

**UNIVERSITE MONTPELLIER II
SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC**

N°attribué par la bibliothèque

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

T H E S E

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE MONTPELLIER II

Discipline : Systèmes Automatiques et Microélectroniques

Ecole Doctorale : Information, Systèmes, Structures

présentée et soutenue publiquement

par

Lubin KERHUEL

le 16 décembre 2009

Titre

Capteurs optiques minimalistes et réflexes oculomoteurs biomimétiques.
Applications à la robotique aérienne

JURY

M. B. JOUVENCEL	, Président
M. N. FRANCESCHINI	, Directeur de Thèse
M. R. ZAPATA	, Co-directeur de Thèse
Mme. I. FANTONI-COICHOT	, Rapporteur
Mme. E. PISSALOUX	, Rapporteur
M. N. MARCHAND	, Examineur
M. N. CHAILLET	, Examineur
M. S. VIOLLET	, Examineur

REMERCIEMENTS

Je tiens en tout premier lieu à remercier Nicolas Franceschini, Directeur de Recherche CNRS à l'Institut des Sciences du Mouvement (ISM) E-J. Marey (UMR 6233), pour l'opportunité de travailler au sein de l'équipe Biorobotique sur des sujets de recherche transdisciplinaires, pour son encouragement, ses nombreux conseils et son attention, qui m'ont amené à explorer jusqu'au bout les nouvelles idées découvertes au cours de la thèse.

Je remercie également Stéphane Viollet pour m'avoir formé au sein de l'équipe, encadré sur toute la partie liée à la robotique ainsi que pour m'avoir confié le sujet de recherche faisant suite à ses travaux de thèse.

Je remercie mon co-directeur de thèse ainsi que tous les membres du jury (le Président, les Rapporteurs, et les Examineurs) pour avoir accepté d'évaluer mon travail :

- M. Bruno Jouvencel, Professeur à l'Université de Montpellier II, Président,
- M. René Zapata, Professeur à l'Université de Montpellier II, Co-directeur,
- Mme. Isabelle Fantoni-Coichot, Chargé de Recherche CNRS à l'Université de Technologie de Compiègne (HEUDIASYC UMR 6599), Rapporteur,
- Mme. Edwige Pissaloux, Professeur à l'Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique (ISIR), Université Pierre et Marie CURIE, Rapporteur,
- M. Nicolas Marchand, Chargé de recherche au GIPSA-Lab, Examineur, et
- M. Nicolas Chaillet, Professeur à l'Université de Franche-Comté, Examineur.

Je remercie également Julien Serres pour son accueil avenant dans l'équipe, Geoffrey Portelli pour ses nombreux conseils techniques, Franck Ruffier pour les discussions scientifiques et écologiques, et Fabrice Aubépart pour sa bonne humeur et pour m'avoir permis d'encadrer avec lui des séances de travaux pratiques au D.U.T. GEII de Marseille.

Je tiens particulièrement à remercier Marc Boyron pour sa disponibilité qui, entre autres, a permis de résoudre les multiples difficultés rencontrées lors des phases expérimentales, ainsi que pour la conception et la réalisation des cartes électroniques.

Je remercie également l'ensemble des personnes avec lesquelles j'ai travaillé ou que j'ai pu côtoyer au laboratoire, pour les moments constructifs et agréables passés ensemble : Yanick Luparini, Laurent Goffart, Bernadette Besson, Nathalie Fenouil, André Boyer, Pierre Negrel, Jean-Louis Vercher, Ousmane Dieng, Sami Laaouina, Thomas Ray, Raphaël Juston et Fabien Expert.

Je remercie également mes parents et mon frère Matthieu pour m'avoir encouragé dans cette entreprise périlleuse.

Enfin, je remercie tout particulièrement mon épouse Irina pour sa patience, sa présence, et son soutien constant tout au long de ces travaux de thèse.

ACRONYMES

- CAG** Contrôle Automatique de Gain
- CAN** Convertisseur Analogique-Numérique
- DEM** Détecteur Elementaire de Mouvement
- FLIR** Forward Looking Infrared Sensor
- FPGA** Field-Programmable Gate Array
- FTM** Fonction de Transfert de Modulation
- FWHM** Full Width at Half Maximum ($\Delta\rho$)
- GPS** Global Positionning System
- ISM** [Institut des Sciences du Mouvement](#)
- LORA** Lateral Optic flow Regulation Autopilot
- MEMS** Micro Electro-Mechanical System
- MIPS** Millions d'Instructions Par Seconde
- MLI** Modulation en Largeur d'Impulsion ([PWM](#))
- OCTAVE** Optical flow based Control sysTem for Aerial VEHicles
- OSCAR** Optical Scanning Sensor for the Control of Autonomous Robots
- PWM** Pulse Width Modulation ([MLI](#))
- RFV** Réflexe de Fixation Visuelle
- RIF** Réponse Impulsionnelle Finie
- RII** Réponse Impulsionnelle Infinie
- PLL** Phase Lock Loop
- RVO** Réflexe Vestibulo-Oculaire ([VOR](#))
- UART** Universal Asynchronous Receiver Transmitter
- VCM** Voice Coil Motor
- VLSI** Very Large-Scale Integration

VODKA Vibrating Optical Device for the Kontrol of Autonomous-robots

VOR Vestibulo Ocular Reflex ([RVO](#))

TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction	15
2. Des capteurs visuels minimalistes	17
2.1 L'optique	17
2.1.1 L'œil composé de l'insecte	17
2.1.2 L'œil du robot	20
2.1.3 Caractéristiques optiques : Identification et Réglage	23
2.1.4 Propriétés de filtrage spatial	31
2.2 Transduction & codage de l'information	35
2.2.1 Mise en forme du signal visuel chez l'insecte	35
2.2.2 Mise en forme du signal en électronique	39
2.2.3 Modélisation du filtre analogique et des signaux Ph'_1 et Ph'_2	40
2.2.4 Filtrage numérique	42
2.3 Capteur de flux optique	46
2.3.1 Définition du flux optique	46
2.3.2 La mesure du flux optique	48
2.3.3 Les évolutions du capteur de flux optique DEM bio-inspiré réalisé au laboratoire de biorobotique	53
2.3.4 Un capteur DEM d'un nouveau type capable d'estimer le flux op- tique de manière continue et bidirectionnelle	57
2.3.5 Discussion	71
2.4 Le capteur de position angulaire OSCAR revisité	76
2.4.1 Capteur visuel doté d'une micro-vibration	76
2.4.2 Le capteur OSCAR de 1998 à 2009	79
2.4.3 Le capteur OSCAR revisité	89
2.5 VODKA, un capteur de position angulaire doté d'hyperacuité	102
2.5.1 Description du capteur	102
2.5.2 Choix de l'expression du capteur S_{VODKA}	106

2.5.3	Principe du capteur VODKA	109
2.5.4	Modélisation du capteur VODKA	109
2.5.5	Simulation	116
2.5.6	Mise en œuvre et robustesse	121
2.5.7	Résultats expérimentaux	127
2.5.8	Guidage visuel d'un robot aérien sans actionnement spécifique . .	141
2.5.9	Variations paramétriques	147
2.5.10	Comparaison des capteurs visuels OSCAR & VODKA	161
2.5.11	Discussion	166
3.	OSCAR II : un robot doté de réflexes oculomoteurs	169
3.1	Introduction	169
3.1.1	Stabilisation de la vision dans le vivant	171
3.1.2	Stabilisation de la vision en robotique	171
3.1.3	Éléments clefs pour la stabilisation visuelle	173
3.2	Le robot aérien OSCAR II	175
3.2.1	La plateforme aérienne	175
3.2.2	Le système visuel du robot	176
3.3	Contrôle du robot par son regard	177
3.3.1	Stratégie de contrôle de l'œil	177
3.3.2	Stratégie de contrôle du cap	185
3.4	Performances du robot OSCAR II	186
3.4.1	Dispositif expérimental	186
3.4.2	Fixation visuelle	186
3.4.3	Réjection des perturbations aérodynamiques	190
3.4.4	Poursuite fine d'une cible	191
3.5	Bilan du robot OSCAR II	194
4.	Conclusion	197
5.	Annexes	201
5.1	Calibration des fronts de contrastes	201
5.2	Le robot OSCAR II	202
5.2.1	Contrôleur de l'œil	202
5.2.2	Contrôleur de cap	203
5.2.3	L'électronique embarquée	206

TABLE DES FIGURES

2.1	L'œil composé	18
2.2	Approximation du disque d'Airy par une fonction gaussienne	19
2.3	Convolution de la sensibilité directionnelle d'un rhabdomère avec la sensibilité gaussienne de la cornée	20
2.4	Capteur Ic-Haus	21
2.5	Sensibilité directionnelle $s(\Psi, \theta)$ à 2 dimensions	23
2.6	Sensibilité directionnelle $s(\Psi)$ à 1 dimension	26
2.7	Stimulus permettant l'identification des paramètres $\Delta\rho$ et $\Delta\varphi$	27
2.8	Identification des paramètres optiques $\Delta\rho$ et $\Delta\varphi$	29
2.9	Définition de la Fonction de Transfert de Modulation (FTM)	31
2.10	Fonction de Transfert de Modulation (FTM)	32
2.12	Transmission d'un rhabdomère, filtrage passe-haut	37
2.13	Filtrage passe-bas	38
2.16	DEM - filtre passe-bande analogique	40
2.17	DEM - filtre passe-bande analogique : diagramme de Bode	41
2.18	Filtre numérique (Réponse Impulsionnelle Finie (RIF)) passe-bas des photodiodes	43
2.19	Filtrage passe-bas : Comparaison Réponse Impulsionnelle Infinie (RII) (Butterworth) et RIF	44
2.20	Distinction entre flux optiques de translation et de rotation	47
2.21	Chronologie d'apparition de DEM sous la forme de composants VLSI	49
2.22	Schéma du capteur de flux optique à 1 seuil	51
2.23	Caractéristiques optiques du capteur de flux optique	52
2.24	Évolutions des Circuits DEMs réalisés au laboratoire de 1986 à 2008	54
2.25	Les 5 étapes du nouveau capteur de flux optique	60
2.26	Schéma du capteur de flux optique bidirectionnel	61
2.27	Schéma du capteur de flux optique	63
2.28	Capteur de flux optique : tableau d'évolution de Δt	64

2.29	Capteur de flux optique : évolution de Δt par la méthode \oplus (xor)	65
2.30	Capteur de flux optique : 3 autres méthodes pour l'évolution de Δt	66
2.31	Mesure de flux optique	72
2.32	Détail de la mesure de flux optique	73
2.33	Réponse des deux types de DEM à une rampe de flux optique	74
2.34	Détail de la mesure d'une rampe de flux optique	75
2.35	Muscles MOS et MOT actionnant la rétine de la mouche <i>Musca Domestica</i>	77
2.36	Deux photorécepteurs vibrants	80
2.37	CAO du Système visuel complet du robot OSCAR II	81
2.38	Sensibilité directionnelle $s(\Psi)$ à 1 dimension	82
2.39	Commande du muscle MOT chez la mouche domestique en vol	83
2.40	Principe du capteur OSCAR (1999-2006)	85
2.41	Dispositif de balayage des axes optiques utilisant un micro moteur DC (99)	86
2.42	Balayage des axes optiques utilisant une lame piézo-électrique	87
2.43	Caractéristiques statiques <i>simulées</i> du capteur OSCAR avec des lois de balayage <i>exponentielle, linéaire</i> ou <i>sinusoïdale</i>	90
2.44	Caractéristiques expérimentales du capteur Optical Scanning Sensor for the Control of Autonomous Robots (OSCAR) avec des lois de balayage exponentielle, linéaire ou sinusoïdale	91
2.45	Caractéristiques <i>simulées</i> du capteur OSCAR avec une loi de balayage triangulaire (linéaire) d'amplitude réduite à $\frac{\Delta\varphi}{2}$	92
2.46	Caractéristiques <i>expérimentales</i> du capteur OSCAR, loi de balayage triangulaire (linéaire) d'amplitude réduite à $\frac{\Delta\varphi}{2}$	93
2.47	Signaux simulés Ph et Ph' du capteur OSCAR lors d'un brusque mouvement de balayage, pour différentes positions d'un bord contrasté placé devant le dispositif	94
2.48	Signaux simulés Ph et Ph' du capteur OSCAR lors d'un balayage triangulaire, pour différentes positions d'un bord contrasté placé dans son champ visuel	96
2.49	Signaux Ph' réels mesurés sur le capteur OSCAR lors d'un balayage à vitesse constante, pour différentes positions d'un bord contrasté placé devant le dispositif	97
2.50	Planche de signaux simulés Ph et Ph' du capteur OSCAR lors d'un balayage à vitesse constante, pour différentes positions d'un bord contrasté placé devant le dispositif équipé ici d'un CAG	99

2.51	Deux photorécepteurs vibrants	103
2.52	Mécanique et optique du robot	104
2.53	Sensibilité directionnelle $s(\Psi)$ à 1 dimension	105
2.54	Tracé théorique de $\frac{Ph'_1}{Ph'_2}$ et $Ph'_1 - Ph'_2$	108
2.55	Caractéristique statique du capteur VODKA face à un bord contrasté	112
2.56	Caractéristique statique du capteur VODKA face à une barre	115
2.57	Simulation du capteur de position angulaire VODKA utilisant une modulation sinusoïdale	117
2.58	Simulation du capteur Vibrating Optical Device for the Kontrol of Autonomous-robots (VODKA) utilisant une modulation triangulaire	118
2.59	Schéma de fonctionnement du capteur de position VODKA	122
2.60	3 types de démodulateur	125
2.61	Simulation du capteur VODKA basée sur des données réelles	128
2.62	Simulation du capteur VODKA basée sur des données réelles	129
2.63	Caractéristique statique du capteur VODKA intégré dans un microcontrôleur	130
2.64	Détail de la caractéristique statique du capteur VODKA	131
2.65	PSD Micro Vibration - Résultat expérimentaux : robustesse au contraste	135
2.66	Robustesse du capteur VODKA à la polarité de la barre	137
2.67	Caractéristique statique simulée du capteur VODKA	139
2.68	Photo du robot OSCAR II	141
2.69	Fixation visuelle d'une cible fixe par le robot OSCAR II équipé du capteur VODKA	143
2.70	Poursuite fine d'une cible <i>mobile</i> par le robot OSCAR II équipé du capteur VODKA	145
2.71	Caractéristiques statiques <i>théoriques</i> du capteur VODKA face à une barre de largeur L	148
2.72	Caractéristique statique <i>mesurées</i> du capteur VODKA pour trois barres de largeurs différentes	149
2.73	Effet théorique du rapport $\frac{\Delta\rho}{\Delta\varphi}$ sur la localisation d'un bord contrasté	152
2.74	Effet théorique du rapport $\frac{\Delta\rho}{\Delta\varphi}$ sur la localisation d'une barre	153
2.75	Caractéristique statique du capteur VODKA face à un bord contrasté	154
2.76	Caractéristique statique du capteur VODKA face à une barre	155
2.77	Effet théorique de l'amplitude A du balayage Ψ_{mod} sur la caractéristique statique du capteur VODKA face à un bord contrasté	158

