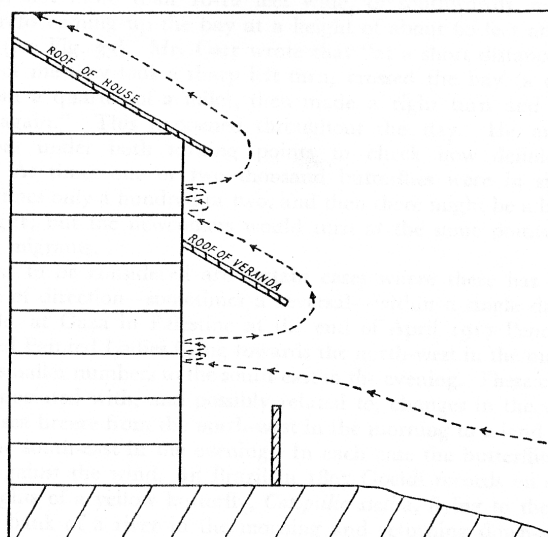


Figure VIII.5 Trajectoire de papillons blancs (*G. aurota*) au cours de leur migration en Afrique de l'est, lorsqu'ils rencontrent une habitation sur leur chemin.

Les papillons butent à plusieurs reprises contre l'habitation avant de s'élever dans les airs pour éviter « l'obstacle » au sol. Cette trajectoire du papillon semble conserver une distance de sécurité par rapport au sol mais anticipe peu sur les obstacles futurs.

(Williams 1965)

Pareillement, lorsqu'un bousier rencontre une haie sur son chemin, sa réaction est de gravir automatiquement cet obstacle et de redescendre immédiatement derrière lui (Steiner 1953).

La mesure de verticalité

La mise en œuvre du système OCTAVE nécessite la mesure d'une référence de verticalité pour contrebalancer l'orientation du regard par rapport aux variations de l'angle de tangage de l'aéronef.

Or les modalités et l'existence même d'une telle mesure demeurent méconnues chez les insectes.

Seuls les diptères (les mouches par exemple) possèdent des balanciers qui leur permettent d'évaluer la vitesse angulaire de leur corps. Par suite de la dérive des capteurs, il semble difficile d'intégrer l'information de vitesse angulaire pour en déduire une information fiable de la position angulaire.

Les insectes utilisent peut-être d'autres indices visuels ou un autre système visuel pour évaluer la verticalité. Srinivasan a émis l'hypothèse que les insectes se fient à la verticalité des arbres et des herbes (Srinivasan 1977). Stange et al. ont mis en évidence la possibilité pour les insectes de détecter l'horizon grâce leur *ocelles* (œil miniature présent sur la partie dorsale de la tête des insectes) (Stange 1981). Mais cette mesure n'est valable que dans le cas où l'horizon

est bien dégagé et ne saurait permettre à un insecte de voler à l'intérieur d'un bâtiment.

Le décollage

La vision du mouvement peut permettre de décoller en toute sécurité en présence de relief (Figure VIII.6). Mais ce type de décollage serait relativement inefficace pour fuir un prédateur. Le criquet commence à voler après s'être propulsé dans les airs (avec ses pattes postérieures) (Pearson et al. 1986). On peut penser que cette propulsion dans les airs se fait en boucle ouverte (Figure VIII.6) avant que n'intervienne la régulation de flux optique, et ceci afin de maximiser les chances de survie. De façon similaire, les mouches utilisent leurs pattes médianes pour se catapulte dans les airs avant de déclencher leur vol.

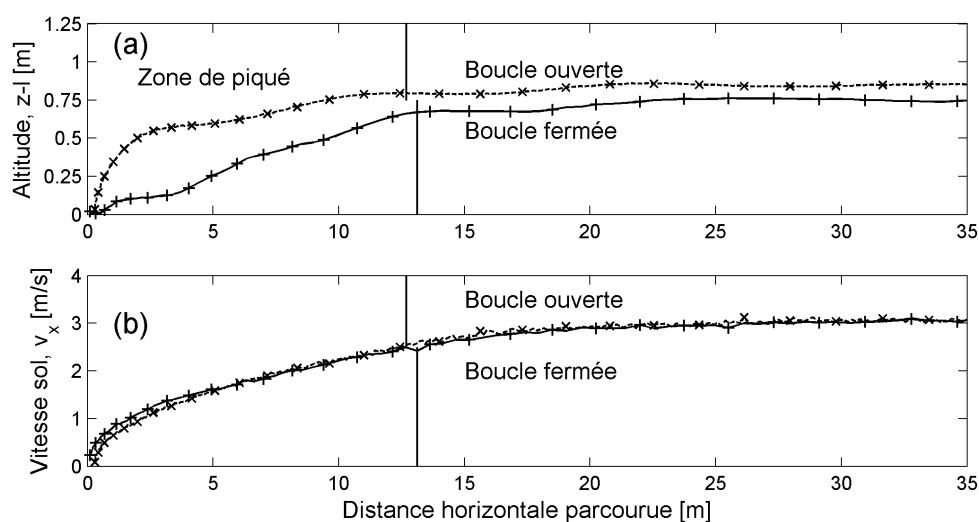


Figure VIII.6 Trajectoires de l'aéronef lors d'un basculement en avant de son corps (« zone de piqué ») qui augmente sa vitesse sol tant en boucle ouverte qu'en boucle fermée (b).

Boucle ouverte : Échelon sur la vitesse du rotor afin d'atteindre l'altitude de croisière : le robot s'élève rapidement dans les airs sans aucun contrôle (a).

Boucle fermée : Commande en boucle fermée de la poussée, par régulation du flux optique, lors de l'augmentation de la vitesse sol : l'aéronef s'élève progressivement dans les airs en toute sécurité (a).

L'atterrissage

Nous avons vu (chapitre VII) que le pilote automatique OCTAVE permet d'atterrir automatiquement à vitesse nulle ; or, on sait que les insectes atterrissent sans avoir besoin de piste aménagée. Preiss et Kramer rapportent également une « réaction d'atterrissage » (c'est-à-dire le déploiement des pattes antérieures) chez la mite lorsque l'insecte atteint une vitesse nulle par rapport au sol (Preiss et Kramer 1984).

La réaction au vent

Le robot aérien réagit aux perturbations de vent en modifiant son altitude, maintenant par là-

même le flux optique ventral constant (voir chapitre VII).

Une réaction analogue a été observée chez les insectes :

- Kennedy (1939) décrit que les moustiques atterrissent lorsque le vent forçit.
- Kennedy (1951) décrit que les criquets augmentent leur altitude en présence de vent arrière jusqu'à une altitude maximum. Par vent de face au contraire, ils diminuent leur altitude jusqu'à se poser lorsque le vent est trop fort. Il attribue ce comportement à la mesure d'une « déviation par rapport à une vitesse rétinienne tolérée ou préférée ».
- Steiner (1953) décrit avec précision comment un bousier diminue son altitude en présence de vent de face et l'augmente en présence de vent arrière (Steiner 1953).
- Lors de la traversée d'un lac, les abeilles sont quelque peu ralenties par le vent lorsqu'elles volent au dessus de l'eau ($v_{\text{eau}}=6,43\text{m/s}$) mais elles ne le sont plus lorsqu'elles se retrouvent au dessus de la terre ferme ($v_{\text{terre}}=8,2\text{m/s}$) (Heran et Lindauer 1963). Les auteurs ont alors évalué leur hauteur sol dans chacun des 2 cas : cette hauteur correspond respectivement à $h_{\text{eau}}\approx 1,5\text{m}$ et à $h_{\text{terre}}\approx 2,5\text{m}$. On remarque que ces deux variables, vitesse et hauteur, évoluent de concert, l'abeille maintenant un flux optique sensiblement constant de l'ordre de $200^\circ/\text{s}$.
- Les mites maintiennent leur flux optique constant en présence d'un vent simulé (Preiss Kramer 1984).

Puisque le vent est connu pour augmenter avec l'altitude, de quelques mètres quelques centaines de mètres (cf. Chapitre III), la réaction de l'appareil est appropriée au profil vertical de la vitesse moyenne du vent. En effet, dans le cas d'un vent arrière, il est énergétiquement efficace que le robot augmente son altitude pour profiter d'un vent plus fort.