2.78	Effet théorique de l'amplitude A du balayage Ψ_{mod} et de l'angle d'acceptance $\Delta\rho$ sur la caractéristique statique du capteur VODKA	159
2.79	Comparatif : Capteur VODKA & Capteur OSCAR	165
3.1	Le robot OSCAR II	170
3.2	CAO du robot OSCAR II et détail du système visuel	176
3.3	Schéma du système oculomoteur du robot OSCAR II (vue de dessus)	178
3.4	Robot OSCAR II : Schéma de contrôle des réflexes oculomoteurs	180
3.5	Robot OSCAR II : Schéma de contrôle général	181
3.6	Robot OSCAR II : Stabilisation du regard lors d'un changement brusque de cap	182
3.7	Robot OSCAR II : Analyse fréquentielle du Réflexe Vestibulo-Oculaire (VOR) (RVO)	183
3.8	Robot OSCAR II : œil couplé vs œil découplé	184
3.9	Robot OSCAR II : Dispositif expérimental	187
3.10	Robot OSCAR II : Verrouillage de cap ultra précis pendant plus de 30 minutes	188
3.11	Robot OSCAR II : Dérive du cap en l'absence de référence visuelle	189
3.12	Robot OSCAR II : Fixation visuelle d'un bord contrasté en présence d'une perturbation aérodynamique	192
3.13	Robot OSCAR II : Poursuite d'un bord contrasté dynamique en présence de perturbation aérodynamique	193
3.14	Robot OSCAR II : saccades oculaire pour un changement rapide de cible	196
5.1	Contrôleur de l'œil (via le Voice Coil Motor (VCM))	202
5.2	Réponse de l'œil (θ_{er}) à un échelon de 10°	204
5.3	Contrôleur de cap du robot	205
5.4	Robot OSCAR II : Schéma simplifié de l'électronique embarqué	206
5.5	Robot OSCAR II : Photo de l'un des 3 circuits imprimés électroniques	208

LISTE DES TABLEAUX

2.1	Paramètres optiques identifiés à partir de l'enregistrement présenté sur la figure 2.8.	30
2.2	Correspondance d'unités (% - dB)	32
2.3	gain des filtres passe-bas temporels : FIR & Butterworth	44
2.4	Performances du capteur de position VODKA	132
2.5	Caractéristiques comparés des deux capteur OSCAR et VODKA	163
5.1	Calibration des bords contrastés	201

1. INTRODUCTION

Ce travail de thèse a été réalisé à l’[Institut des Sciences du Mouvement](#) (ISM) (CNRS et Institut de la Méditerranée) à Marseille, dans l’équipe [biorobotique](#) dirigée par Nicolas Franceschini. Cette thèse s’inscrit dans le cadre des travaux de robotique inspirée de la biologie, commencés dans l’équipe voici plus de 20 ans.

En robotique mobile, la navigation à base de vision s’appuie traditionnellement sur des imageurs de type “caméra”, dotés typiquement de plusieurs centaines de milliers de pixels, lus séquentiellement. Le traitement de ces flux d’images nécessite une puissance de calcul qu’il serait aujourd’hui difficile de mettre en œuvre à bord d’un micro-aéronef de quelques grammes ou dizaines de grammes.

Il existe pourtant déjà quelques agents dont les performances de navigation en milieu inconnu sont inégalées et qui fonctionnent de toute autre façon. Les oiseaux et les insectes montrent, en effet, une capacité inégalée à éviter les obstacles et à poursuivre leurs proies ou leurs congénères. Cette capacité étonnante découle de leur perception particulière de l’environnement. Si les insectes, aux faibles capacités cognitives, perçoivent leur environnement de manière si efficace, c’est grâce aux capteurs minimalistes qu’ils embarquent. Certains insectes, comme la mouche, améliorent encore leur perception de l’environnement en stabilisant leur système visuel, grâce à un découplage tête-corps, associé à un réflexe inertiel équivalent au réflexe vestibulo-oculaire des mammifères. Cette stabilisation de la “*plate-forme visuelle*” semble essentielle car elle permet de simplifier le traitement visuel subséquent et de mettre en œuvre des stratégies de navigation efficaces.

Cette thèse s’inspire largement de ces considérations biologiques et s’articule autour de deux axes :

- un premier axe “*capteur*” qui prend appui délibérément sur un œil élémentaire composé de seulement deux photorécepteurs (deux pixels) :
 1. Nous avons d’abord amélioré les performances (augmentation de la vitesse de rafraîchissement, amélioration de la résolution et diminution du bruit) d’un

capteur de *flux optique* bio-inspiré, construit et largement utilisé au laboratoire depuis 1986 (section 2.3 p.46-76).

2. Nous avons ensuite revisité le principe de fonctionnement du capteur OSCAR, un capteur de position angulaire déjà développé au laboratoire (section 2.4 p.76-102).
 3. Enfin, nous avons proposé un principe de traitement visuel nouveau qui nous a permis de réaliser le capteur VODKA, capable de localiser la *position angulaire* d'un bord contrasté avec une extrême précision (section 2.5 p.102-169).
- un deuxième axe “*réflexe visuo-inertiel*”, pour lequel nous avons réalisé un nouveau mini-robot aérien, appelé OSCAR II. Équipé de notre nouveau capteur optique, le robot OSCAR II, qui ne pèse que 100 grammes, est capable de fixer du regard une cible visuelle stationnaire, et de poursuivre en lacet une cible mobile, en dépit des fortes perturbations aérodynamiques qu'on lui impose. Avec sa capacité à réaliser également des saccades oculaires, il préfigure les micro-véhicules aériens de demain, qui pourront se diriger là où portera leur regard.

2. DES CAPTEURS VISUELS MINIMALISTES

2.1 L'optique

Les propriétés optiques de l'œil composé d'un insecte sont à l'opposé des propriétés recherchées dans les systèmes optiques conventionnels (appareil photo, caméras, télescopes). Cependant, ces caractéristiques originales sont autant de ressources pertinentes pour la conception de capteurs performants, ne nécessitant qu'un minimum de ressources.

Cette partie consacrée à l'optique présente la structure de l'œil composé de l'insecte. Ses deux principales caractéristiques optiques, l'angle d'acceptance $\Delta\rho$ et l'angle interommatidial $\Delta\varphi$ sont définies. On décrit ici la réalisation d'un œil élémentaire, constitué de seulement deux photorécepteurs (photodiodes), et présentant des paramètres optiques voisins de ceux rencontrés dans une ommatidie d'insecte. On analyse ensuite les propriétés originales de *filtrage spatial* inhérentes à cette optique biomimétique.

2.1.1 L'œil composé de l'insecte

L'œil des insectes est composé de “facettes”, chacune coiffant un “petit œil” ou *ommatidie*. Chaque ommatidie est constituée d'une optique (cornée et cône cristallin) et de cellules photoréceptrices qui convertissent les photons absorbés dans leur *rhabdomère* en un potentiel électrique. Ce “potentiel récepteur” est ensuite intégré par des circuits neuronaux, qui en extraient certaines informations visuelles spécifiques (couleur, mouve-

ment, lumière polarisée etc. . .), utiles aux diverses tâches comportementales telles que le maintien de cap, la collecte de nectar, la poursuite d'une proie ou d'un congénère, etc. . .

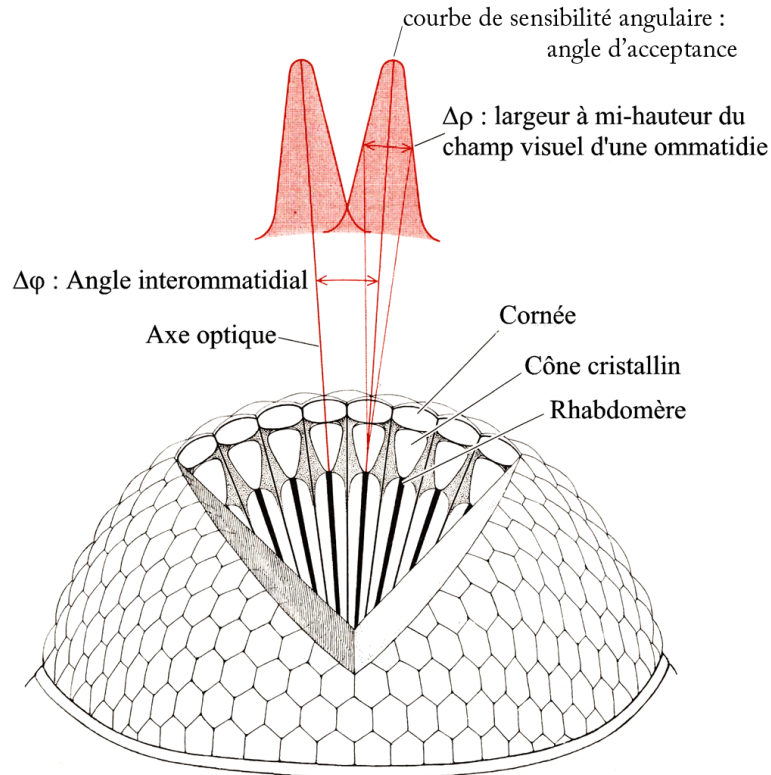


Fig. 2.1: Oeil composé formé de multiples *ommatidies*. Chacune d'elles donne un élément d'image (pixel). Une ommatidie est composée d'une partie "optique" (cornée et cône cristallin) et de cellules rétiniennes dont la partie photoréceptrice (contenant le pigment visuel) s'appelle le *rhabdomère* (voir fig.2.11b p.36). L'angle entre les axes optiques de deux ommatidies adjacentes est noté $\Delta\varphi$. La courbe de sensibilité angulaire ($s(\Psi)$) de chaque ommatidie est caractérisée par sa largeur à mi-hauteur $\Delta\rho$. (Extrait de [Horridge 77]).

Chaque ommatidie contient un nombre déterminé de cellules photoréceptrices (8 chez la mouche, 9 chez l'abeille). Même si les cellules d'une même ommatidie ont parfois des axes optiques individualisés (c'est le cas des Diptères), cela n'a pas pour conséquence une amélioration de l'acuité. Le "câblage" ingénieux des cellules a pour conséquence, au contraire, une amélioration du rapport signal-sur-bruit. On peut donc considérer qu'il y a autant d'éléments d'image (pixels) que d'ommatidies.

Les axes optiques de toutes les ommatidies définissent l'échantillonnage spatial de l'œil, et le nombre d'ommatidies varie suivant les espèces (de 10 à 30000). L'échantillonnage spatial peut varier suivant la région de l'œil. Par exemple, les axes optiques des facettes *frontales* sont resserrés chez le mâle, conférant ainsi un meilleur échantillonnage spatial, donc une meilleure acuité. Cette région caractéristique de l'œil (de la mouche ou de l'abeille) permet au mâle de repérer mieux et plus vite la femelle, et de la poursuivre en vol.

La structure de l'œil composé est relativement simple (voir fig.2.1). Le faible diamètre des facettes (de l'ordre de $25\mu m$) donne naissance à une diffraction importante. L'image d'un point lumineux à travers l'optique d'une facette est une tache d'Airy. Le diamètre Φ_A du disque central de la tache d'Airy dépend de la longueur d'onde λ considérée et du diamètre D de l'optique constitué ici du cône cristallin.

La figure de diffraction est bien approximée par la fonction de distribution gaussienne de largeur à mi-hauteur $\Delta\rho_l = \frac{\lambda}{D}$ (voir figure 2.2).

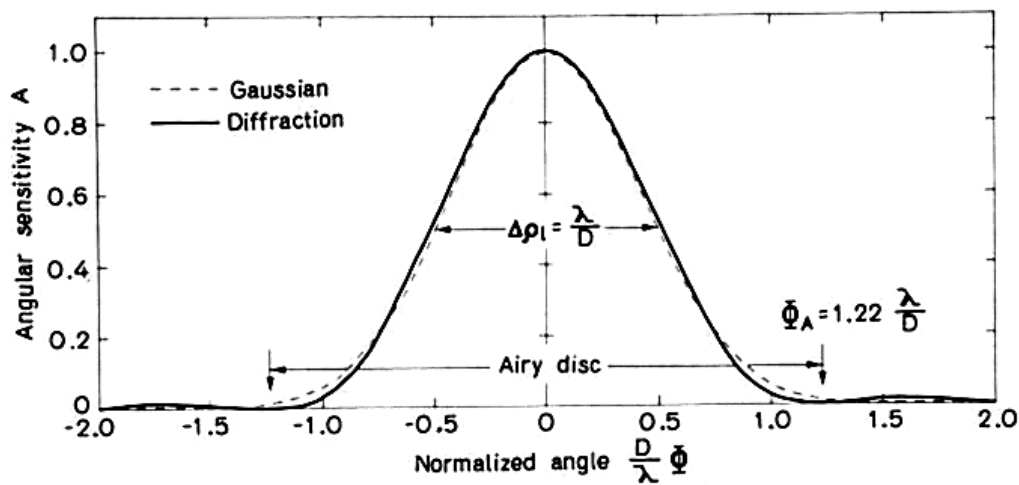


Fig. 2.2: Approximation du disque d'Airy par une fonction gaussienne (Extrait de [Snyder 79]).

Le *rhabdomère* est assimilable à une fine baguette photosensible, entouré de cellules pigmentaires (voir fig.2.11) sur toute sa longueur (100 à $500\mu m$) et jouant ainsi le rôle d'un “guide-d’ondes absorbant”. L’effet guide-d’ondes fait que la sensibilité n’est pas uniforme sur l’embouchure du rhabdomère. La fonction de sensibilité d’un rhabdomère a une distribution normale, de largeur à mi-hauteur notée $\Delta\rho_r$.

La courbe de sensibilité directionnelle d'une cellule photoréceptrice résulte finalement de la convolution entre la caractéristique de la figure de diffraction et la fonction de sensibilité du rhabdomère lui-même [Franceschini 71, Snyder 79, Land 97](voir fig.2.3). La convolution entre deux fonctions gaussiennes donne également une fonction gaussienne, de largeur à mi-hauteur $\Delta\rho$ telle que :

$$\Delta^2\rho \approx \Delta^2\rho_l + \Delta^2\rho_r \quad (2.1)$$

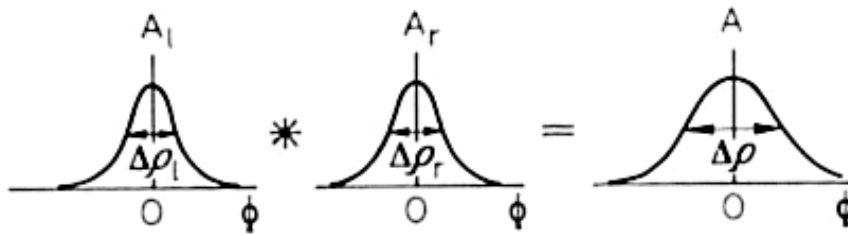


Fig. 2.3: Sensibilité directionnelle d'un photorécepteur d'une ommatidie résultant de la convolution de la sensibilité directionnelle d'un rhabdomère avec la sensibilité gaussienne de la cornée (from [Snyder 79]).