Pareillement, dans le cas d'un vent de face il est énergétiquement efficace de diminuer son altitude afin de subir un vent plus faible et de ne pas s'épuiser contre un vent fort. Des comportements étonnamment semblables ont été observés chez les insectes et les oiseaux :

- Kennedy rapporte à propos des criquets migrateurs : « Plus le vent est fort, plus les criquets s'élèvent dans les airs » (Kennedy 1951).
- Alerstam rapporte que la densité d'oiseaux est la plus élevée aux altitudes où les vents de face sont les plus faibles et aux altitudes où les vent arrières les plus forts (Alerstam 1990) (voir Figure VIII.7). Prenant en considération l'accroissement de la vitesse du vent avec l'altitude, nous avons démontré graphiquement qu'un aéronef maintenant son flux optique aurait effectué des variations d'altitude comparables à celles des oiseaux. L'aéronef atteint soit une altitude où les vents arrières sont les plus forts, soit une altitude où les vents de face sont les plus faibles (cf. chapitre III).

Pour de forts vents de face, une réaction similaire a été décrite chez les insectes volants et les

oiseaux à celle de l'atterrissage forcé du robot OCTAVE (chapitre VII). Le cygne chanteur qui migre entre l'Islande et l'Écosse à faible altitude au-dessus de la mer (5 à 20 mètres) amerrit lorsqu'il subit un fort vent de face dû à une dépression atmosphérique (Pennycuik et al. 1996).

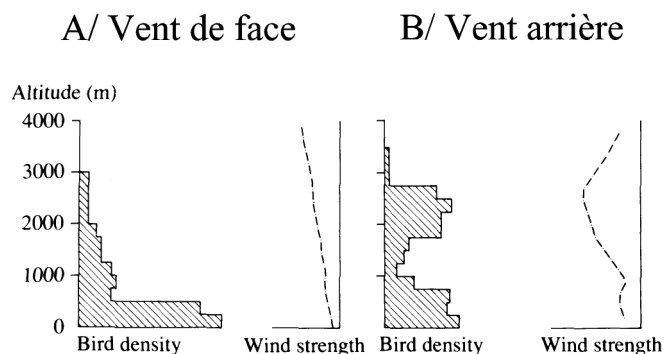


Figure VIII.7 Répartitions des oiseaux en fonction de leur direction par rapport au vent

A) La vitesse du vent de face croît de façon monotone avec l'altitude (ici, entre le sol et plusieurs milliers de mètres d'altitude). Il apparaît que plus le vent de face est fort, plus la densité d'oiseaux est faible. La densité des oiseaux est maximale aux altitudes les plus basses correspondant aux vent de face les plus faibles (inférieures à 500m).

B) Un second recensement a été réalisé pour un vent arrière. Ce vent est globalement croissant avec l'altitude, mais un minimum apparaît vers 1000m d'altitude. La densité d'oiseaux est la plus importante à l'altitude des 2 maxima locaux (soit 500 m et 2500 m d'altitude).

(Alerstam 1990)

VIII.4. Recherches connexes

Deux autres équipes à travers le monde ont tenté récemment de reproduire sur des aéronefs un maintien de flux optique sans citer l'hypothèse opto-motrice de Kennedy (1951).

Récemment, Chahl et al. (2004) ont mis en place sur un avion, sans grand succès, la stratégie énoncée en 2000 par Srinivasan et al. .

Le schéma de la figure VIII.8 montre ce que nous pouvons deviner (à partir du texte) de la boucle de régulation qui a été mise en œuvre sur l'avion. Cette boucle de régulation essaye de se conformer au second pré-requis énoncé par Srinivasan et al. 2000, qui indique que le flux optique doit être maintenu constant.

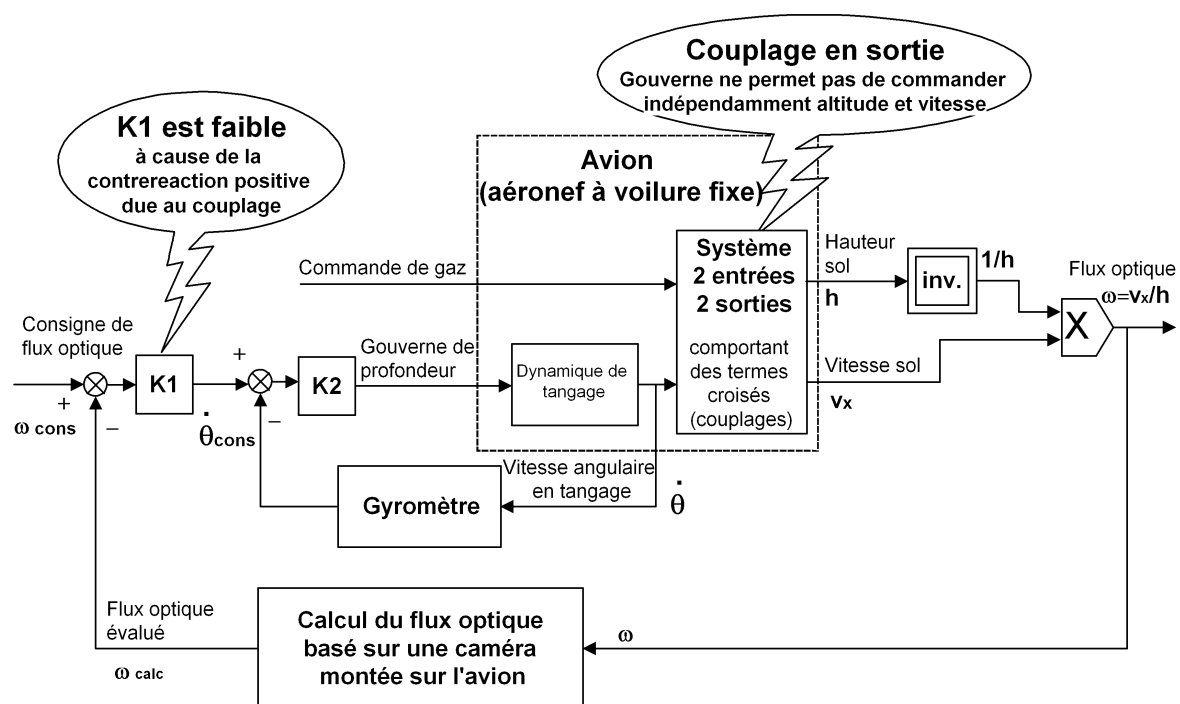


Figure VIII.8 Schéma de la boucle mise en œuvre pour réaliser l'atterrissage d'un avion miniature (Chahl et al. 2004) (Ce schéma de boucle a été synthétisé à partir du texte de l'article)

La boucle de régulation peut apparaître comme une régulation du flux optique qui agit non pas directement sur la force de sustentation (comme nous le proposons) mais sur la gouverne de profondeur de l'avion, dont dépend directement le tangage de l'aéronef.

Une difficulté de taille tient aux couplages existants entre les sorties de l'aéronef « avion ».

Sur un avion, en effet, il est difficile de commander séparément la force de sustentation et la force propulsive, donc de contrôler séparément l'altitude et la vitesse :

1. En réduisant la commande de gaz (dont dépend directement la force propulsive), on diminue la vitesse de l'avion, ce qui a pour effet immédiat une diminution de la portance (force de sustentation), donc une chute d'altitude de l'aéronef. Inversement, une augmentation des gaz conduit à une augmentation de la vitesse sol et, simultanément, une augmentation d'altitude.
2. En réalisant un piqué, l'aéronef perdrait rapidement de l'altitude et augmenterait sa vitesse par rapport au sol. Inversement, en se cabrant, l'aéronef gagnerait rapidement de l'altitude et diminuerait sa vitesse sol, risquant même un décrochage.

Ces dynamique complexes en sortie de l'aéronef conduisent à une contre-réaction positive.

En effet, si l'on commande l'atterrissage en diminuant les gaz de façon progressive, la conséquence est une diminution de la vitesse sol, ce qui conduit en boucle ouverte à une diminution du flux optique. En boucle fermée, pour contrecarrer cette diminution, le

régulateur commandera un piqué plus important pour maintenir le flux optique, ce qui aura pour conséquence une chute de l'altitude (qui peut être brutale si il y a décrochage) et une augmentation du flux optique. Pour compenser, le régulateur diminuera automatiquement le tangage en cabrant l'avion : le système entrera en oscillations.

Pour pallier ces oscillations, les auteurs ont diminué considérablement le gain de boucle (Chahl et al. 2004). On retrouve donc presque les performances d'un système en boucle ouverte. Et en effet, comme décrit plus haut, une diminution des gaz a pour conséquence une diminution de l'altitude et donc une amorce d'atterrissage.

De plus, le bouclage en vitesse angulaire de tangage n'a que peu d'influence sur les performances du système.

Les trajectoires de l'avion équipé de ce bouclage ne montrent peu de différence en boucle ouverte par rapport à la boucle fermée (Chahl et al. 2004) et il est difficile de considérer que la trajectoire de l'avion dépend d'une quelconque régulation.

Green et al. ont réalisé sur un avion modèle réduit une démonstration d'atterrissage, de décollage et de suivi de terrain (Green et al. 2004). Leur schéma fonctionnel, très succinct, est présenté à la figure VIII.9. L'absence de données quantitatives (trajectoires) rend malheureusement imprécis les résultats de ces expériences et il est difficile de les juger. En particulier, il est impossible de savoir si les trajectoires d'atterrissage et de décollage auraient une allure sensiblement différente en boucle fermée et en boucle ouverte.

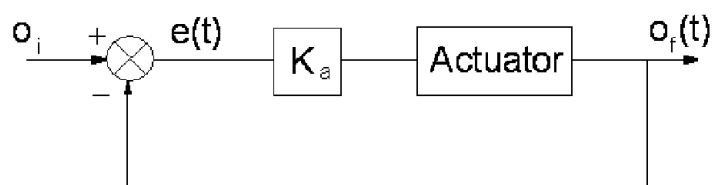


Figure VIII.9 Schéma de boucle proposant une régulation du flux optique en commandant le servo-moteur de profondeur du micro-aéronef.

(Green et al. 2004)

Nous pensons qu'il serait possible de mettre en œuvre le pilote automatique OCTAVE sur un avion en développant une commande plus complexe, capable de commander de façon indépendante la force de sustentation et la force propulsive, donc de contrôler séparément altitude et vitesse au delà de la vitesse de décrochage (cf. chapitre III). Cette commande devrait nécessairement découpler les différents modes existant sur les aéronefs à voilure fixe.

VIII.5. Les autres domaines d'application du pilote automatique OCTAVE

Le sous-marin

Une *régulation du flux optique* en commandant la poussée pourrait s'appliquer de façon immédiate au sous-marin dans les cas où il est nécessaire de naviguer à proximité du fond ou des récifs (sous-marin benthique).

Il apparaît également intéressant de noter que les récifs ou les rochers (pour une rivière) seraient comparables à la perturbation de relief, les courants marins ou le courant de la rivière étant comparables au vent dans le cas étudié ici. On sait également que le profil vertical de vitesse moyenne croît dès lors que l'on s'éloigne du fond. On retrouve ainsi, dans les milieux marins et aquatiques, des contraintes semblables au milieu aérien. Les poissons migrateurs tels que la lamproie sont connus pour remonter les rivières en nageant brièvement à contre-courant avant de faire halte au fond, derrière des rochers, zones où le courant est plus faible.

La robotique spatiale et planétaire

Le pilote automatique OCTAVE est particulièrement adapté à la navigation autonome en environnement inconnu. Ce système présente donc un intérêt pour le domaine spatial, eu égard à sa miniaturisation, son caractère non-émissif et ses faibles exigences en ressources informatiques et énergétiques, avec des applications potentielles telles que :

- le lancement en décollage automatique sous contrôle visuel,
- la rentrée en atmosphère par atterrissage automatique sous contrôle visuel,
- la robotique aérienne d'exploration planétaire.

Depuis quatre ans déjà, la NASA finance des laboratoires et travaille (via le JPL) à la mise en œuvre de principes de navigation bio-inspirés pour les futurs robots martiens (Thakoor et al. 2002, Chahl et al. 2003). Tant la NASA (dont le projet BEES finance le laboratoire de Srinivasan en Australie) que l'ESA (programme Ariadna/Biomimicry) s'intéressent de près au contrôle réflexe et visuomoteur des insectes pour la robotique spatiale. La démarche de ces organismes est évidemment de tester, d'abord sur la terre (notamment à l'aide de démonstrateurs aériens), des principes de guidage visuel minimalistes destinés aux futurs robots martiens. La NASA teste actuellement, à bord de mini-aéronefs sans pilotes (ou mini-drones), de nouveaux principes de guidage, sur le cratère de Haughton dans l'arctique canadien. A l'instar des insectes, les robots martiens devront s'affranchir de capteurs de

positionnement global (de type GPS), et ils auraient tout intérêt à s'affranchir également de capteurs d'informations métriques (radio-altimètre, radar Doppler, velocimètre laser, ...). Notre travail apporte, en ce sens, des applications potentielles non négligeable au domaine spatial.

IX. Conclusion

<i>IX.1. Pourquoi s'inspirer des insectes pour concevoir des micro-aéronefs ? (cf. Chapitre I).....</i>	<i>172</i>
<i>IX.2. Inspiration biologique liée à cette étude (cf. Chapitre II).....</i>	<i>172</i>
<i>IX.3. OCTAVE : réguler le flux optique en commandant la force de sustentation (cf. Chapitre III).....</i>	<i>173</i>
<i>IX.4. Le Détecteur Élémentaire de Mouvement : un capteur de flux optique (cf. Chapitre IV).....</i>	<i>174</i>
<i>IX.5. Le Banc d'essais en vol (cf. Chapitre V).....</i>	<i>174</i>
<i>IX.6. La boucle visuo-motrice (cf. Chapitre VI).....</i>	<i>175</i>
<i>IX.7. Comportements et performances du micro-aéronef captif (cf. Chapitre VII).....</i>	<i>175</i>
<i>IX.8. Analogie des trajectoires du robot équipé d'OCTAVE avec celles des insectes (cf. Chapitre VIII).....</i>	<i>176</i>
<i>IX.9. Amélioration à apporter et objectifs futurs.....</i>	<i>176</i>

Nous avons présenté une étude quantitative montrant comment un micro-aéronef à voilure tournante de 100g, équipé d'un œil élémentaire et d'un traitement optronique simple, peut contrôler sa hauteur sol en régulant son flux optique.

Grâce aux données (électrophysiologiques et comportementales) obtenues chez l'insecte, la démarche bio-robotique nous a conduits non seulement à la réalisation d'un capteur visuel miniature mais également à la mise en œuvre du pilote automatique OCTAVE, illustrant les possibilités que l'on peut attendre d'une exploitation du flux optique pour la navigation aérienne, spatiale ou sous-marine.

IX.1. Pourquoi s'inspirer des insectes pour concevoir des micro-aéronefs ? (cf. Chapitre I)

L'avionique classique ne permet pas de répondre actuellement aux nombreux problèmes posés par la robotisation d'un micro-aéronef dans la gamme 100mg à 100 grammes, qui correspond à la taille des insectes ou des (petits) oiseaux. Les contraintes en termes de masse et de stockage de l'énergie sur un micro-aéronef sont telles qu'il est naturel de s'orienter vers des systèmes biologiques existants, déjà soumis à ces mêmes contraintes depuis plusieurs dizaines de millions d'années (pour les oiseaux) voire centaines de millions d'années (pour les insectes). Les insectes, en général, et les diptères, en particulier, sont capables de prouesses encore inégalables par les plus hautes technologies, par exemple en matière de virage sur l'aile ou de poursuite de cible.

IX.2. Inspiration biologique liée à cette étude (cf. Chapitre II)

Le flux optique est défini par le champ de vecteurs vitesses angulaires générées sur l'œil d'un agent lors son déplacement. Or, on sait que le flux optique est mesuré chez les insectes par des neurones spécialisés appelés Détecteurs Élémentaires de Mouvement.

L'inspiration biologique du pilote automatique OCTAVE repose sur plusieurs points :

1. privilégier un flux optique de *translation*,

Par deux mécanismes distincts, la mouche minimise ses rotations à la fois en lacet et en roulis. De plus, lors de virages, sa tête réalise une saccade, réduisant la durée de rotation de la tête et produisant un flux optique de rotation beaucoup trop élevé (1400°/s en moyenne) pour être pris en compte par les neurones détecteurs de mouvement.

2. maintenir un flux optique *ventral* constant,

Plusieurs observations à la fois chez le criquet et chez l'abeille montrent assez clairement que

les insectes semblent maintenir constante la vitesse angulaire générée sur la partie ventrale de l'œil, c'est-à-dire le *flux optique ventral*.

3. commander de façon relativement indépendante le force de propulsion et la force de sustentation.

Les insectes semblent commander leur force de propulsion (qui détermine la vitesse horizontale) en agissant sur l'angle de tangage de leur corps (David, 1978), et leur force de sustentation (qui détermine leur altitude) en agissant sur l'amplitude et la fréquence de leurs battements d'ailes (Götz, 1968).

IX.3. OCTAVE : réguler le flux optique en commandant la force de sustentation (cf. Chapitre III)

Contrairement aux pilotes automatiques conventionnels utilisés à bord des aéronefs de grande taille, OCTAVE n'a pas comme objectif premier de maintenir à des valeurs de consigne la vitesse sol v_x ou la hauteur sol h d'un aéronef. L'objectif d'OCTAVE est de maintenir constant le rapport entre ces deux variables, qui définit le flux optique ventral à savoir $\omega = v_x/h$.