2.1.2 L'œil du robot

Notre objectif est de réaliser un système visuel élémentaire ayant des caractéristiques optiques voisines de celles rencontrées dans une ommatidie d'insecte, mise à part la sensibilité spectrale. Nous avons utilisé pour ce faire une lentille et deux capteurs photosensibles.

Une lentille convexe de diamètre 5 mm et de focale 8.5mm a été placée devant le capteur optoélectronique. Le diamètre de cette lentille étant beaucoup plus grand que celui d'une facette d'insecte, et beaucoup plus grand que les longueurs d'onde du spectre visible, la diffraction est beaucoup moins importante.

Le capteur Ic-Haus LS2C (fig.2.4b) est utilisé comme capteur optique. Le boîtier utilisé comprend 12 photodiodes disposées sur une grille de 2 X 6 (2 lignes, 6 colonnes). Chaque photodiode a une surface photosensible de 800 X 300 μm . La distance entre les 2 lignes est de 40 μm et la distance entre les 6 colonnes est de 120 μm . Sur ces 12 photodiodes, seules 4 photodiodes centrales sont utilisées. Les photodiodes des colonnes 3 et 4 sont reliées 2

à 2 pour obtenir 2 “photodiodes équivalentes” ayant chacune une surface de $1640 \times 300 \mu m$. Par la suite on désignera par “photodiode” cette réunion verticale de 2 photodiodes ($DD1 + DD2$ et $DC1 + DC2$).

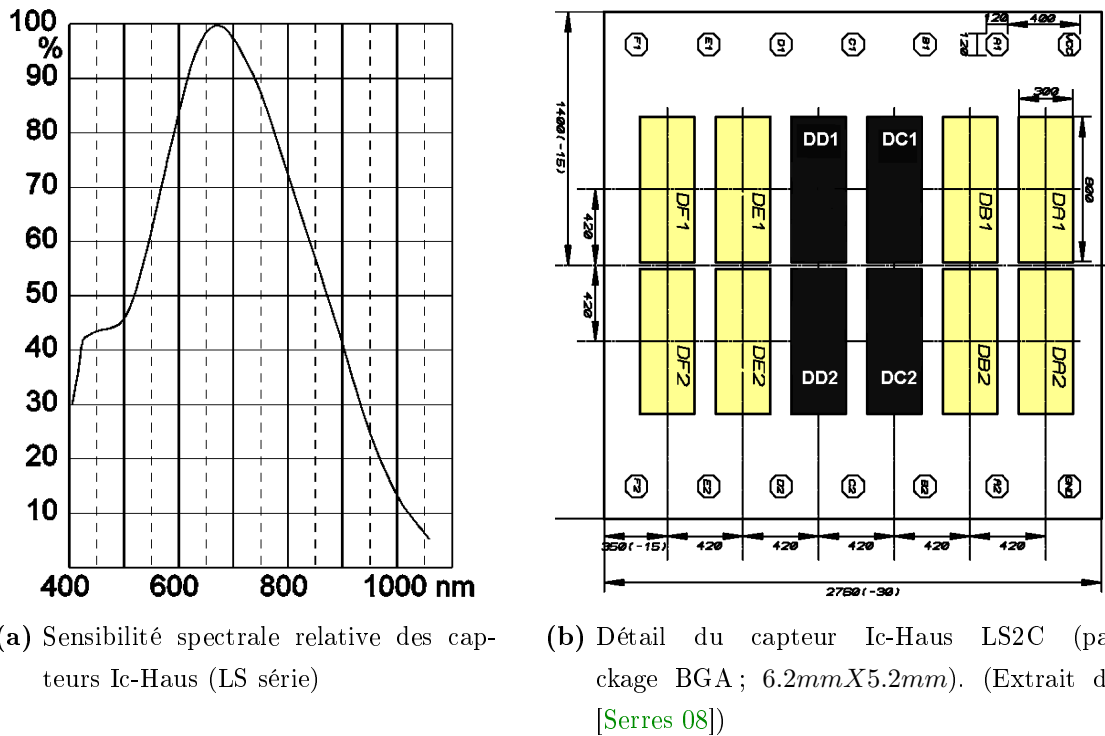


Fig. 2.4: Capteur Ic-Haus. Les 4 photodiodes centrales sont regroupées ($DD1+DD2$ et $DC1+DC2$) pour former deux pixels de $300 \times 1640 \mu m$.

Les fils reliés au capteur doivent être très souples à cause des contraintes mécaniques que nous développerons plus tard. Deux fils fins (diamètre $300 \mu m$) alimentent le capteur sous une tension de 5V. Deux autres fils semblables transmettent le courant préamplifié des deux photodiodes (voir fig.2.4b). L'intégration d'un amplificateur au plus près du pixel permet de réduire la sensibilité aux bruits électromagnétiques, d'autant plus que les fils souples utilisés sont relativement longs et non blindés. Au total, 4 fils fins sont connectés au boîtier.

La sensibilité spectrale du capteur couvre le spectre visible et culmine dans le rouge. Le pic de sensibilité se situe en effet à 680 nm (voir fig.2.4a). La sensibilité dans l'infrarouge est importante. Le capteur est par conséquent particulièrement sensible au rayonnement émis par les ampoules halogènes.

Le flou Gaussien qui, chez l'insecte, était dû à la fois à la diffraction et à la sensibilité gaussienne des rhabdomères, est recréé ici par une *dé-focalisation* délibérée de la lentille. En d'autres termes, la surface photosensible du capteur n'est pas placée à la distance focale de la lentille (8.5mm) (ce qui lui assurerait pourtant une mise au point correcte pour les objets situés au-delà de 1 mètre). Au contraire, la distance lentille - capteur est ajustée (réduite) manuellement de manière itérative (voir section 2.1.3 p.25), jusqu'à obtenir le flou gaussien désiré. A chaque itération, deux paramètres optiques sont identifiés :

- L'écart angulaire $\Delta\varphi$ entre les axes optiques des deux photodiodes.
- L'angle d'acceptance $\Delta\rho$, proportionnel à l'étalement du flou gaussien créé par la dé-focalisation.

La distance lentille-capteur est ajustée jusqu'à ce que l'on obtienne une caractéristique de sensibilité angulaire gaussienne dont les paramètres $\Delta\varphi$ et $\Delta\rho$ correspondent à ce que l'on attend. L'unique variable d'ajustement pour ces deux paramètres est la distance (notée d) séparant la lentille du capteur. Contrairement à l'œil composé, les paramètres $\Delta\varphi$ et $\Delta\rho$ sont couplés, et pour un capteur donné, il n'est pas possible d'ajuster ces deux paramètres de manière indépendante.

2.1.3 Caractéristiques optiques : Identification et Réglage

Sensibilité directionnelle du système optique

On s'intéresse aux paramètres optiques de l'ensemble du dispositif composé de la lentille (5 mm de diamètre, 8.5mm de focale) et du capteur IC-Haus. Le seul réglage sur les paramètres optiques se fait en jouant sur la distance d entre la lentille et le capteur. On souhaite que la sensibilité angulaire de chaque photodiode devienne gaussienne pour réaliser un filtrage spatial dont on montrera l'intérêt en 2.1.4 (p.31). On verra par la suite que de nombreuses possibilités de capteurs originaux (capteur de *flux optique* p.46, capteur de *position OSCAR* p.76 et capteur de *position VODKA* p.102) exploitent les propriétés intéressantes de ce filtrage spatial.

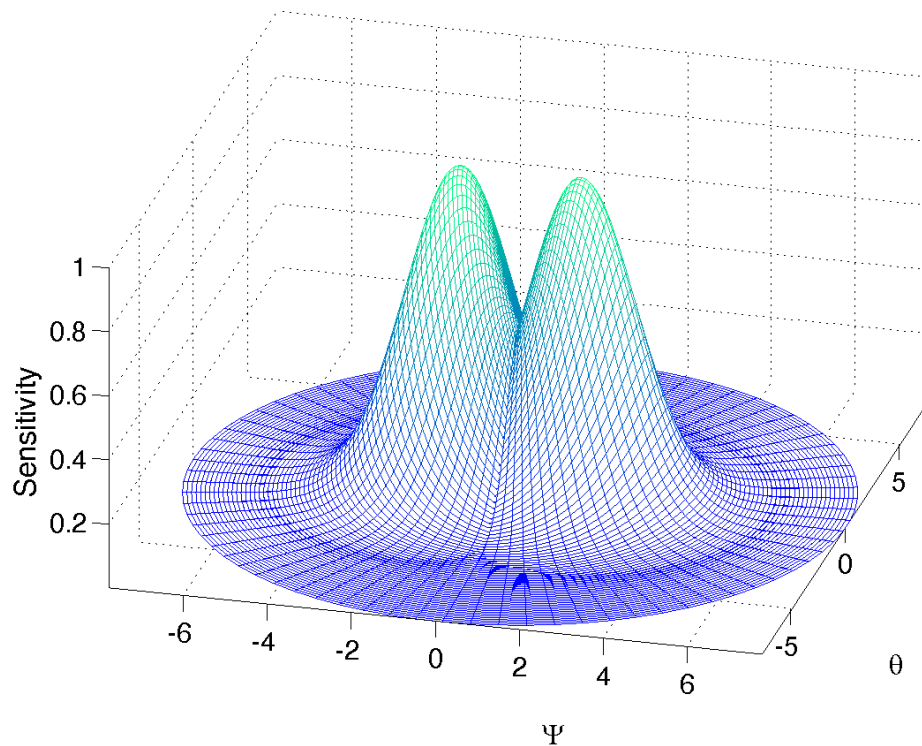


Fig. 2.5: Représentation en 3D de la sensibilité $s(\Psi, \theta)$ normalisée théorique de deux photodiodes placées derrière une même lentille. La dé-focalisation de la lentille crée un flou gaussien. Les deux gaussiennes présentées ici ont les mêmes paramètres que ceux identifiés (sur l'axe Ψ) : largeur à mi-hauteur : $\Delta\rho = 3^\circ$ et distance angulaire entre les 2 axes optiques : $\Delta\varphi = 2.87^\circ$. Ce graphique est une représentation idéalisée de la sensibilité angulaire des photodiodes de section circulaire.

On note $s(\Psi, \theta)$ la fonction de sensibilité angulaire pour chaque photodiode, où Ψ et θ sont les coordonnées de pointage (Ψ représente la direction (azimut) et θ l'élévation).

Comme dans le cas de l'œil composé (voir fig.2.3), la sensibilité angulaire de chaque photodiode va résulter de la convolution entre la sensibilité de la surface photosensible et le cercle de diffusion de l'optique (créé ici par défocalisation). Les photodiodes considérées dans le capteur Ic-Haus (fig.2.4b) ont une dimension de $1640 \times 300 \mu m$. Leur surface photosensible a une réponse uniforme. La sensibilité du dispositif optique final $s(\Psi, \theta)$ est donc la convolution entre la fonction porte (sensibilité de la surface photosensible et la gaussienne (flou obtenu par dé-focalisation)). La fonction de sensibilité $s(\Psi, \theta)$ résultante est voisine d'une gaussienne.

Par simplification, on assimile la sensibilité angulaire $s(\Psi, \theta)$ à une gaussoïde de révolution. On verra en pratique que malgré ces simplifications successives, cette fonction de sensibilité approxime très bien la sensibilité réelle des photodiodes. Cette fonction gaussienne a pour expression :

$$s(\Psi, \theta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2} * \pi} e^{-\frac{\Psi^2 + \theta^2}{2\sigma^2}} \quad (2.2)$$

En pratique, on s'intéresse seulement au défilement ou à la localisation d'amers visuels sur l'axe Ψ . On ramène donc la fonction de sensibilité à 2 dimensions $s(\Psi, \theta)$ à une fonction de sensibilité à 1 dimension en intégrant $s(\Psi, \theta)$ sur la dimension θ :

$$\begin{aligned} s(\Psi) &= \int_{-inf}^{inf} s(\Psi, \theta) d\theta \\ &= \int_{-inf}^{inf} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Psi^2}{2\sigma^2}} e^{-\frac{\theta^2}{2\sigma^2}} d\theta \\ &= \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Psi^2}{2\sigma^2}} \int_{-inf}^{inf} e^{-\frac{\theta^2}{2\sigma^2}} d\theta \\ &= \frac{a}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Psi^2}{2\sigma^2}} \end{aligned} \quad (2.3)$$

La fonction de sensibilité $s(\Psi)$ des deux photodiodes ramenée sur une seule dimension s'écrit finalement :

$$s(\Psi) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2} * \pi} e^{-\frac{\Psi^2}{2\sigma^2}} \quad (2.4)$$

Le paramètre $\Delta\rho$ est la largeur à mi-hauteur (auss appelée "*Full Width at Half Maximum*" ($\Delta\rho$) (*FWHM*)) ou angle d'acceptance) de cette fonction. $\Delta\rho$ se déduit directement de la variance σ^2 par :

$$\Delta\rho = \sigma * \underbrace{2\sqrt{2\ln 2}}_{2.35} \quad (2.5)$$

Il est intéressant de noter que la largeur à mi-hauteur de la fonction de sensibilité ramenée à 1 dimension $s(\Psi)$ est la même que celle à 2 dimensions $s(\Psi, \theta)$.

Cette fonction est souvent utilisée dans le domaine des variables aléatoires (densité de probabilité d'une variable aléatoire gaussienne). La fonction **normpdf** pour "Normal Probability Density Function" est définie dans l'environnement Matlab comme :

$$\text{normpdf}(\Psi, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Psi-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.6)$$

avec 2.4, 2.5 et 2.6, la fonction de sensibilité $s(\Psi)$ peut alors s'écrire en utilisant la fonction de densité de probabilité gaussienne :

$$s(\Psi) = \frac{2\sqrt{\ln(2)}}{\Delta\rho\sqrt{\pi}} * \text{normpdf}\left(\Psi, \mu, \frac{\Delta\rho}{2\sqrt{2\ln 2}}\right) \quad (2.7)$$

Identification de paramètres d'un capteur minimaliste : Angle d'acceptance $\Delta\rho$ et angle inter-photorécepteur $\Delta\varphi$

Nous proposons ici une méthode nouvelle pour estimer les paramètres $\Delta\rho$ et $\Delta\varphi$. La méthode classique (utilisée en particulier en électrophysiologie sur les photorécepteurs d'invertébrés) est une méthode directe. Elle consiste à déplacer une source lumineuse ponctuelle devant le capteur (ou, de manière équivalente, à faire pivoter le capteur autour de son axe vertical devant une source lumineuse ponctuelle fixe) et à enregistrer la sortie des deux photodiodes. Le tracé de la sortie de chaque photodiode en fonction de l'angle sous-tendu par la source lumineuse représente alors leur fonction de sensibilité directionnelle.

La mesure se fait directement par lecture graphique :

- $\Delta\varphi$ est la distance entre les deux courbes mesurées,
- $\Delta\rho$ est la largeur à mi-hauteur de chacune d'elles.

La source lumineuse étant très petite (ponctuelle), son intensité doit être adéquate (grande) pour donner une grandeur physique mesurable par les photodiodes. La plage de cette sortie doit être suffisamment grande pour que le signal utile ne soit pas noyé dans le bruit. Au-delà du problème pratique de trouver une source lumineuse à la fois ponctuelle et puissante, l'éclairage intense d'une très petite partie du capteur peut faire

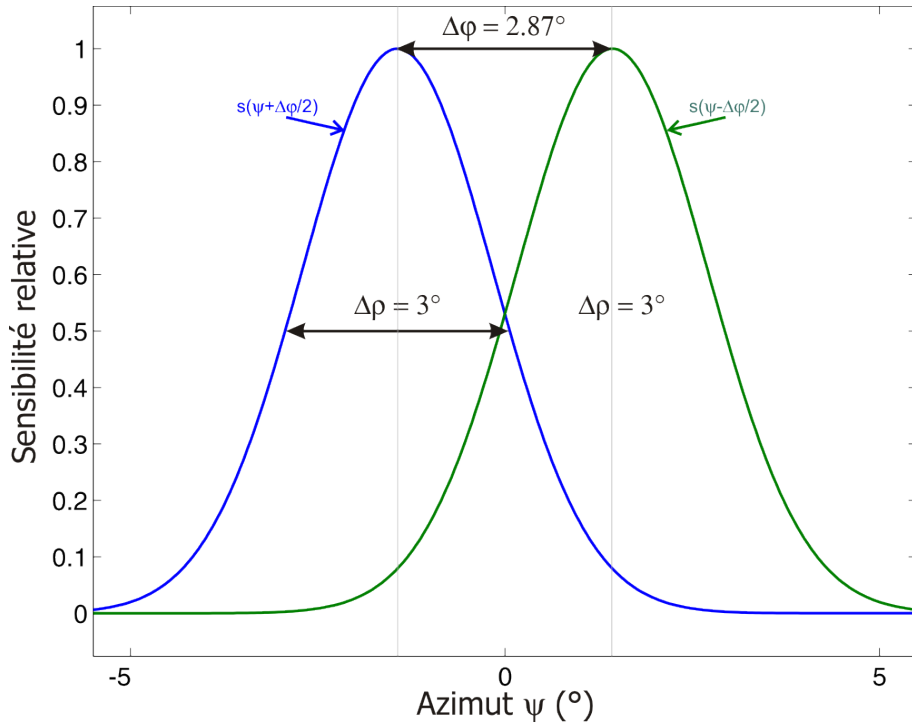


Fig. 2.6: Courbes de sensibilité angulaire $s(\Psi_1)$ et $s(\Psi_2)$ des deux photodiodes résultant de l'identification menées sur chaque signal transitoire de la figure 2.8. Ce graphe présente le modèle identifié (voir la fig.2.8) pour la sensibilité angulaire de chaque photodiode. Les paramètres utilisés ici sont $\Delta\rho = 3^\circ$ et $\Delta\varphi = 2.87^\circ$.

apparaître des phénomènes de saturation. De plus, cette méthode identifie une tranche seulement de la caractéristique réelle (qui est à 2 dimensions : voir fig.2.5), d'où une étape supplémentaire (et contraignante) pour s'assurer que l'on identifie bien la tranche passant par le pic de sensibilité des photorécepteurs. D'une manière plus générale, les conditions de fonctionnement du dispositif optique sont ici éloignées des conditions de fonctionnement naturel. Dans son utilisation classique, le capteur voit des zones de luminance uniforme, séparées par des fronts de contraste. Dans ces conditions, la sortie de chaque photodiode est le produit entre la luminance de l'environnement projeté sur le capteur et la fonction de sensibilité $s(\Psi, \theta)$.

La méthode d'identification proposée ci-après permet d'identifier les caractéristiques du capteur dans ses conditions d'utilisation naturelles, à partir de sa réponse à un *bord contrasté*. Elle permet aussi de minimiser l'erreur de modélisation, sur une réponse à un stimulus, celui que le capteur rencontrera dans son utilisation courante.

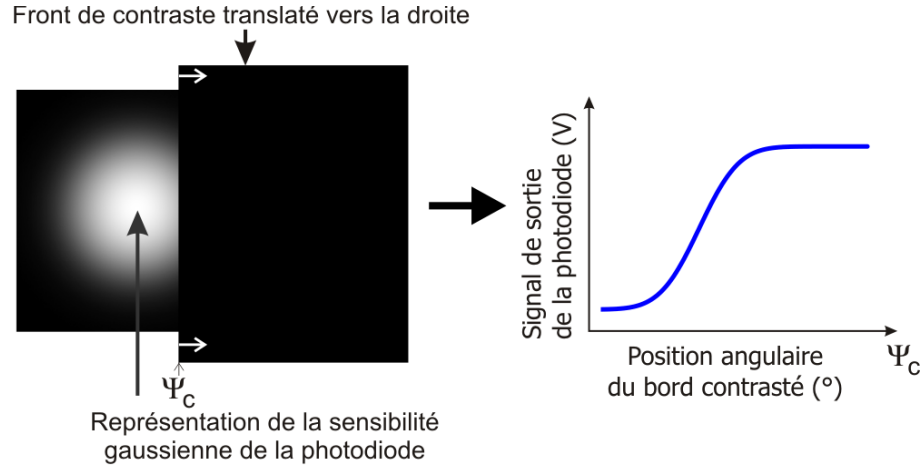


Fig. 2.7: Représentation de la convolution d'un bord contrasté blanc-noir par la sensibilité gaussienne (représentée par la zone blanche) d'une photodiode. La sortie de la photodiode est analogue (proportionnelle) à la "surface apparente" de la zone blanche.

Réponse théorique à un bord contrasté. Placée devant un bord contrasté, chaque photodiode renvoie la convolution de sa fonction de sensibilité $s(\Psi)$ par la luminance du bord contrasté. On se place dans le cas d'un bord contrasté blanc-noir. On admet que la luminance de la zone sombre est nulle, la luminance de la zone claire est de 1. La position angulaire du bord contrasté dans le repère du capteur est notée Ψ_c . Pour une position angulaire donnée, le signal de sortie S_{ph} d'une photodiode est l'intégrale spatiale de sa fonction sensibilité $s(\Psi)$ sur toute la zone claire :

$$S_{ph}(\Psi_c) = \int_{-\infty}^{\Psi_c} s(\Psi) d\Psi = \int_{-\infty}^{\Psi_c} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Psi^2}{2\sigma^2}} d\Psi \quad (2.8)$$

La fonction erreur. L'intégrale (eq. 2.8) n'a pas d'expression analytique, mais rappelle la fonction erreur **erf**, définie comme le double de l'intégrale d'une fonction gaussienne de variance $\sigma^2 = \frac{1}{2}$ (écart type $\sigma = \frac{1}{\sqrt{2}}$) centrée sur 0 :

$$erf(\Psi) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\Psi} e^{-x^2} dx \quad (2.9)$$

On note S la primitive de la fonction de sensibilité ($s(\Psi)$) d'une photodiode qui vaut 0 en $-\infty$.

$$\begin{aligned}
 S_{ph}(\Psi_c) &= \int_{-\infty}^{\Psi_c} s(\Psi) d\Psi \\
 &= \frac{1}{2} \left(1 + erf \left(\frac{\Psi_c * 2\sqrt{\ln(2)}}{\Delta\rho} \right) \right)
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

La réponse de chacune des deux photodiodes, dont les axes optiques sont décalés de $\Delta\varphi$ (situés respectivement à $+\frac{\Delta\varphi}{2}$ et $-\frac{\Delta\varphi}{2}$) s'exprime à partir de l'expression 2.10. On note Ph_1 et Ph_2 les signaux mesurés par chaque photodiode lorsque ces dernières sont placées devant un bord contrasté :

$$\begin{aligned}
 Ph_1(\Psi) &= k * S \left(\Psi - \frac{\Delta\varphi}{2} \right) + Offset_{Ph_1} \\
 &= k * \frac{1}{2} \left(1 + erf \left(\frac{(\Psi - \frac{\Delta\varphi}{2}) * 2\sqrt{\ln(2)}}{\Delta\rho} \right) \right) + Offset_{Ph_1} \\
 Ph_2(\Psi) &= k * S \left(\Psi + \frac{\Delta\varphi}{2} \right) + Offset_{Ph_2} \\
 &= k * \frac{1}{2} \left(1 + erf \left(\frac{(\Psi + \frac{\Delta\varphi}{2}) * 2\sqrt{\ln(2)}}{\Delta\rho} \right) \right) + Offset_{Ph_2}
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

Le gain k représente la différence de luminance entre les deux surfaces délimitant le bord contrasté. Cette différence de luminance dépend à la fois du contraste et de l'éclairement ambiant.

Les équations 2.11 modélisent les réponses des photodiodes à un bord contrasté. La figure 2.8 montre la réponse réelle des deux photodiodes placées devant un bord contrasté translaté horizontalement. Ici, le bord noir entre progressivement dans le champ visuel des photodiodes, entraînant la baisse de la tension de sortie des photodiodes (courbe inversé par rapport à la figure 2.7 où le bord noir sortait progressivement du champ visuel d'une photodiode). Les paramètres du modèle (equation 2.11) sont identifiés à partir de cette expérience. Le paramètre $\Delta\varphi$ (écart angulaire entre les axes optiques des deux photodiodes) est la distance entre les courbes Ph_1 et Ph_2 sur la figure 2.6. De même, $\Delta\rho$ est identifié à partir de ce même enregistrement, de façon à minimiser l'erreur quadratique entre le modèle et les mesures. La figure 2.8 superpose les mesures des deux photodiodes (nuages de points verts et bleus) avec le modèle identifié (lignes continues verte et bleue). Les paramètres calculés sont présentés dans le tableau 2.1. On note $\Delta\rho_1$ et $\Delta\rho_2$ le paramètre $\Delta\rho$ identifié pour chacune des deux photodiodes (Ph_1 et Ph_2).

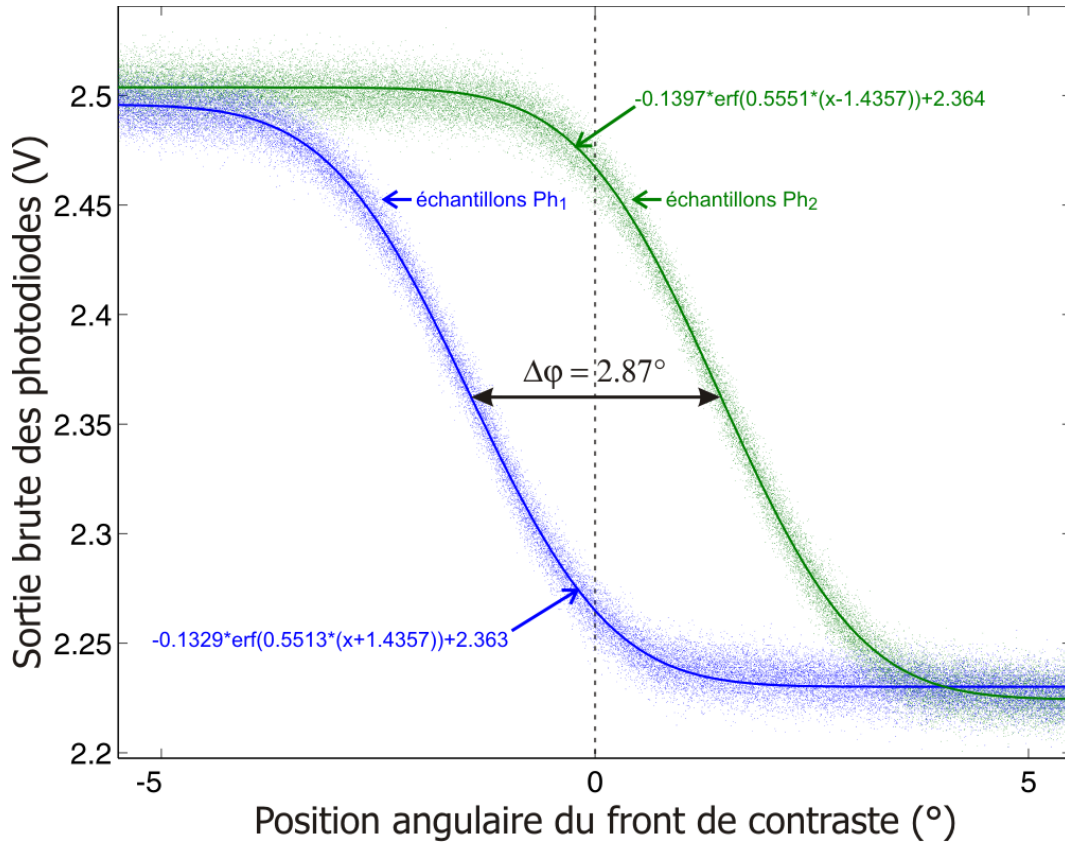


Fig. 2.8: Méthode d'identification des paramètres optiques $\Delta\rho$ et $\Delta\varphi$ des deux photodiodes à partir de leur réponse à un bord contrasté. Un contraste blanc-noir est translaté horizontalement devant chaque photodiode. Le courant de sortie de chaque photodiode est converti en tension à l'aide d'un amplificateur courant-tension. La tension est mesurée avec une carte dSpace RTI1104. Chaque point est une mesure reflétant la sortie de chaque photodiode (bleue : Ph_1 , vert : Ph_2). On identifie les paramètres de l'expression 2.11 qui minimise l'erreur quadratique entre le modèle et les échantillons. On trouve : $\Delta\rho_1 = 3.02^\circ$, $\Delta\rho_2 = 3.00^\circ$ et $\Delta\varphi = 2.87^\circ$. Le modèle correspond parfaitement aux échantillons enregistrés, ce qui confirme l'hypothèse de la sensibilité gaussienne (voir fig.2.6) $s(\Psi)$ du dispositif optique.