Des travaux antérieurs ont fait appel à une estimation de la hauteur sol à partir d'une mesure de flux optique en admettant que l'appareil était capable de connaître sa vitesse sol (Mura, Franceschini 1994). Ici, au contraire, aucune mesure n'est faite ni de v_x ni de h et le pilote automatique OCTAVE *régule le flux optique*. La conséquence en est que le robot se comporte de telle manière qu'il navigue automatiquement à une hauteur sol qui se voit judicieusement adaptée à la vitesse de vol. Le résultat se mesure donc en termes de comportement, de rejet d'une perturbation de relief, d'évitement de crash, et par conséquent de sécurité de vol.

On peut imaginer qu'un pilote (ou un système de bord de grande autorité) pourrait piloter les deux paramètres du système OCTAVE :

1. La consigne de flux optique ventral ω_c ,

Ce paramètre serait ajusté à une valeur faible lorsque le terrain est accidenté, afin que l'aéronef navigue plus loin des obstacles. Inversement, il serait ajusté à une valeur plus importante lorsque le terrain est plat afin que l'appareil puisse naviguer plus près du sol.

2. La force propulsive,

Ce paramètre permet de commander d'une part la vitesse de vol, d'autre part les manœuvres de décollage et d'atterrissage.

Le pilote automatique commande à partir de l'erreur entre le flux optique de consigne et le flux optique mesuré la force de sustentation en agissant sur la poussée produite par la voilure

tournante. Il reste à l'opérateur à agir (en boucle ouverte) sur l'angle de tangage pour modifier la force propulsive, et ainsi la vitesse horizontale par rapport à l'air.

IX.4. Le Détecteur Élémentaire de Mouvement : un capteur de flux optique (cf. Chapitre IV)

Les étapes du traitement DEM reprennent les caractéristiques du traitement visuel précoce, qui présente de nombreuses similitudes chez les vertébrés et les insectes.

La compatibilité du principe de guidage visuel proposé, avec les contraintes sévères imposées aux micro-aéronefs, est assurée grâce aux progrès réalisés sur le circuit DEM (conçu et réalisé pour la première fois au laboratoire il y a 18 ans), à la fois en termes de consommation et de masse (aujourd'hui, 40mW et 0,8g respectivement soit 2,5g avec l'ensemble lentille+photorécepteur).

Le DEM délivre un signal monotone, croissant en fonction du flux optique. On fixe une consigne de flux optique et on met en œuvre la régulation du flux optique.

L'analyse des signaux visuels filtrés passe-bande a montré l'influence du filtrage spatial réalisé par la défocalisation de l'optique, des fréquences spatiales et des contrastes sur le déclenchement d'une mesure DEM. L'analyse montre également les méfaits d'une perturbation en vibration (inévitables sur un appareil à rotor) sur l'estimation du flux optique.

IX.5. Le Banc d'essais en vol (cf. Chapitre V)

Ce banc d'essai est composé d'un bras tournant pantographique à l'extrémité duquel est placé un aéronef élémentaire à voilure tournante. Des contrastes disposés au sol forment l'environnement visuel au-dessus duquel l'aéronef évolue. L'environnement contrasté utilisé est une image caricaturale de ce que l'on peut voir du ciel à quelques centaines de mètres d'altitudes, à savoir des prairies, des champs, des routes, des forêts. Cet environnement a permis de tester les performances d'un micro-aéronef équipé du pilote automatique OCTAVE de façon continue, répétitive et en toute sécurité. Ce banc d'essai a également permis d'instrumenter le robot, de visualiser les variables et de modifier en ligne les paramètres en utilisant une interface filaire, avec liaison à l'appareil par collecteur tournant.

L'inertie du bras fait cependant que la dynamique de déplacement de l'aéronef captif, tout comme sa dynamique d'élévation sont ralenties par rapport à celles qu'aurait un aéronef libre. Une modélisation par fonction de transfert a permis de vérifier le découplage physique entre la dynamique d'élévation et la dynamique de déplacement.

IX.6. La boucle visuo-motrice (cf. Chapitre VI)

Pour analyser finement la boucle visuo-motrice, nous l'avons simulée avec le logiciel Matlab/Simulink.

Cette simulation comprend 4 phases : le calcul des sorties photorécepteurs, le calcul de la sortie du circuit DEM estimant le flux optique, le calcul du signal de commande du robot et enfin le calcul de la position et de l'altitude du robot.

Dans un premier temps, la simulation de la boucle visuomotrice nous a permis de découvrir les potentialités du pilote automatique. Puis, elle nous a permis de mettre au point le correcteur de la boucle visuomotrice.

La synthèse du correcteur a nécessité la linéarisation des 3 non-linéarités de la boucle, à savoir un inverseur, un multiplicateur et le capteur de flux optique.

Malgré le faible gain du transfert de boucle, ce bouclage fait naître un comportement de suivi de terrain pour un terrain de pente modérée.

L'utilisation future d'un second œil dirigé vers l'avant permettrait un comportement en suivi de terrain en présence de pentes plus raides.

IX.7. Comportements et performances du micro-aéronef captif (cf. Chapitre VII)

Des performances reproductibles en suivi de terrain ont été obtenues : le pilote automatique OCTAVE évite un relief, qu'il considère comme une perturbation de sortie, en réalisant un *suivi de terrain*. Ici, le pilote automatique OCTAVE s'est montré efficace dans une gamme de vitesses sol allant de 1 à 3 m/s (cette zone de vitesse est limitée vers le haut par la force centrifuge agissant sur notre banc d'essai en vol). Plus le robot navigue rapidement, plus il s'écarte du sol.

Nous avons également montré qu'une simple commande de tangage couplée à cette même stratégie de *régulation de flux optique* conduit aussi au décollage et à l'atterrissage automatique. Cette *régulation de flux optique* permet même de réagir de façon très appropriée à certaines perturbations atmosphériques (vent de face et vent arrière).

Par exemple, lorsque le vent de face est trop élevé, la vitesse sol de l'aéronef se voit considérablement ralentie, et sa hauteur sol diminue en conséquence dans une même proportion pour conserver la rapport v_x/h constant. L'aéronef atterrit ainsi automatiquement à faible vitesse. Atterrir est ici une réaction qui peut être qualifiée de sensée car elle soustrait l'aéronef à sa perturbation de vent de face.

IX.8. Analogie des trajectoires du robot équipé d'OCTAVE avec celles des insectes (cf. Chapitre VIII)

Les trajectoires du micro-aéronef captif équipé du pilote automatique OCTAVE montrent une analogie intéressante avec les trajectoires des insectes, à la fois à l'atterrissage (comparaison avec les abeilles), en suivi de terrain (comparaison avec le papillon migrateur), ou encore lors des réactions au vent (comparaison avec le criquet migrateur).

En étudiant en détail le comportement des insectes (des insectes migrants en particulier), il apparaît que leur comportement est soumis à des actions réflexes et non à des choix résultant d'une modélisation et d'une planification de trajectoires.

Nos travaux remettent en cause la modélisation de l'atterrissage de l'abeille décrite par Srinivasan et al. en 2000. Nous montrons en effet que, dès lors que le robot s'est redressé et que son angle de tangage n'est plus commandé, il maintient automatiquement une pente de descente constante, sans avoir aucunement à asservir cette pente à l'aide de mesures par des capteurs spécifiques.

IX.9. Amélioration à apporter et objectifs futurs

Le premier objectif immédiat serait d'installer le régulateur de flux optique à bord de l'appareil. Ce régulateur n'étant composé que de quelques filtres et de quelques éléments de sommation, sa mise en œuvre semble être possible sur un microcontrôleur 8 bits de taille 3×3mm tel que celui que nous avons utilisé pour le DEM mixte. Ainsi, la masse et la consommation de ce nouvel organe de bord serait compatible avec la taille d'un micro-aéronef.

Le second objectif est de tester ce pilote automatique sur un micro-aéronef en vol libre. Il serait important d'ajuster les constantes de temps du correcteur aux dynamiques présentes sur l'aéronef libre. Mais encore, d'autres améliorations à apporter au pilote automatique OCTAVE seraient sans doute souhaitables avant de s'engager dans ce développement :

1. Dans l'optique de réaliser un vol libre (où les constantes de temps des dynamiques seront plus faibles), il serait nécessaire de renouveler plus fréquemment la mesure du flux optique pour être moins soumis à des erreurs de correspondances du traitement du DEM mais également du point de vue automatique, pour augmenter la bande passante du capteur vu du régulateur.

Pour renouveler plus fréquemment la mesure du flux optique, une solution pourrait être de détecter un plus grand nombre de bords contrastés de l'environnement en augmentant le champ visuel.