$\Delta\rho_1$ est très proche de $\Delta\rho_2$. Par la suite, on considèrera $\Delta\rho = 3^\circ$ pour chacune des deux photodiodes. La figure 2.6 trace la fonction de sensibilité des deux photodiodes avec ces deux paramètres identifiés ($\Delta\varphi$ et $\Delta\rho$).

$$\begin{array}{r} \Delta\rho_1 = 3.02^\circ \\ \hline \Delta\rho_2 = 3.00^\circ \\ \hline \Delta\varphi = 2.87^\circ \end{array}$$

Tab. 2.1: Paramètres optiques identifiés à partir de l'enregistrement présenté sur la figure 2.8.

Les centres des surfaces photosensibles sont séparés par une distance de $420\mu m$. L'estimation de la distance d se fait par la relation géométrique :

$$d = \frac{420 * 10^{-6}}{2 * \text{atan}(\frac{\Delta\varphi}{2})} \quad (2.12)$$

Avec $\Delta\varphi = 2.87^\circ$, on calcule une distance $d = 8.39mm$. D'après cette estimation, le capteur serait donc dé-focalisé de seulement $0.11mm$ par rapport à la distance focale ($f = 8.5mm$) propre à la lentille utilisée (le capteur se trouve entre la lentille et le plan focal).

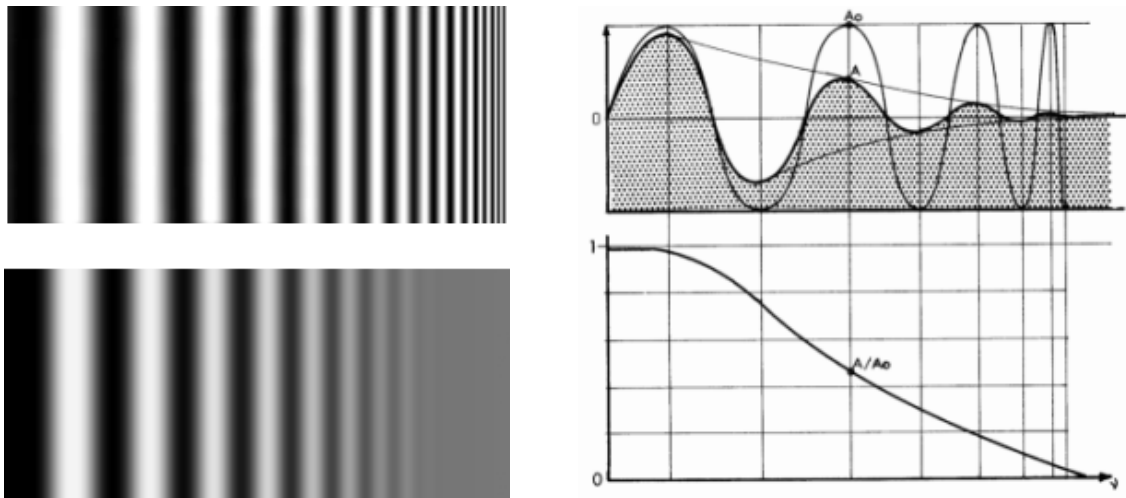
Réponse des photorécepteurs à une barre de largeur L . L'expression mathématique de la réponse à une barre contrastée est l'intégrale de la fonction de sensibilité $s(\Psi)$ (eq 2.10) sur la largeur de cette barre. On nome $Ph_{1\ barre}$ et $Ph_{2\ barre}$ la réponse des deux photodiodes à une barre de largeur L , centrée en Ψ_c .

$$\begin{aligned} Ph_{1\ barre}(\Psi) &= k * S\left(\Psi - \frac{\Delta\varphi}{2} + \frac{L}{2}\right) - S\left(\Psi - \frac{\Delta\varphi}{2} - \frac{L}{2}\right) + Offset_{Ph_1} \\ Ph_{2\ barre}(\Psi) &= k * S\left(\Psi + \frac{\Delta\varphi}{2} + \frac{L}{2}\right) - S\left(\Psi + \frac{\Delta\varphi}{2} - \frac{L}{2}\right) + Offset_{Ph_2} \end{aligned} \quad (2.13)$$

Avec cette expression, une barre blanche sur fond noir est modélisée avec une largeur $L > 0$ et une barre noire sur fond blanc est modélisée avec une largeur $L < 0$.

2.1.4 Propriétés de filtrage spatial

Si l'on ne considère que le plan horizontal, l'environnement vu par le capteur est assimilable à des successions de fronts de contraste verticaux. La sensibilité gaussienne ($s(\Psi)$) de chaque capteur optique agit comme un *filtre spatial* passe-bas. Ce filtre optique est caractérisé par sa Fonction de Transfert de Modulation (FTM), définie comme la réponse d'un capteur à un contraste sinusoïdal en fonction de la fréquence spatiale (voir fig.2.9a et fig.2.9b).



- (a) En haut : contrastes verticaux sinusoïdaux de fréquence spatiale croissante. En bas : filtrage des fréquences spatiales par le capteur. On constate une réduction du contraste de sortie pour les fréquences spatiales élevées.
- (b) FTM, définie comme le rapport entre l'amplitude de la réponse du capteur et l'amplitude du contraste en fonction de la fréquence spatiale.

Fig. 2.9: Fonction de Transfert de Modulation (FTM), d'après [Linfoot 64], illustration extraite de [wikipedia](#) (FTM).

La réponse fréquentielle de ce filtre spatial est entièrement définie par la fonction de sensibilité $s(\Psi)$. Dans le domaine spatial, la réponse du capteur est la convolution entre l'intensité des contrastes vus et la fonction de sensibilité directionnelle $s(\Psi)$. Dans le domaine fréquentiel, la réponse du capteur est le produit entre les fréquences spatiales vues ν et la transformée de Fourier de la fonction de sensibilité $s(\Psi)$.

$$FTM(\nu) = a * e^{\frac{\pi^2}{4 \log(2)} (\nu * \Delta \rho)^2} \quad (2.14)$$

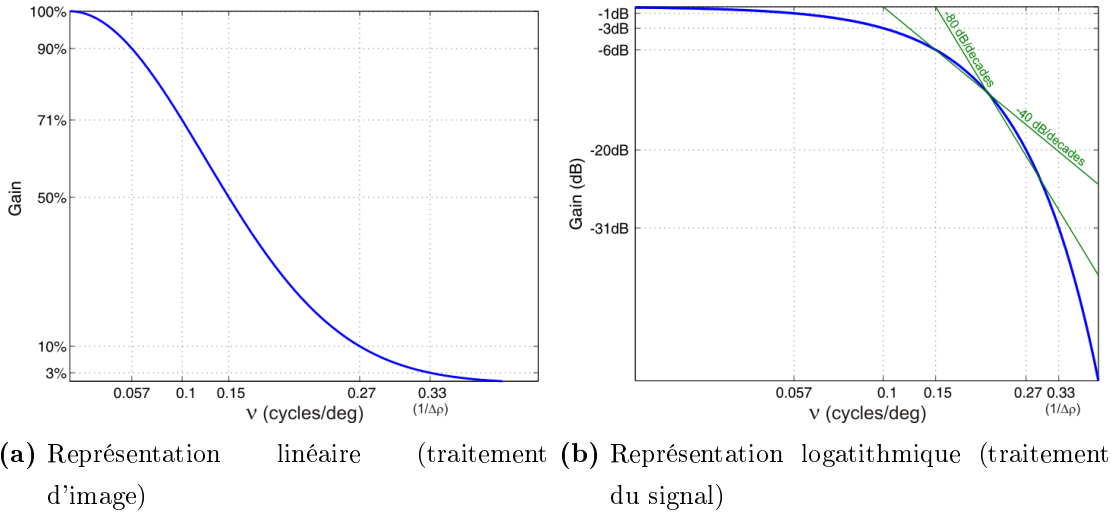


Fig. 2.10: Fonction de Transfert de Modulation (FTM) avec $\Delta\rho = 3^\circ$. (a) FTM tracée selon les conventions du “*traitement d’image*”. (b) FTM tracée selon les conventions du “*traitement du signal*”. Les deux courbes vertes montrent la réponse théorique de filtres d’ordre 2 et 4 et de fréquences de coupure respectives 0.1 et 0.15 cycles/degrés. Ces deux filtres majorant la FTM sont donnés à titre de comparaison.

100	%	0	dB
90	%	-1	dB
71	%	-3	dB
50	%	-6	dB
10	%	-20	dB
3	%	-31	dB

Tab. 2.2: Correspondance d’unités (% - dB) se rapportant à la FTM tracée sur la figure 2.10.

La transformée de Fourier d’une gaussienne est une gaussienne. La FTM d’une photodiode, de sensibilité directionnelle $s(\Psi)$ gaussienne, avec $\Delta\rho = 3^\circ$, est présenté sur la figure 2.10a. Cette représentation, qui utilise une échelle linéaire, est couramment utilisée dans le domaine du traitement d’image. La FTM fournit des indications sur les limites de résolution optique. Cependant, il est difficile de donner une définition de la limite de résolution de l’optique car la FTM, ici gaussienne, n’est ici jamais nulle. En tous cas, le

défilement d'un motif va générer en sortie une modulation d'autant plus faible que la fréquence spatiale sera plus élevée. La présence d'un objet très fin (dont l'angle sous-tendu est inférieur à $\Delta\rho$) dans le champ visuel affectera donc aussi la sortie du capteur, et il sera possible de détecter la présence d'un tel objet. En *traitement d'image*, une fréquence de coupure ν_{co1} est définie comme l'inverse de la largeur à mi-hauteur $\Delta\rho$. Ici, on aurait $\nu_{co} = 0.33\text{cycle}/^\circ$. A cette fréquence, l'atténuation de la FTM est déjà de -31dB , donc très importante. Même les fréquences inférieures à ν_{co} sont déjà largement coupées.

La même FTM est représentée sur la figure 2.10b en utilisant une représentation du type "*traitement du signal*". Le "tableau de correspondances" (2.2) établit une correspondance entre les unités des deux représentations.

La FTM obtenue ne correspond pas à un filtre classique, dans la mesure où l'on ne retrouve pas, sur le graphe, de pente fixe à $-20, -40$ ou $-80\text{dB}/\text{decade}$. Une majoration de cette FTM par des filtres classiques permet de donner des repères. On peut majorer la FTM par deux filtres :

- un filtre d'ordre 2 avec $fc = 0.1\text{cycle}/\text{deg}$,
- un filtre d'ordre 4 avec $fc = 0.15\text{cycle}/\text{deg}$.

Fréquence de coupure ν_{co} . La fréquence de coupure classique en *traitement du signal* (défini à -3dB) serait située ici à $0.1\text{cycle}/^\circ$ ce qui est 3 fois plus faible que la fréquence de coupure ν_{co} définie classiquement en *traitement d'image* comme $\nu_{co} = \frac{1}{\Delta\rho}$. Ces différences de définition de la fréquence de coupure montrent la difficulté de caractériser ce filtre par une valeur numérique unique représentant la fréquence de coupure.

Le filtre d'ordre 4 a une pente importante ($-80\text{dB}/\text{decade}$) et majore relativement bien la FTM. On définira donc la fréquence spatiale de coupure du filtrage optique $\nu_{co} = 0.16\text{cycle}/^\circ$:

$$\nu_{co} = \frac{1}{2\Delta\rho} \quad (2.15)$$

Considération sur $\Delta\varphi$. L'angle $\Delta\varphi$ définit la période d'échantillonnage spatial. La fréquence spatiale de l'échantillonnage est alors :

$$\nu_s = \frac{1}{\Delta\varphi} \quad (2.16)$$

Le théorème d'échantillonnage [Nyquist 28, Shannon 49] s'applique ici. Ainsi, une fréquence d'échantillonnage spatiale supérieure à $2 * \nu_{co} = 0.33\text{cycle}/^\circ$ permet de s'affranchir de tout phénomène de repliement de spectre (*aliasing*), si l'on utilise au préalable un filtrage spatial de fréquence de coupure $\nu_{co} = 0.16\text{cycle}/^\circ$ (ce filtre agit comme filtre anti-repliement). Le dispositif optique va permettre alors de transmettre fidèlement l'intégralité des basses fréquences spatiales de l'environnement (fréquences inférieures à $0.16\text{cycle}/^\circ$). Le critère de Shannon se traduit ici par les contraintes sur $\Delta\rho$ et $\Delta\varphi$:

$$\nu_s \geq 2\nu_{co} \quad (2.17)$$

avec 2.15, 2.16 et 2.17, la condition de Shannon s'écrit à partir de $\Delta\rho$ et $\Delta\varphi$:

$$\Delta\rho > \Delta\varphi \quad (2.18)$$

Dans notre cas, nous sommes proches de la fréquence de Nyquist ($\Delta\rho = 3^\circ$ et $\Delta\varphi = 2.87^\circ$, voir fig.2.8). Par conséquent, le filtrage spatial utilisé assurera la suppression de la majeure partie des phénomènes de repliement susceptibles d'apparaître. La réduction de cet *aliasing* est une étape importante pour éviter les erreurs de mesure, comme on le verra à propos du Détecteur Elementaire de Mouvement (DEM).

2.2 Transduction & codage de l'information

Dans un environnement naturel, la plage de luminance est considérable (ciel nocturne : $10^{-4}cd/m^2$, soleil : $10^9cd/m^2$). Au niveau d'un phototransducteur classique, la conversion d'intensité lumineuse en signal électrique sur une gamme aussi étendue n'est pas possible car des saturations apparaissent. Par ailleurs, cette large gamme de luminance est incompatible avec la dynamique limitée d'un signal électrique (neuronale ou électronique), ce qui contraindrait le gain de phototransduction à être très faible. L'information visuelle utile, constituée de petites variations serait, dans une telle configuration, inutilisable car noyée dans le bruit.

Cette partie décrit l'un des mécanismes d'adaptation à la luminance chez l'insecte. Dès les premières couches neuronales, les faibles variations du signal sont isolées et codées efficacement. La modélisation de ce "conditionnement du signal" et sa réalisation pratique sur un circuit électronique sont décrites. La mise en forme des signaux visuels est une étape préliminaire à toute transformation de ces signaux pour mesurer le flux optique ou la position angulaire d'un objet.