2. Il est important de connaître au plus tôt les variations futures du flux optique ventral. Par exemple, la perturbation de terrain pourrait être rejetée de façon plus efficace si la variation du flux optique ventral était prédite.

Cette prédiction serait permise, là encore, par une augmentation du nombre de DEM, notamment par l'orientation vers l'avant de certains d'entre eux. Cette prédiction resterait limitée à un horizon défini par la largeur du champ de vision.

3. Il serait intéressant de remplacer par un mécanisme moins contraignant l'asservissement à la verticale de l'orientation du regard.

L'absence de centrale inertielle de quelques grammes nous pousse à concevoir des solutions innovantes biologiquement plausibles. En effet, les insectes ailés ne disposent pas de capteurs de leur propre orientation angulaire dans l'espace. Rappelons que les deux balanciers dont disposent les diptères, ne sont sensibles qu'aux *vitesse de rotation* (selon les trois axes).

En outre, il serait intéressant d'adapter le pilote automatique proposé à un aéronef à voilure fixe ou à voilure battante en concevant une structure de commande capable de commander la force de sustentation et la force de propulsion de façon indépendante.

Dans ce travail, nous avons proposé un pilote automatique d'aéronef dont le schéma fonctionnel est un véritable *régulateur de flux optique* qui agit sur la poussée de l'aéronef.

En n'utilisant qu'un capteur de flux optique, ce pilote automatique d'un nouveau type présente l'avantage certain de s'affranchir de l'avionique traditionnelle, lourde, onéreuse et gourmande en énergie, qui caractérise les aéronefs d'aujourd'hui :

- tube *Pitot* pour mesurer la vitesse par rapport à l'air,
- radar-Doppler pour mesurer la vitesse sol,
- radio-altimètre pour mesurer la hauteur sol,
- altimètre barométrique pour mesurer l'altitude absolue,
- variomètre pour mesurer la vitesse de descente.

Ainsi, de par ses faibles contraintes de masse et de consommation énergétique, le pilote automatique OCTAVE rend possible la robotisation de micro-aéronefs de moins de 100 grammes, tout en expliquant a posteriori pourquoi les oiseaux et les insectes ailés pourraient s'en contenter.

Ce travail a donné naissance à 8 publications dans des conférences et revues internationales à comité de lecture et à un brevet :

Revues scientifiques à comité de lecture

F. Ruffier, N. Franceschini (2004) (accepté pour publication)
Optical Flow Regulation: the Key to Miniature Aircraft Guidance
 Robotics and Autonomous Systems

F. Ruffier, S. Viollet, N. Franceschini (2004)
Visual control of two aerial micro-robots by insect-based autopilots
 Advanced Robotics, Vol. 18, No 8, pp. 771-786
 Publié conjointement par VSP et RSJ (Robotics Society of Japan).

Conférences internationales avec comité de lecture

F. Ruffier, N. Franceschini (2004)
Optic flow based AFCS for rotorcraft automatic manoeuvring (terrain following, take-off and landing)
 Proceeding of the 30th European Rotorcraft Forum (ERF'04), AAAF/CEAS, 14-16 septembre 2004, Marseille.

F. Ruffier, N. Franceschini (2004)
Visually guided Micro-Aerial Vehicle : automatic take off, terrain following, landing and wind reaction
 Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2004), pp. 2339-2346, Nouvelle Orléans, USA.

IEEE ICRA 2004 Best vision paper finalist

S. Viollet, F. Ruffier, N. Franceschini (2004)
Visual stabilisation and guidance of micro aerial robots : a biomimetic approach
 Proceeding of the 35th International Symposium on Robotics (ISR 2004), Ref:THS31-4, Paris.

F. Ruffier, N. Franceschini (2003)
OCTAVE, a bioinspired visuo-motor control system for the guidance of Micro-Air Vehicles
 SPIE proceeding, Vol. 5119, pp.1-12.
 Conference on Bioengineered and Bioinspired Systems
 Edited by Rodriguez-Vazquez, A.; Abbott, D.; Carmona, R.; Bellingham, U.S.A.

F. Ruffier, S. Viollet, N. Franceschini (2003)
OSCAR and OCTAVE : Two bio-inspired visually guided aerial micro-robots
 Proceeding of the 11th IEEE Int Conference on Advanced Robotics (ICAR 2003), pp. 726-732, Coimbra, Portugal.

IEEE ICAR 2003 Outstanding paper award

F. Ruffier, S. Viollet, S. Amic, N. Franceschini (2003)
Bio-inspired optic flow circuits for the visual guidance of micro-air vehicles
 Proceeding of IEEE Int Symposium on Circuits and Systems (ISCAS 2003), Vol. III, pp. 846-849, Bangkok, Thaïlande.

Brevet

N. Franceschini, F. Ruffier, S. Viollet, M. Boyron (2002)
Système d'assistance au pilotage de l'altitude et de la vitesse horizontale, perpendiculaire à l'aplomb, d'aéronefs équipés de ce système
 Brevet français (extension internationale en cours) déposé par le CNRS (Num. de publication : FR2844607)

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

T. Alerstam

Bird Migration. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1990.

Y. Aloimonos

"Active perception,"

in *Advances in Computer Vision*, vol. I. Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum associates, 1993.

Y. Aloimonos

"Visual Navigation: From Biological Systems to Unmanned Ground Vehicles,"

in *Advances in Computer Vision*, vol. II: Lawrence Erlbaum Associates, 1997.

S. Amic

"Intégration des fonctions de détections de mouvements pour le traitement parallèle des signaux visuels,"

Projet de troisième année ENSERG, Grenoble: INP Grenoble.

O. Amidi, T. Kanade, and J. R. Miller,

"Vision-Based Autonomous Helicopter Research at Carnegie Mellon Robotics Institute 1991-1997,"

Proceeding of American Helicopter Society Int. Conf., Gifu, Japan, 1998.

C. E. Armstrong-Gold and F. Rieke

"Bandpass Filtering at the Rod to Second-Order Cell Synapse in Salamander (*Ambystoma tigrinum*) Retina,"

The Journal of Neuroscience, vol. 23, pp. 3796-3806, 2003.

F. Aubépart, M. El Farji, and N. Franceschini,

"FPGA implementation of Elementary Motion Detectors for the visual guidance of Micro-Air-Vehicles,"

Proceeding of ISIE 2004, IEEE, 2004.

R. Bajcsy

"Active Perception,"

Proc. IEEE, pp. 996-1005, 1988.

D. H. Ballard

"Animate vision,"

Artificial Intelligence, vol. 48, pp. 57-86, 1991.

G. L. Barrows, C. Neely, and K. T. Miller

"Optic flow sensors for MAV navigation,"

in *Fixed and flapping wing aerodynamics for Micro Air Vehicle applications*, vol. 195, Progress in Astronautics and Aeronautics: AIAA, 2001, pp. 557-574.

B. Bhanu, S. Das, D. Roberts, and D. Duncan

"A system for obstacle detection during rotorcraft low altitude flight,"

IEEE Transactions on aerospace and electronic systems, vol. 32, pp. 875-897, 1996.

C. Blanes

"Appareil visuel élémentaire pour la navigation à vue d'un robot mobile autonome,"
DEA de Neurosciences, Marseille: Univ. de la Méditerranée (Aix-Marseille II).

C. Blanes

"Guidage visuel d'un robot mobile autonome d'inspiration biologique 2nde Partie,"
Thèse de doctorat, Grenoble: Institut National Polytechnique de Grenoble (INP Grenoble).

R. A. Brooks

"A Robust Layered Control System For A Mobile Robot,"
IEEE Journal Of Robotics And Automation, vol. RA-2, pp. 14-23, 1986.

R. A. Brooks

"Planning is just a way of avoiding figuring out what to do next,"
MIT Artificial Intelligence Laboratory, Technical report 1987.

E. Buchner

"Behavioural analysis of spatial vision in insects,"
in Photoreception and vision in invertebrates, vol. 74, M. A. Ali, Ed. New York: Plenum,
1982, pp. 561-621.

J. S. Chahl, M. V. Srinivasan, and S. W. Zhang

"Landing Strategies in Honeybees and Applications to Uninhabited Airborne Vehicles,"
Int. J. of Robotics Research, vol. 23, pp. 101-110, 2004.

J. S. Chahl, S. Thakoor, N. L. Bouffant, G. Stange, M. V. Srinivasan, B. Hine, and S. Zornetzer

"Bioinspired engineering of Exploration Systems : a horizon sensor/attitude reference system
based on the dragonfly ocelli for Mars Exploration Applications,"
Journal of robotics systems, vol. 20, pp. 35-42, 2003.

T. Collett, H. Nallbach, and H. Wagner

"Visual stabilization in arthropods,"
in Visual motion and its use in the stabilization of gaze, F. A. Miles and J. Wallman, Eds.:
Elsevier, 1993, pp. 239-263.

A. Crétual and F. Chaumette,

"Image based visual servoing by integration of dynamic measurements,"
Proceeding of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Leuven, Belgique, 1998, pp.
1994-2001.

C. David

"The relationship between body angle and flight speed in free-flying *Drosophila*,"
Physiol. Ent., vol. 3, pp. 191-195, 1978.

S. Doncieux and J.-A. Meyer

"Evolving Neural Networks for the Control of a Lenticular Blimp,"
in Applications of Evolutionary Computing, Raidl and al., Eds.: Springer Verlag, 2003, pp.
626-637.

J. K. Douglas and N. J. Strausfeld

"Visual motion-detection circuits in flies: parallel direction-and-non-direction-sensitive pathways between the medulla and lobula plate,"
J of Neuroscience, vol. 16, pp. 4551-4562, 1996.

M. Dunbabin, S. Brosnan, J. Roberts, and P. Corke,

"Vibration isolation for autonomous helicopter flight,"
Proceeding of ICRA 2004, Nlle Orléans, USA, IEEE, 2004, pp. 3609-3615.

N. Franceschini

"Sampling of the visual environment by the compound eye of the fly : fundamentals and applications,"
in Photoreceptor optics, S. A.W. and M. R., Eds. Berlin: Springer, 1975, pp. 98-125.

N. Franceschini

"In-vivo microspectrofluorimetry of visual pigments,"
in The Biology of Photoreception, J. Cosens and D. Vince-Price, Eds.: UK: Society for Experimental Biology, 1983, pp. 53-85.

N. Franceschini

"Early processing of colour and motion in a mosaic visual system.,"
Neurosc Res Suppl, vol. 2, pp. 517-549, 1985.

N. Franceschini

"Engineering Applications of Small Brains,"
Future Electron Devices Journal, vol. 7(suppl. 2), pp. 32-47, 1996.

N. Franceschini

"De la mouche au robot : Reconstruire pour mieux comprendre,"
in Cerveaux et Machines, V. Bloch, Ed. Paris: Hermès, 1999, pp. 247-270.

N. Franceschini, C. Blanes, and L. Oufar

"Passive, non-contact optical velocity sensor." FRANCE: ANVAR/DVAR, Paris, 1986.

N. Franceschini and R. Chagneux,

"Repetitive scanning in the fly compound eye,"
Proceeding of 25th Göttingen Neurobiology Conf., Göttingen, Germany, 1997, pp. 279.

N. Franceschini, A. Riehle, and A. Le Nestour

"Directionally Selective Motion Detection by Insect Neurons,"
in Facets of vision, D. G. Stavenga and R. C. Hardie, Eds. Berlin: Springer, 1989, pp. 360-390.

G. F. Franklin, J. D. Powell, and A. Emani-Naeini

Feedback control of dynamic systems, Third edition ed. Reading, Ma, USA: Addition-Wesley Publishing Company, 1994.

M. A. Garratt and J. S. Chahl,

"Visual control of an autonomous Helicopter,"
Proceeding of American Institue of Aeronautics and Astronautics, Reno, Nevada, 2003.

J. J. Gibson

The perception of the visual world. Boston: Houghton Mifflin, 1950.

J. J. Gibson

"Visually controlled locomotion and visual orientation in animals.,"

British J. of Psychology, vol. 49, pp. 182-194, 1958.

K. G. Götz

"Optomotorische Untersuchungen des visuellen Systems einiger Augenmutanten der Fruchtfliege *Drosophila*,"

Kybernetik, vol. 2, pp. 77-92, 1964.

K. G. Götz

"Flight control in *Drosophila* by visual perception of motion,"

Kybernetik, vol. 4, pp. 199-208, 1968.

K. G. Götz and U. Wandel

"Optomotor control of the force of flight in *Drosophila* and *Musca*. II. Covariance of lift and thrust in still air,"

Biol.Cybern., vol. 51, pp. 135-139, 1984.

W. E. Green, P. Y. Oh, and G. Barrows,

"Flying Insect Inspired Vision for Autonomous Aerial Robot Maneuvers in Near-Earth Environments,"

Proceeding of International Conference of Robotics and Automation (ICRA), New Orleans, IEEE, 2004, pp. 2347-2352.

R. C. Hardie

"Functional organisation of fly retina,"

in Progress in Sensory Physiology, vol. 5, D. Ottoson, Ed. Berlin: Springer, 1985.

R. R. Harrison and C. Koch

"A robust analog VLSI motion sensor,"

Autonomous Robots, vol. 7, pp. 211-224, 1999.

B. Hassenstein and W. Reichardt.

"Systemtheoretische Analyse der Zeit-, Reihenfolgen- und Vorzeichenauswertung bei der Bewegungsperzeption des Rüsselkäfers *Chlorophanus*,"

Z. Naturforsch., vol. 11, pp. 513-524, 1956.

K. Hausen

"The lobula-complex of the fly: structure, function and significance in visual behaviour,"

in Photoreception and vision in invertebrates, M. A. Ali, Ed.: Plenum, 1984, pp. 523-559.

M. Heisenberg and R. Wolf

"Reafferent control of yaw torque in *Drosophila melanogaster*,"

J Comp Physiol A, vol. 163, pp. 373-388, 1988.

R. Hengstenberg

"Mechanosensory control of compensatory head roll during flight in the blowfly *Calliphora erythrocephala* Meig.,"

J. Comp. Physiol. A, vol. 163, pp. 151-165, 1988.

R. Hengstenberg,

"Control of head pitch in *Drosophila* during rest and flight,"

Proceeding of Rhythmogenesis in Neurons and Networks, Proceedings of the 20th Gottingen Neurobiology Conference, Gottingen, G. Thieme Verlag, Stuttgart, 1992, pp. 305.

R. Hengstenberg,

"Pitch control of head posture in walking and flying *Drosophila*,"

Proceeding of Invertebrate Vision Conference, Bäckaskog Castle, Sweden, Lund University, 2001, pp. 224.

H. Heran and M. Lindauer

"Windkompensation und Seitenwindkorrektur der Bienen beim Flug über Wasser,"

Z. vergl. Physiol, vol. 47, pp. 39-55, 1963.

B. K. P. Horn and B. Schunck

"Determining Optical Flow,"

Artificial Intelligence, vol. 17, pp. 185-203, 1981.

G. A. Horridge

"Insects which turn and look,"

Endeavour, vol. 1, pp. 7-17, 1977.

D. H. Hubel and T. N. Wiesel

"Receptive fields of single neurones in the cat's striate cortex,"

J Physiol., vol. 148, pp. 574-91, 1959.

M. Ichikawa, H. Yamada, and J. Takeuchi

"Flying robot with biologically inspired vision,,"

J. of Robotics and Mechatronics, vol. 13, pp. 621-624, 2001.

F. Iida

"Biologically Inspired Visual Odometer for Navigation of a Flying Robot,"

Robotics and Autonomous Systems, vol. 44, pp. 201-208, 2003.

F. Iida and D. Lambrinos,

"Navigation in an autonomous flying robot by using a biologically inspired visual odometer,"

Proceeding of Sensor fusion and Decentralized control in robotic III, Boston, SPIE (vol 4196), 2000.

M. Juusola and A. S. French

"Visual Acuity for Moving Objects in First- and Second-Order Neurons of the Fly Compound Eye,"

J Neurophysiol, vol. 77, pp. 1487-1495, 1997.

J. S. Kennedy

"Visual responses of flying mosquitoes,"

Proceedings of the Zoological Society of London, vol. 109, pp. 221-242, 1939.

J. S. Kennedy

"The migration of the desert locusts (*Schistocerca gregaria* Forsk.),"

Phil. Trans. R. Soc. Lond. B, vol. 235, pp. 163-290, 1951.

K. Kirschfeld

"The visual system of the fly : physiological optics and functional anatomy as related to behavior.,"

in *Neurosciences: Fourth Study Program*, F. O. Schmitt and F. G. Worden, Eds. Cambridge: MIT Press, 1979, pp. 297-310.

J. J. Koenderink and A. J. v. Doorn

"Facts on optic flow,"

Biol. Cybern., vol. 56, pp. 247-254, 1987.

H. G. Krapp, B. Hengstenberg, and R. Hengstenberg

"Dendritic structure and receptive-field organisation of optic flow processing interneurons in the fly,"

J of Neurophysiol, vol. 79, pp. 1902-1917, 1998.

H. G. Krapp and R. Hengstenberg

"Estimation of self-motion by optic flow processing in single visual interneurons,"

Nature, vol. 384, pp. 463-466, 1996.