2.2.1 Mise en forme du signal visuel chez l'insecte

Elements d'anatomie

L'optique de l'insecte a été brièvement présentée dans la partie 2.1.1 (p17). Nous entrons plus en détail ici sur la fonction de chaque élément anatomique. La figure 2.11 tirée de [Shaw 81] donne une vue d'ensemble du fonctionnement de l'oeil. Le fonctionnement de l'œil est dit *rétinotopique* car les ganglions optiques successifs de l'insecte contiennent une "carte" reflétant point par point l'information apportée par les ommatidies. On distingue sur la figure 2.11d l'une de ces voies intégrant l'information d'une ommatidie. L'encart (b) montre une coupe longitudinale d'une ommatidie. La cornée (c) et le cône cristallin (cc) forment la partie optique. Deux cellules rétinienne avec leur rhabdomère sont visibles sur

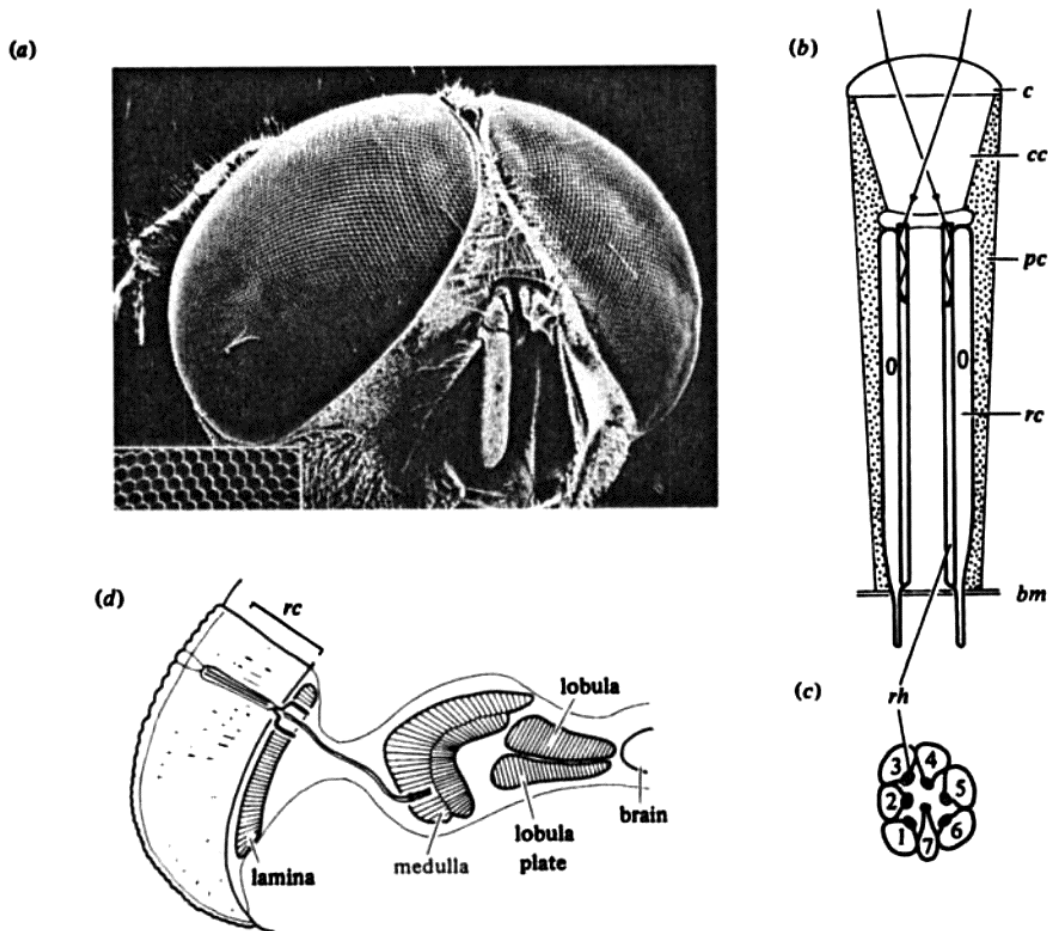


Fig. 2.11: (a) Oeil d'une mouche bleue (*Calliphora erythrocephala*). (b) coupe d'une ommatidie montrant la cornée (c), le cône cristallin (cc), les cellules pigmentaires (pc), les cellule rétinienne (rc) et leur rhabdomère (rh). (c) coupe transversale d'une ommatidie montrant 7 rhabdomères. (d) Schéma montrant les premières couches neuronales qui mettent en forme l'information visuelle. (Extrait de [Shaw 81]).

cette coupe. Leurs axes optiques respectifs sont dessinés. Le rhabdomère, dont le diamètre est de l'ordre du micromètre, donc proche de la longueur d'onde de la lumière visible, se comporte comme un guide-d'ondes (2.12ba p.37) et la transduction des photons absorbés en potentiel électrique s'effectue tout au long de ce rhabdomère. L'encart (d) présente les premiers relais synaptiques. Ceux-ci sont constitués de différentes couches (ganglions optiques) dans l'ordre chronologique suivant :

- la lamina,
- la medulla,
- la lobula et lobula-plate.

Si la plupart des neurones distaux (dans la *retina* et la *lamina*) codent l'information sous la forme de potentiels gradués, nombreux sont les neurones plus profonds (dans la *medulla* et la *lobula*) qui codent le signal sous une forme impulsionnelle (potentiels d'action ou "spikes"). Aujourd'hui, on a encore une vue partielle des traitements effectués dans ces diverses couches neuronales, la mieux connue étant la *lobula-plate* avec ses 60 neurones sensibles au mouvement.

Phototransduction et filtrage

La première étape de filtrage a lieu avant même la phototransduction. Contrairement au filtrage spatial décrit dans la partie 2.1.4 (p31), le filtrage effectué par les couches neuronales est un filtrage temporel.

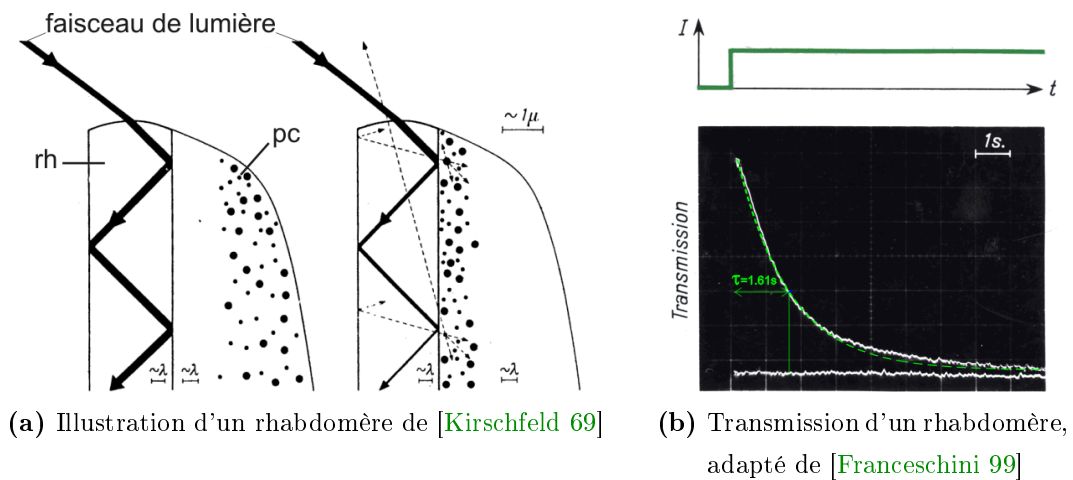
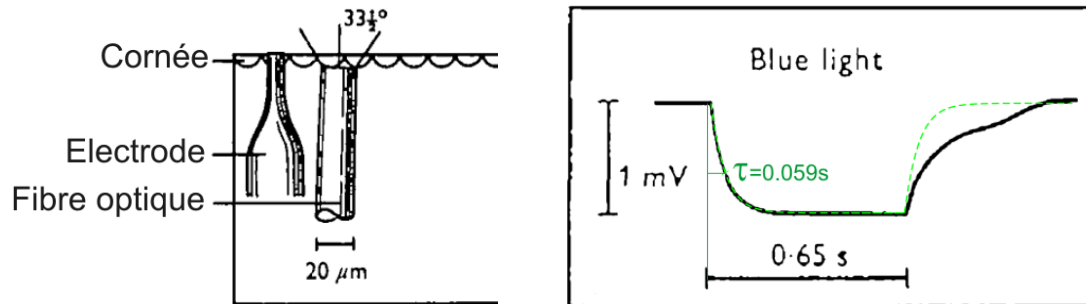


Fig. 2.12: (a) Migration pigmentaire. (b) Adaptation à l'éclairement ambiant.

La figure 2.12a montre le mécanisme d'adaptation à la luminance présent dans chacune des cellules photoréceptrices d'une omatidie chez la mouche. L'encart de gauche montre que de fins granules pigmentaires (*ommochromes*) migrent vers le rhabdomère sous l'effet de la lumière, rendant ainsi le guide-d'ondes moins efficace lorsque la luminance est importante. Les photons absorbés par ce pigment accessoire ne sont pas convertis en potentiel électrique (voir [Sato 08] pour de récents détails sur ce nanomécanisme de migration de pigment).

La figure 2.12b montre la réponse à un échelon lumineux. On a superposé sur cette réponse la réponse indicelle d'un filtre d'ordre 1, de constante de temps $\tau = 1.61s$. On voit que le mécanisme d'adaptation à la luminance agit comme un filtre passe-haut du 1^{er} ordre, de fréquence de coupure $0.1Hz$. Bien que cette fréquence soit très basse et

presque négligeable d'un point de vue filtrage fréquentiel, elle est importante car elle rend la phototransduction plus robuste aux variations d'éclairement.



(a) Dispositif expérimental. (Extrait de [Heisenberg 71])

(b) forme d'un Electrorétinogramme (ERG).
Forme de la réponse à la stimulation par un flash bleu couvrant 3-4 facettes. (Adapté de [Heisenberg 71])

Fig. 2.13: Filtrage passe-bas.

On a parlé ici jusqu'ici de filtrage temporel. Les voies correspondant aux axes optiques de différents rhabdomères interfèrent entre elles. Lorsque différentes voies interfèrent lors du traitement, le traitement est dit spatio-temporel. Les analogies avec la discipline dite "traitement d'antenne", utilisée couramment pour la conception d'antennes à pointage électronique est directe [Franceschini 75].

La Lamina : un filtre passe-haut

La lamina a une fonction de filtrage passe-haut. Ce filtrage présente un grand intérêt, car l'information est contenue dans les petites variations qui ont des fréquences typiquement supérieures à 1Hz. Du point de vue de la détection du mouvement, la composante continue du signal visuel n'a que peu intérêt. Elle est en fait supprimée par ce type de filtrage. [Shaw 81] décrit les éléments anatomiques de l'insecte impliqués dans ces fonctions de filtrage. De même, [Juusola 97, Heisenberg 71, Satoh 08] décrivent les mécanismes de filtrage observés.

Le circuit DEM que nous décrirons plus tard reproduit les différentes fonctions de traitement du signal identifiées chez l'insecte, en particulier le filtrage passe-bande.

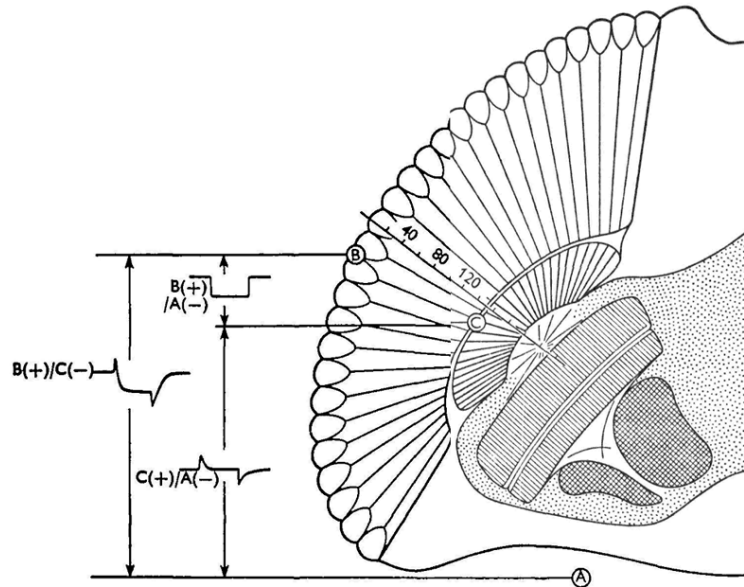


Fig. 2.14: Lamina : fonction de filtrage passe-haut. (Extrait de [Heisenberg 71]).

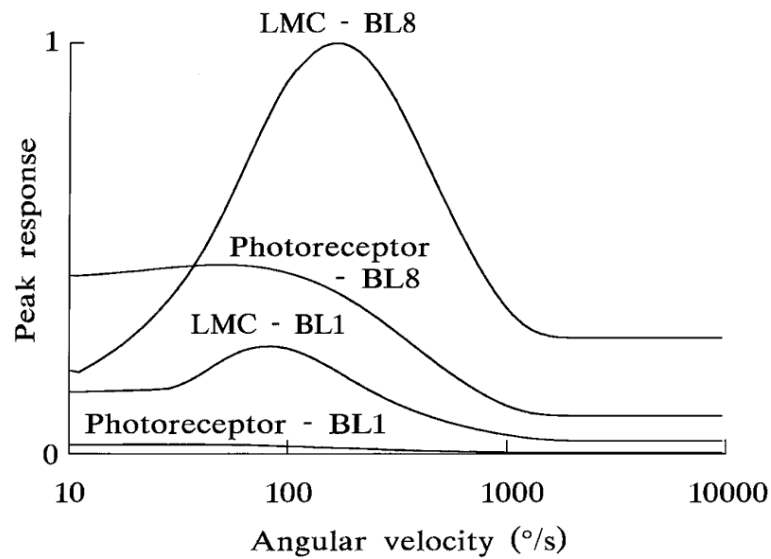


Fig. 2.15: Compression du signal : extrait de [Juusola 97].

2.2.2 Mise en forme du signal en électronique

La mise en forme du signal est réalisée à l'aide d'une carte électronique dite hybride car composée d'une partie analogique et d'une partie numérique. Ces deux parties sont décrites ici. L'ensemble du traitement effectué sur cette carte est modélisé par une fonction filtrage. Les détails du modèle sont donnés, puis les propriétés des signaux visuels traités sont discutées.

Filtrage analogique

Les photodiodes du boîtier intégré Ic-haus LS2C (décrit dans la partie 2.1.2, p.20) ont une sortie en courant. L'intensité de sortie est proportionnelle à l'intensité lumineuse reçue. Chaque photodiode est connectée à un premier circuit de conversion courant-tension. Un second circuit lui fait suite qui réalise la fonction de *filtrage passe-bande*. La bande passante effective (définie à $3dB$) est de $20Hz$ à $116Hz$. Le boîtier utilisé pour ce montage contient 4 amplificateurs opérationnels. Le filtrage passe-bande a une double fonction : d'une part, il reproduit le filtrage passe-haut décrit ci-dessus pour la lamina de l'insecte (voir 2.2.1 p.37 & 2.2.1 p.38). d'autre part, sa partie passe-bas sert de filtre anti-repliement pour le signal échantillonné à $500Hz$. Ce filtre permet d'éliminer le bruit haute fréquence qui viendrait se replier et s'ajouter au spectre utile.