T. Labhardt

"Polarization-opponent interneurons in the insect visual system,"

Nature, vol. 331, pp. 435-437, 1988.

M. Land and T. Collett

"Chasing behaviour of houseflies (*Fannia canicularis*). A description and analysis,"

J Comp Physiol, vol. 89, pp. 331-357, 1974.

M. F. Land

"Optics and Vision in Invertebrates,"

in *Vision in Invertebrates, B: Invertebrate Visual Centers and Behavior I*, vol. VII/6B, *Handbook of Sensory Physiology*, H. Autrum, Ed. Berlin: Springer-Verlag, 1981.

O. Landolt and A. Mitros

"Visual sensor with resolution enhancement by mechanical vibrations,"

Autonomous Robots, vol. 11, pp. 233-239, 2001.

S. Laughlin

"Coding efficiency and design in visual processing,"

in *Facets of vision*, D. Stavenga and R. Hardie, Eds. Berlin: Springer, 1989, pp. 213-234.

J. Y. Lettvin, H. R. Maturana, W. S. McCulloch, and W. H. Pitts

"What the frog's eye tells the frog's brain,"

Proc. IRE, vol. 47:, pp. 1940-1959, 1959.

N. Martin

"Application de la vision du mouvement au pilotage d'un robot mobile,"

Thèse de doctorat, Bordeaux: Université Bordeaux I.

M. Milam and R. M. Murray,

"A testbed for nonlinear flight control techniques: the caltech ducted fan,"

Proceeding of Conference on Control Applications, Hawai'i, USA, IEEE, 1999.

- J. Miller, O. Amidi, C. Thorpe, and T. Kanade
 "Precision 3-D modeling for autonomous helicopter flight,"
 Int. Symp. Robotics Research (ISRR), 1999.
- A. Moini
 "Vision Chips." Boston: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- F. Mura
 "Contribution au guidage visuel d'agents mobiles d'inspiration bionique,"
 Thèse de doctorat, Bordeaux: Université Bordeaux I.
- F. Mura and N. Franceschini,
 "Visual control of altitude and speed in a flying agent,"
 Proceeding of From Animals to Animats III, MIT Press, Cambridge, USA, 1994, pp. 91-99.
- F. Mura and N. Franceschini,
 "Biologically inspired "retinal scanning" enhances motion perception of a mobile robot,"
 Proceeding of 1st Europe-Asia Congress on Mechatronics, Besançon, France, 1996, pp. 934-940.
- T. Netter
 "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, Nice: Université de Nice - Sophia Antipolis.
- T. Netter and N. Franceschini,
 "Neuromorphic Optical Flow Sensing for Nap-of-the-Earth,"
 Proceeding of Mobile Robot XIV, SPIE, Bellingham, USA, 1999, pp. 208-216.
- T. Netter and N. Franceschini,
 "A robotic Aircraft that follows Terrain Using a Neuromorphic Eye,"
 Proceeding of Intelligent Robots and Systems (IROS), Lausanne, Switzerland, IEEE, 2002, pp. 129-134.
- T. R. Neumann and H. Bülthoff,
 "Insect inspired visual control of translatory flight,"
 Proceeding of ECAL 2001, Springer Berlin, 2001, pp. 627-636.
- K. Pearson, I. Gynther, and W. Heitler
 "Coupling of flight initiation to the jump in locusts,"
 J Comp Physiol A, vol. 158, pp. 81-89, 1986.
- Y. Peng, D. Vrancic, and R. Hanus,
 "A review of anti-windup, bumpless and conditioned transfer,"
 Proceeding of IFAC, San Francisco, 1996, pp. 79-84.
- C. Pennycuik, O. Einarsson, T. Bradbury, and M. Owen
 "Migrating Whooper Swans *Cygnus cygnus*: satellite tracks and flight performance calculations,"
 Journal of Avian Biology, vol. 27, pp. 118-134, 1996.

J.-M. Pichon

"Guidage visuel d'un robot mobile autonome d'inspiration biologique 1ère Partie,"
Thèse de doctorat, Grenoble: Institut National Polytechnique de Grenoble (INP Grenoble).

T. Poggio and W. E. Reichardt

"Control of orientation behaviour in the fly. Part II. Towards the underlying neural interactions,"
Quart. Rev. Biophysics, vol. 9, pp. 377-438, 1976.

R. Preiss

"Set point of retinal velocity of ground images in the control of swarming flight of desert locusts,"
J Comp Physiol A, vol. 171, pp. 251-256, 1992.

R. Preiss

"Visual control of orientation during swarming flight of desert locusts Sensory.,"
in Systems of Arthropods, K. Wiese and al., Eds. Basel/Switzerland: Birkhauser Verlag, 1993,
pp. 273-287.

R. Preiss and M. Gewecke

"Compensation of visually simulated wind drift in the swarming flight of the desert locust (*Schistocerca gregaria*),"
J Exp Biol, vol. 157, pp. 461-481, 1991.

R. Preiss and E. Kramer

"Stabilization of altitude and speed in tethered flying gypsy moth males: influence of (+) and (-) disparlure,"
Physiol Entomol, vol. 8, pp. 55-68, 1983.

R. Preiss and E. Kramer

"Control of flight speed by minimization of the apparent ground pattern Movement,"
in Localization and Orientation in Biology and Engineering, Varju and Schnitzler, Eds. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 1984, pp. 140-142.

R. Preiss and P. Spork,

"A model of the control of flight speed in locusts based on interacting feedback circuits,"
Proceeding of Gene-Brain-Behavior, Proceedings of the 21th Göttingen Neurobiology Conference, G Thieme Verlag Stuttgart, 1993, pp. 94.

R. Preiss and P. Spork,

"A model of the visual control of wind related orientation of the locust, *Shistocerca gregaria*,"
Proceeding of Göttingen Neurobiology Report 1995, G Thieme Verlag Stuttgart, 1995, pp. 421.

M. Pudas, A. Kruusing, S. Leppävuori, M. Boyron, S. Amic, S. Viollet, and N. Franceschini

"Elementary Motion Detectors with hybrid components,"
(En preparation), 2004.

W. Reichardt

"Autocorrelation, a principle for the evaluation of sensory information by the central nervous system,"
in Sensory Communication, W. A. Rosenblith, Ed. New York: Wiley, 1961, pp. 303-317.

W. Reichardt

"Movement perception in insects,"

in *Processing of optical data by organisms and by machines*, W. Reichardt, Ed. New York: Academic Press, 1969.

W. E. Reichardt and M. Egelhaaf

"Properties of individual movement detectors as derived from behavioural experiments on the visual system of the fly,"

Biol. Cybern., vol. 58, pp. 287-294, 1988.

A. Riehle and N. Franceschini

"Motion detection in flies: parametric control over on-off pathways,"

Exp Brain Res, vol. 54, pp. 390-394, 1984.

J. M. Roberts, P. I. Corke, and G. Buskey,

"Low-Cost Flight Control System for a Small Autonomous Helicopter,"

Proceeding of Proceedings of 2002 Australasian Conference of Robotics and Automation, 2002, pp. pp. 71-76.

D. A. Robinson

"A method of measuring eye movements using a scleral search coil in a magnetic field,"

The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Transactions on Biomedical Engineering, vol. BME-10, pp. 137-145, 1963.

F. Ruffier and N. Franceschini,

"OCTAVE, système de contrôle bio-inspiré de l'altitude d'un micro-aéronef,"

Proceeding of 1ère journées du Réseau Thématique Pluridisciplinaire (RTP) Micro-robotique, Rennes (IRISA et ENS Cachan, antenne de Bretagne), CNRS, 2002.

F. Ruffier and N. Franceschini,

"OCTAVE, a bioinspired visuo-motor control system for the guidance of Micro-Air Vehicles,"

Proceeding of Bioengineered and Bioinspired Systems, Maspalomas, Spain, SPIE, Bellingham USA, 2003, pp. 1-12.

F. Ruffier and N. Franceschini,

"Visually guided Micro-Aerial Vehicle : automatic take off, terrain following, landing and wind reaction,"

Proceeding of International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2004), Nouvelle Orléans, USA, IEEE, 2004, pp. 2339-2346.

F. Ruffier, S. Viollet, S. Amic, and N. Franceschini,

"Bio-inspired optical flow circuits for the visual guidance of Micro-Air Vehicles,"

Proceeding of Int. Symposium on Circuits And Systems (ISCAS), Bangkok, Thailand, IEEE, 2003, pp. 846-849.

F. Saager and M. Gewecke

"Die Heuschreckenantenne als Beschleunigungs-Sinnesorgan (The antenna of locusts as an acceleration sense organ),"

Verh. Dtsch. Zool. Ges., vol. 78, pp. 240, 1985.

F. Saager and M. Gewecke

"Antennal reflexes in the desert locust *Schistocerca gregaria*,"
J. Exp. Biol., pp. 519-532, 1989.

C. Schilstra and J. H. van Hateren

"Blowfly flight and optic flow. I. Thorax kinematics and flight dynamics,"
J. Exp. Biol. 202, vol. 202, pp. 148 -1490, 1999.

A. Sherman and M. H. Dickinson

"A comparison of visual and haltere-mediated equilibrium reflexes in the fruit fly *Drosophila melanogaster*,"
J Exp Biol, vol. 206, pp. 295-302, 2003.

A. W. Snyder

"Acuity of compound eyes : physical limitations and design,"
J. Comp. Physiol., vol. 116, pp. 161-182, 1972.

M. V. Srinivasan

"A visually evoked roll response in the housefly,"
J. Comp. Physiol., vol. 119, pp. 1-14, 1977.

M. V. Srinivasan, S. W. Zhang, J. Chahl, E. Barth, and S. Venkatesh

"How Honeybees make grazing landings on flat surfaces,"
Biological Cybernetics, vol. 83, pp. 171-183, 2000.

M. V. Srinivasan, S. W. Zhang, M. Lehrer, and T. S. Collett

"Honeybee navigation en route to the goal: visual flight control and odometry,"
J. Exp. Biol., vol. 199, pp. 237-244, 1996.

G. Stange

"The ocellar component of flight equilibrium control in dragonflies,"
J Comp Physiol, vol. 141, pp. 335-347, 1981.

G. Steiner

"Zur Duftorientierung fliegender Insekten,"
Naturwissenschaften, vol. 40, pp. 514-515, 1953.

N. Strausfeld

Atlas of an insect brain. Heidelberg: Springer, 1976.

N. J. Strausfeld

"Beneath the compound eye : neuroanatomical analysis and physiological correlates,"
in Facets of vision, D. G. Stavenga and R. C. Hardie, Eds. Berlin: Springer, 1989, pp. 317-359.

N. J. Strausfeld, H. S. Seyan, and J. J. Milde

"The neck motor system of the fly *Calliphora erythrocephala*. 1. Muscles and motor neurons,"
J. Comp. Physiol. (A), vol. 160, pp. 205-224, 1987.

H. Tennekes

"A model for the dynamics of the inversion above a convective boundary layer,"
J. Atmos. Sci., vol. 30, pp. 558-567, 1973.

S. Thakoor, J. Chahl, M. V. Srinivasan, L. Young, F. Werblin, B. Hine, and S. Zornetzer
 "Bioinspired Engineering of Exploration Systems for NASA and DoD,"
Artificial Life, vol. 8, pp. 357-369, 2002.

G. Turbelin

"Modélisation de la turbulence atmosphérique en vue de l'étude du chargement
 aérodynamique des structures soumises aux effets du vent,"
 Thèse de Doctorat, Evry: Université d'Evry Val d'Essonne.

S. Ullman

"Analysis of visual motion by biological and computer systems,"
IEEE Computer, vol. 14, pp. 57-69, 1981.

J. H. van Hateren and C. Schilstra

"Blowfly flight and optic flow II. Head movements during flight,"
J. Exp. Biol. 202, vol. 202, pp. 1491 -1500, 1999.

S. Viollet

"Capteur visuel neuromimétique et applications à la stabilisation et à la poursuite fine d'objets
 par un micro-aéronef,"
 Thèse de doctorat, Grenoble: Institut National Polytechnique de Grenoble (INP Grenoble).

S. Viollet and N. Franceschini,

"A miniature biomimetic gaze control system,"
 Proceeding of Int Conf on Robotics and Automation ICRA 2004, New-Orleans, USA, IEEE,
 2004, pp. 504-510.

H. Wagner

"Flight performance and visual control of the flight of the free-flying housefly (*Musca
 domestica*). II. Pursuit of targets.,"
Phil Trans R Soc Lond B, vol. 312, pp. 553-579, 1986.

Z. Waloff

"Orientation of flying locusts, *Schistocerca gregaria* (Forsk.),"
Bull. ent. Res., vol. 62, pp. 1-72, 1972.

T. C. D. Whiteside and G. D. Samuel

"Blur zone,"
Nature London, vol. 225, pp. 94-95, 1970.

C. Williams

Insect migration, Second edition ed. London: Collins, 1965.

W. C. Wu, L. Schenato, R. J. Wood, and R. S. Fearing,

"Biomimetic Sensor Suite for Flight Control of a Micromechanical Flying Insect: Design and
 Experimental Results,"
 Proceeding of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), Taipei, Taiwan, 2003,
 pp. 1146-1151.

J. C. Zufferey, A. Beyeler, and D. Floreano,
"Vision-based Navigation from Wheels to Wings,"
Proceeding of International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'2003),
IEEE/RSJ, 2003, pp. 2968-2973.

PILOTE AUTOMATIQUE BIOMIMETIQUE

Système générique inspiré du contrôle visuomoteur des insectes pour le *décollage*, le *suivi de terrain*, la *réaction au vent* et l'*atterrissage* automatiques d'un micro-aéronef

Le pilote automatique appelé OCTAVE (Optic flow based Control sysTem for Aerial VEhicles) s'appuie sur une hypothèse des années 1950 selon laquelle un insecte pourrait naviguer en « maintenant constante la vitesse de l'image rétinienne » perçue par la partie ventrale de son œil composé. En formalisant cette hypothèse, nous sommes parvenus à proposer un principe générique de *régulation du flux optique*. Nous avons validé ce principe en le mettant en oeuvre à bord d'un micro-aéronef à voilure tournante construit au laboratoire. L'appareil est doté d'un œil élémentaire équipé d'un Détecteur Élémentaire de Mouvement (DEM), inspiré de travaux électrophysiologiques du laboratoire sur l'œil de mouche, et capable d'estimer le *flux optique* généré par le mouvement même du micro-aéronef survolant un panorama contrasté. Nous avons montré expérimentalement sur ce robot captif qu'une *boucle de régulation du flux optique* conduit l'appareil à éviter les collisions avec le sol en effectuant un suivi de terrain à distance de sécurité, même en présence de vent contraire ou de vent arrière. Mieux encore, une simple commande de tangage conduit l'appareil à décoller ou atterrir automatiquement. Ces performances sont notoires eu égard au caractère minimaliste du traitement réalisé à bord, compatible avec la faible capacité d'emport d'un micro-aéronef (naturel ou artificiel) de masse inférieure à 100 grammes. Le système proposé se révèle extrêmement puissant car il permet à un aéronef de s'affranchir de son avionique traditionnelle, constituée de capteurs lourds et onéreux.

Mots clefs- *Aéronef sans pilote, micro-drone, pilote automatique, flux optique, robotique d'inspiration biologique, bionique, biomimétisme.*

BIOMIMETIC AUTOPILOT

Generic system inspired by insects' visuomotor control for automatic *take-off*, *terrain following*, *wind reaction* and *landing* of a micro-air vehicle

The autopilot called OCTAVE (Optic flow based Control sysTem for Aerial VEhicles) is based on the hypothesis made in the 50s according to which an insect could navigate by "maintaining constant the retinal image velocity" seen by the ventral part of its compound eye. By formalizing this hypothesis, we have succeeded in suggesting the generic principle of *optic flow regulation*. We have validated this principle by implementing it onboard a laboratory-made rotary wing micro-air vehicle. This air-vehicle is equipped with an Elementary Motion Detector (EMD) inspired by electrophysiological discoveries made in our laboratory on housefly's eye. Such EMD is capable of assessing the optical flow generated by the own motion of the aerial vehicle flying over a contrasted scene. We have shown experimentally on the tethered robot that an *optic flow regulation loop* leads the vehicle to avoid ground obstacles by performing terrain following at a safe distance from the ground, even in the presence of head wind or tail wind. Better still, a simple control signal on the robot's pitch leads to an automatic take off or to an automatic landing. Such performance is outstanding compared to the minimalist processing system implemented onboard, processing which is compatible with the low payload of a micro-air vehicle (natural or artificial) whose mass is inferior to 100 grams. The suggested autopilot proved to be very powerful insofar as it frees aerial vehicles from their traditional bulky and expensive avionics.

Index Terms - *UAV (Unmanned Aerial Vehicles), MAV (Micro-Air Vehicles), AFCS (Automatic Flight Control System), optical flow (OF), Biorobotics, bionics, Biomimicry.*

Laboratoire Mouvement et Perception (CNRS / Univ. de la Méditerranée)
Equipe Biorobotique
31, chemin Joseph Aiguier
13402 Marseille Cedex 20, France
ruffier@laps.univ-mrs.fr