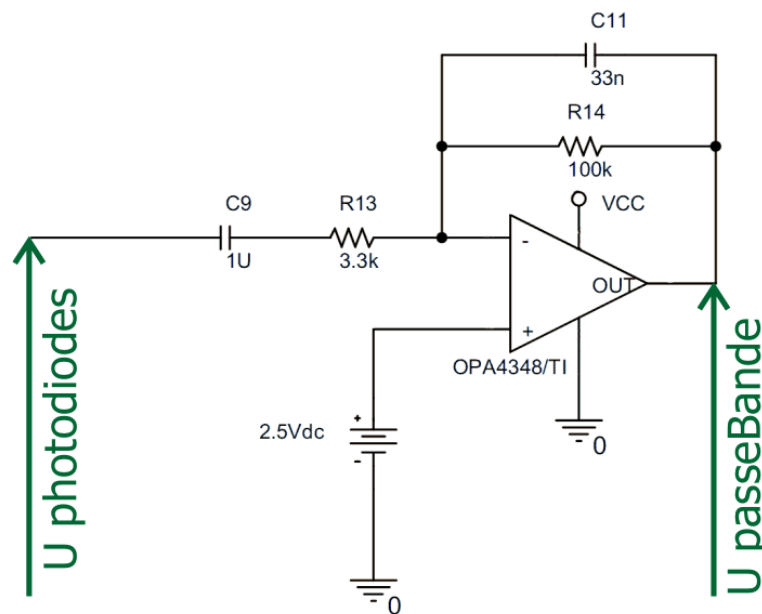


Fig. 2.16: Filtre passe-bande actif (20-116Hz) de la partie analogique du Détecteur Elementaire de Mouvement (DEM).

2.2.3 Modélisation du filtre analogique et des signaux Ph'_1 et Ph'_2

Le filtre analogique réalisé (fig.2.16) se modélise comme un filtre *passe-haut* du 1^{er} ordre ayant une fréquence de coupure de $50Hz$, accolé à un filtre *passe-bas* du 1^{er} ordre ayant également une fréquence de coupure de $50Hz$.

La fonction de transfert suivante a le même gain (voir fig.2.17) que le circuit présenté sur la figure 2.16 :

$$H_{analogique} = 30 * \frac{50 * 2\pi}{p + 50 * 2\pi} * \frac{p}{p + 50 * 2\pi} \tag{2.19}$$

Ce filtre analogique filtre les signaux des photodiodes $Ph_1(\Psi)$ et $Ph_2(\Psi)$ eq.(2.11 p.28). Le filtre analogique a une action dérivée sur la gamme de fréquence [0 30]Hz (voir fig.2.17). L'action dérivée supprime la composante continue et dérive dans une large gamme de fréquences utiles [0 30Hz]. On modélise ce filtre par une fonction de dérivée temporelle.

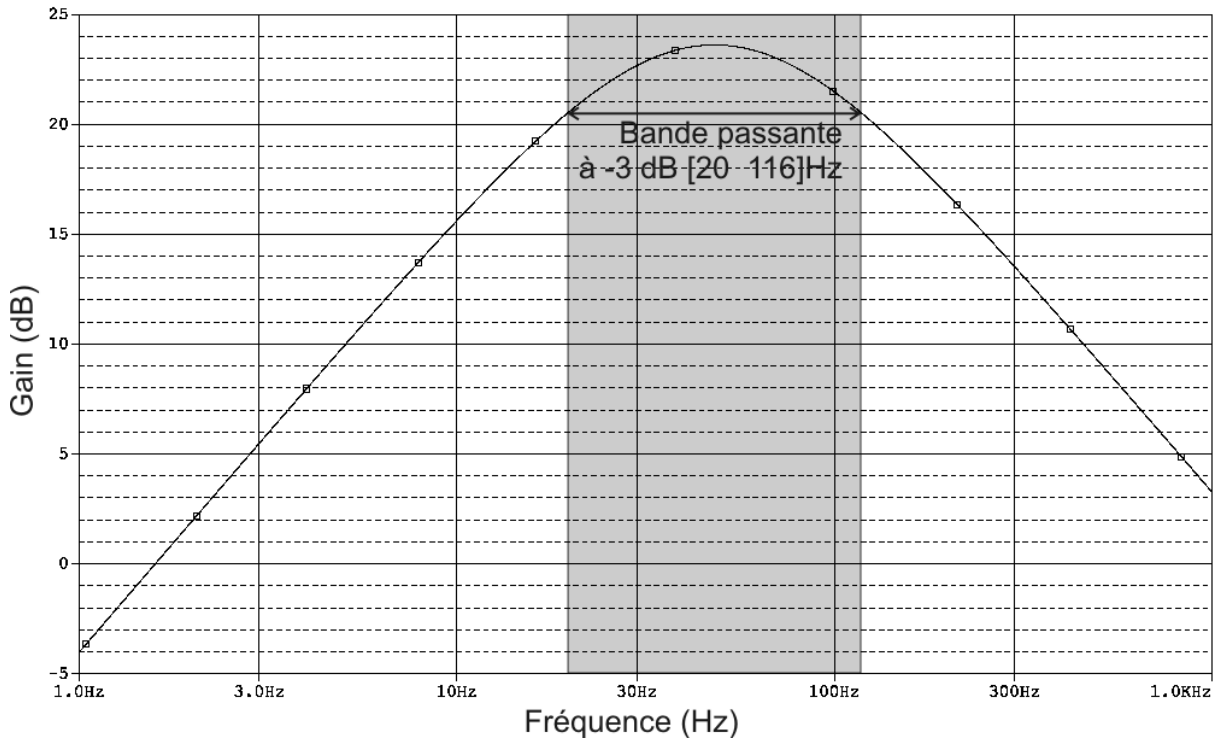


Fig. 2.17: Diagramme de Bode (partie amplitude seulement) du filtre passe-bande analogique présenté sur la figure 2.16.

Les dérivées temporelles de $Ph_1(\Psi)$ et $Ph_2(\Psi)$ sont notées $Ph'_1(t)$ et $Ph'_2(t)$. Lorsque la position d'un bord contrasté est fixe par rapport aux photodiodes, ces deux signaux $Ph'_1(\Psi)$ et $Ph'_2(\Psi)$ sont nuls (dérivée d'une constante). Les signaux ne sont différents de 0 que lorsque la position (relative) du contraste Ψ évolue dans le temps. Un changement de la position relative du contraste Ψ peut être causé par :

- un mouvement propre des axes optiques (rotation du système, translation du système ou vibration), ou

- un mouvement de translation du bord contrasté, ou
- les deux à la fois.

En notant $\Psi(t)$ la position angulaire relative du contraste, on exprime la dérivée temporelle de $Ph_1(\Psi(t))$ et $Ph_2(\Psi(t))$, à partir des équations (2.8) et (2.11) :

$$\begin{aligned}
 Ph'_1(\Psi(t)) &= \frac{d}{dt} k * S \left(\Psi(t) - \frac{\Delta\varphi}{2} \right) \\
 &= k * \Psi'(t) * s \left(\Psi(t) - \frac{\Delta\varphi}{2} \right) \\
 &= k * \frac{\Psi'(t)}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(\Psi(t) - \frac{\Delta\varphi}{2})^2}{2\sigma^2}} \\
 Ph'_2(\Psi(t)) &= k * \frac{\Psi'(t)}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(\Psi(t) + \frac{\Delta\varphi}{2})^2}{2\sigma^2}}
 \end{aligned} \tag{2.20}$$

De même, face à une barre verticale, on a, à partir des équations (2.8) et (2.13) :

$$\begin{aligned}
 Ph'_{1\text{ barre}}(\Psi(t)) &= \frac{d}{dt} k * \left\{ S \left(\Psi(t) - \frac{\Delta\varphi}{2} + \frac{L}{2} \right) - S \left(\Psi(t) - \frac{\Delta\varphi}{2} - \frac{L}{2} \right) \right\} \\
 &= k * \Psi'(t) * \left\{ s \left(\Psi(t) - \frac{\Delta\varphi}{2} + \frac{L}{2} \right) - s \left(\Psi(t) - \frac{\Delta\varphi}{2} - \frac{L}{2} \right) \right\} \\
 &= \frac{\Psi'(t)}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(\Psi(t) - \frac{\Delta\varphi}{2})^2 + \frac{L^2}{4}}{2\sigma^2}} * \sinh \left\{ \left(\Psi(t) - \frac{\Delta\varphi}{2} \right) * \frac{L}{2\sigma^2} \right\} \\
 Ph'_{2\text{ barre}}(\Psi(t)) &= \frac{\Psi'(t)}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(\Psi(t) + \frac{\Delta\varphi}{2})^2 + \frac{L^2}{4}}{2\sigma^2}} * \sinh \left\{ \left(\Psi(t) + \frac{\Delta\varphi}{2} \right) * \frac{L}{2\sigma^2} \right\}
 \end{aligned} \tag{2.21}$$

Plusieurs propriétés remarquables de ces expressions sont utilisées par la suite.

Après le dérivateur analogique, les signaux $Ph'_1(t)$ et $Ph'_2(t)$ sont numérisés par un Convertisseur Analogique-Numérique (CAN). Tous les traitements qui suivent sont réalisés en numérique.

2.2.4 Filtrage numérique

Le signal, préalablement filtré passe-bande, est échantillonné à 500Hz par un Convertisseur Analogique-Numérique (CAN) de résolution 12 bits. Le résultat est transmis au microcontrôleur principal du robot (voir 5.2.3 p.206), un dsPIC 30f4013.

Un filtre passe-bas s'ajoute au filtrage passe-bande analogique. Un filtre numérique de type Butterworth est utilisé [Ruffier 04]. Ce filtre présente cependant un inconvénient

inhérent aux filtres à Réponse Impulsionnelle Infinie (RII) : sa phase non linéaire peut engendrer un dépassement de sa réponse (fig.2.19b). Ce dépassement est critique pour le capteur OSCAR que nous décrirons ci-après (paragraphe 2.4 p.76). Un filtre à Réponse Impulsionnelle Finie (RIF) est utilisé ici pour palier ce problème. La figure 2.18a présente ce filtre et les figures 2.19a et 2.19b comparent ses propriétés à celles du filtre RII originel (Butterworth).

Coefficients du filtre RIF :

$$\begin{aligned}
 H_{FIR}(z) = & 6.68e^{-7}z^{-20} + 1.45e^{-5}z^{-19} + 1.47e^{-4}z^{-18} + 9.36e^{-4}z^{-17} + 4.17e^{-3}z^{-16} \\
 & + 1.39e^{-2}z^{-15} + 3.57e^{-2}z^{-14} + 7.3e^{-2}z^{-13} + 0.121z^{-12} + 0.162z^{-11} \\
 & + 0.179z^{-10} + 0.162z^{-9} + 0.121z^{-8} + 7.3e^{-2}z^{-7} + 3.57e^{-2}z^{-6} + 1.39e^{-2}z^{-5} \\
 & + 4.17e^{-3}z^{-4} + 9.36e^{-4}z^{-3} + 1.47e^{-4}z^{-2} + 1.45e^{-5}z^{-1} + 6.68e^{-7}
 \end{aligned} \tag{2.22}$$

Le filtre RIF réalisé est remarquable car sa forme factorisée est composée uniquement de deux polynômes de degré 2. Le second polynôme est élevé à la puissance neuf (fig.2.18b). Les coefficients de ce dernier polynôme sont constitués de puissances de -2 qui se simplifient en décalage binaire lors de l'implémentation du filtre dans le calculateur. Son calcul en virgule fixe est donc extrêmement rapide.

$$H_{FIR}(z) = 0.175 * (1 + 3.714z^{-1} + 1z^{-2}) * (0.25 + 0.5z^{-1} + 0.25z^{-2})^9 \tag{2.23}$$

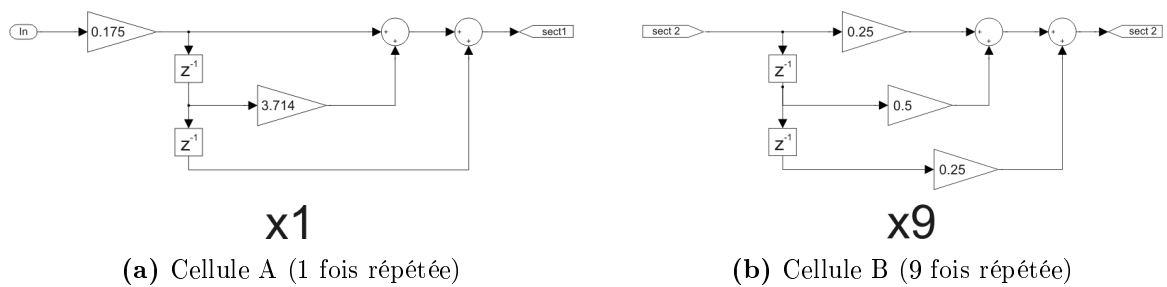
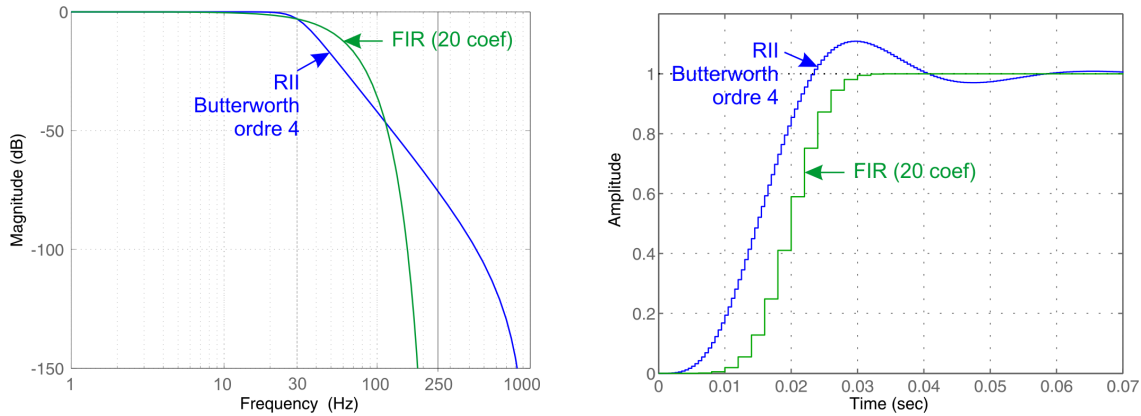


Fig. 2.18: Le signal issu des deux photodiodes est filtré passe-bas par un filtre à Réponse Impulsionnelle Finie (RIF) de 20 coefficients. Celui-ci est implanté à l'aide de 10 cellules d'ordre 2.

Le filtre Butterworth utilisé dans [Serres 08] est donné par la commande $[B,A] = butter(4,30/(2000/2), 'low')$ [Serres 08].

$$H_{Butter}(z) = 4.37e-6 * \frac{(z^{-4} + z^{-3})^4}{(1 - 1.83z^{-1} + 0.84z^{-2})(1 - 1.92z^{-1} + 0.93z^{-2})} \quad (2.24)$$

La différence entre ces deux filtres (Butterworth d'ordre 4 et RIF d'ordre 20) est présentée sur les figures 2.19a, 2.19b et dans le tableau 2.3



(a) Diagramme de Bode. Courbe verte : RIF à 500Hz; Courbe bleue : RII à 2000Hz (b) Réponse indicielle. Courbe verte : RIF à 500Hz; Courbe bleue : RII à 2000Hz

Fig. 2.19: Le signal des photodiodes est filtré passe-bas à une fréquence de coupure de 30Hz par un filtre à Réponse Impulsionnelle Finie (RIF) de 20 coefficients, échantillonnée à 500Hz. Ce filtre est mis en œuvre sur un microcontrôleur à l'aide de 10 cellules d'ordre 2. Le filtre originel (RII Butterworth d'ordre 4, échantillonnée 2000Hz) est présenté à titre de comparaison.

	30 Hz	50 Hz	100 Hz	113 Hz	150 Hz	200 Hz
Butterworth	-3 dB	-17.9 dB	-42.3 dB	-46.5 dB	-56.7 dB	-67 dB
FIR	-3 dB	-8.5 dB	-35.8 dB	-46.5 dB	-88 dB	-193 dB

Tab. 2.3: Comparaison des gains des filtres FIR (20 coefficients) et Butterworth (ordre 4) pour diverses fréquences caractéristiques.

La modélisation de ce filtre passe-bas est directe, car un unique fichier simulink sert à la fois pour la modélisation et pour sa mise en œuvre dans la cible numérique [Kerhuel 08].

Le nouveau filtre RIF est échantillonné à $500Hz$ alors que le filtre originel (RIF Butterworth d'ordre 4) était échantillonné à $2kHz$. Le contenu spectral du signal des photodiodes est nul au delà de $250Hz$. Il est, par conséquent, judicieux de traiter les signaux à des fréquences plus basses pour utiliser un minimum de ressources calculatoires. C'est pourquoi, le filtrage est réalisé à une fréquence d'échantillonnage de $500Hz$. Ce signal peut ensuite être interpolé pour retrouver un signal à $2kHz$ (utile pour des mesures de décalage temporel, comme on va le voir par la suite).

2.3 Capteur de flux optique

Une mouche navigue dans un environnement inconnu en évitant les obstacles grâce à sa vision. Cette étonnante faculté est obtenue grâce aux *capteurs de flux optique* dont elle dispose. Ces capteurs mesurent *la vitesse angulaire de défilement* des objets sur sa rétine. Le flux optique *de translation* est d'autant plus grand qu'un objet est plus proche et que la mouche se déplace plus rapidement. Les capteurs de flux optique permettent donc de détecter "les zones de dangers" et ainsi de les éviter. Cette stratégie de contrôle appliquée au contrôle de robots autonomes a prouvé son efficacité [Franceschini 92, Mura 96, Ruffier 04, Zufferey 06].

Cette partie revient sur le capteur de mouvement biomimétique mis au point au laboratoire en 1986 et présente un nouveau traitement du signal qui améliore sensiblement la mesure de flux optique.

2.3.1 Définition du flux optique

Le *flux optique* est une notion encore peu répandue en robotique mobile, bien que la nature l'ait exploité à bord de maintes créatures depuis au moins 350 millions d'années. Les techniques actuelles de traitement d'images appliquées à la robotique considèrent plus souvent la reconnaissance de formes, l'asservissements visuels, l'auto-localisation et la planification de trajectoires.

Le flux optique peut être défini comme la *vitesse angulaire de défilement* du contenu de la scène observée. Le défilement d'un objet est le mouvement de cet objet relativement au repère de l'œil (ou de l'agent, robot ou animal, si l'on considère l'œil solidaire de celui-ci). Trois causes non exclusives peuvent être à l'origine d'un défilement angulaire :

1. le mouvement d'un objet présent dans l'environnement
2. la translation de l'agent lui-même dans un environnement stationnaire (on parle alors de *flux optique de translation*)
3. la rotation de l'agent lui-même (on parle alors de *flux optique de rotation*)

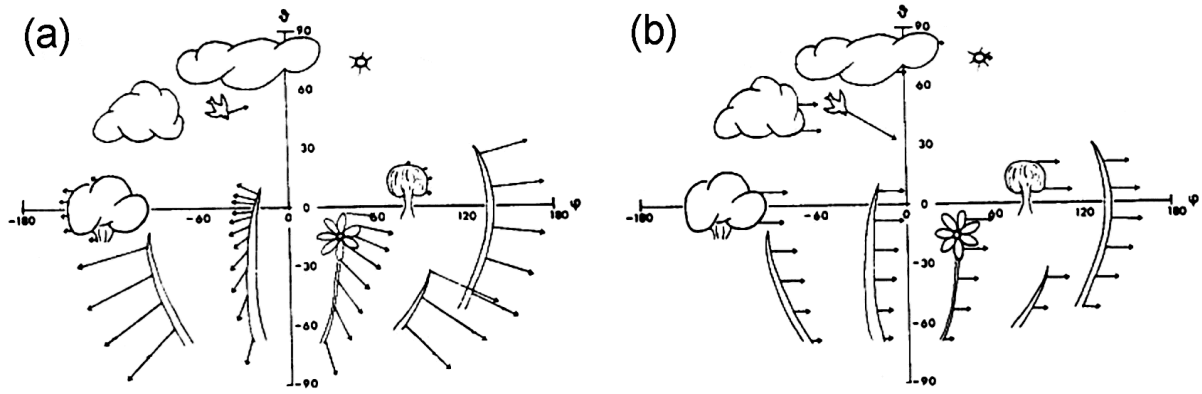


Fig. 2.20: Distinction entre flux optiques de translation (a) et de rotation (b) [Buchner 82]. Les vecteurs représentent les flux optiques, ou vitesses de déplacement angulaire des faits saillants présents dans l’environnement. Ces vecteurs de flux optique peuvent être créés par *une translation de l’agent* (a) ou par sa *rotation* (b). Le flux optique de translation n’est pas uniforme : il dépend à la fois du gisement (azimut) de l’objet, de son site (élévation) et de son éloignement. Le flux optique de rotation (suivant l’axe vertical z), dépend uniquement du site (élévation) de l’objet. Le flux optique engendré par le mouvement propre des objets (ici l’oiseau) s’ajoute au flux optique de translation ou de rotation de l’agent. (Extrait de [Buchner 82]).

La figure 2.20 illustre schématiquement le flux optique perçu par un agent en translation vers le point 0 (encart a), ou en rotation autour de son axe vertical (encart b). Le flux optique créé par chaque objet est défini par sa vitesse angulaire relativement au repère de l’agent. Dans le cas d’une translation pure, la vitesse angulaire (ou flux optique) d’un objet est proportionnelle à la fois à la proximité de l’objet et à l’excentricité (gisement et site) de l’objet par rapport au foyer d’expansion (situé sur l’axe du déplacement à 0°). Fait remarquable, le flux optique généré par la rotation propre de l’agent (encart b) est indépendant de sa distance à l’objet et ne dépend que de l’élévation (site) de l’objet par rapport à l’axe de rotation (il varie en fonction du cosinus de l’angle de site : il est maximum à 0° et nul à 90°). On peut également observer sur les figures 2.20a et 2.20b le flux optique créé par le déplacement propre de l’oiseau. Ce dernier s’ajoute au flux optique de translation (a) ou de rotation (b). Le flux optique réellement perçu (ou mesuré) par un animal ou un robot en mouvement sera la résultante de ces divers flux optiques.

2.3.2 La mesure du flux optique

Les différentes méthodes de mesure de flux optique mises en œuvre en électronique intégrée (Very Large-Scale Integration (VLSI)) ont été répertoriées dans un récent article de synthèse [Moeckel 09]. Ces méthodes recensent la majorité des techniques de mesure de flux optiques ne requérant pas de puissants calculateurs (voir fig.2.21). Parmi ces techniques, Ullmann [Ullman 81] distinguent deux grands types d’algorithmes dénommés respectivement :

- “Intensity-based” : algorithmes basés sur un calcul de gradient ou de corrélation à partir des valeurs de pixels voisins.
- “Token-based” : algorithmes basés sur la reconnaissance de faits saillants tels qu’un bord contrasté.

Les algorithmes “Intensity-based” n’ont pas besoin de reconnaître et d’extraire un motif ou un fait saillant dans le signal. Ces algorithmes peuvent donc réaliser des mesures même lorsque les signaux visuels sont de très faible amplitude. L’estimation du flux optique se fait en continu à partir des intensités lumineuses mesurées par les différents pixels. Ces algorithmes sont cependant dépendants de la fréquence spatiale et du contraste des objets présents dans l’environnement.

Les algorithmes “Token-based” sont basés sur la reconnaissance de faits saillants et ne fonctionnent que lorsque les signaux permettent de discriminer préalablement ces faits saillants. Un faible contraste des objets (donnant lieu à une faible amplitude des signaux visuels), ou encore des signaux visuels bruités, pose problème avec ce type d’algorithmes, qui présente également l’inconvénient de ne rafraîchir l’estimation du flux optique qu’au moment où un fait saillant est discriminé. Le rafraîchissement du flux optique est donc *discontinu* et l’utilisation de ce flux optique dans une boucle de contrôle comprenant un terme dérivé peut poser problème. Il peut être alors nécessaire de filtrer préalablement le flux optique mesuré, mais cela entraîne alors un déphasage qui peut être nuisible au contrôle.

Par la suite, les algorithmes “Token-based” ont été sous-divisés en deux catégories :

- Calcul de corrélation entre les faits saillants détectés,
- “time-of-travel” : mesure du retard (Δt) entre l’apparition d’un fait saillant sur le premier et le second pixels du capteur.

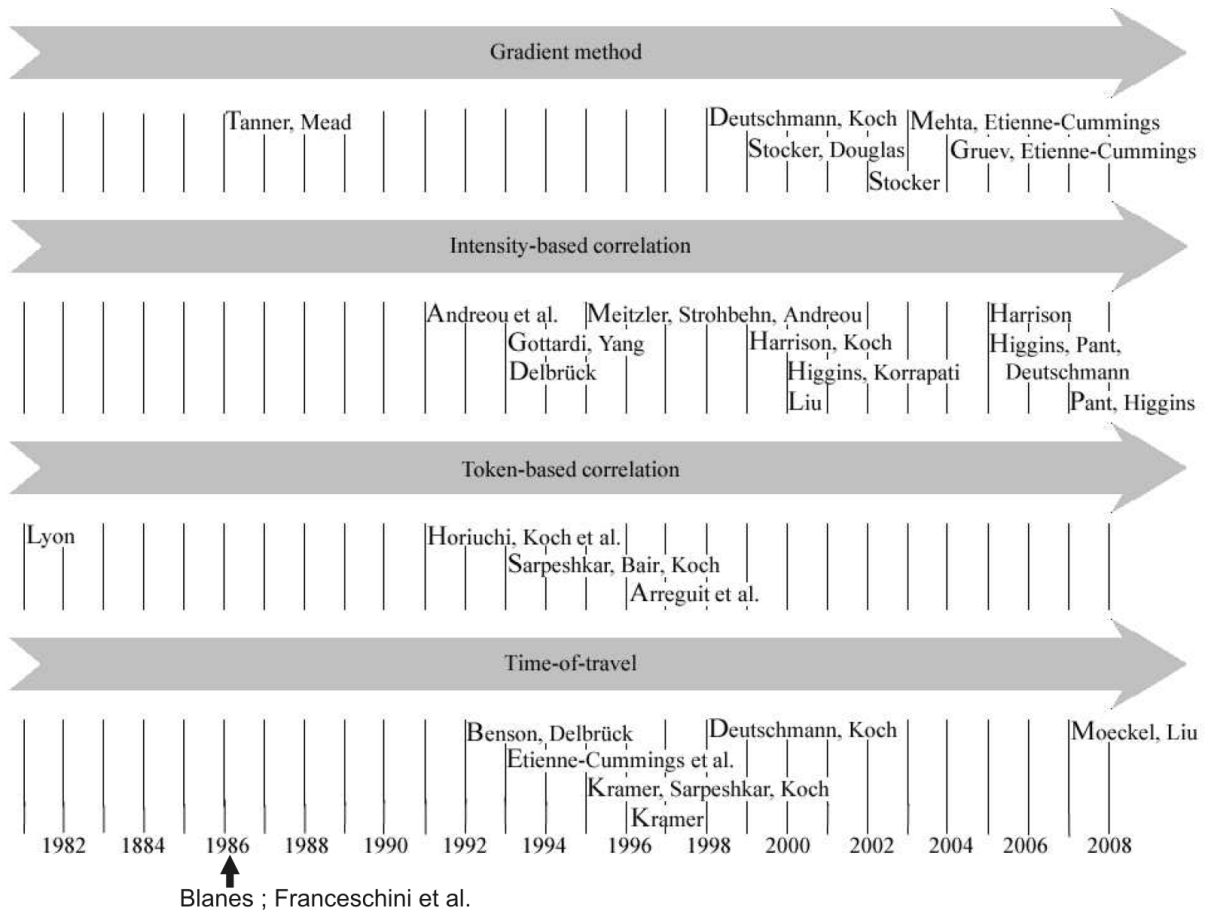


Fig. 2.21: Chronologie d'apparition de Détecteur Elementaire de Mouvement (DEM) dans des composants Very Large-Scale Integration (VLSI). Le capteur de Tanner et Mead est le premier DEM intégré dont la mesure était insensible à la fréquence spatiale des motifs de son environnement. Il en était de même du premier module DEM (non intégré) construit au laboratoire au 1986 (flèche du bas) et qui, réalisé en 114 exemplaires, permet au robot-mouche de naviguer sur la base du flux optique [Franceschini 92]. Les DEM basés sur la méthode “Intensity-based correlation” sont issus du corrélateur de Reichardt [Hassenstein 56]. (Adapté de [Moeckel 09]).

Les Détecteur Elementaire de Mouvement (DEM) réalisés au laboratoire depuis 1986 sont de petits modules électroniques (non intégrés VLSI). Ce furent les premiers DEM réalisés selon le principe “temps de vol” [Blanes 86, Franceschini 86]. La figure 2.22 détaille le fonctionnement de ces DEMs. Ils mettent en correspondance un même contraste détecté par deux photodiodes séparées d'un angle $\Delta\varphi$. Le retard Δt entre les signaux des deux voies correspond au temps mis par un bord contrasté pour parcourir l'angle $\Delta\varphi$. Si l'on

2.3 DES CAPTEURS VISUELS MINIMALISTES

suppose la vitesse angulaire de ce bord contrasté constant durant cet intervalle de temps, la vitesse angulaire estimée (ou flux optique) est alors $\hat{\omega} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$.

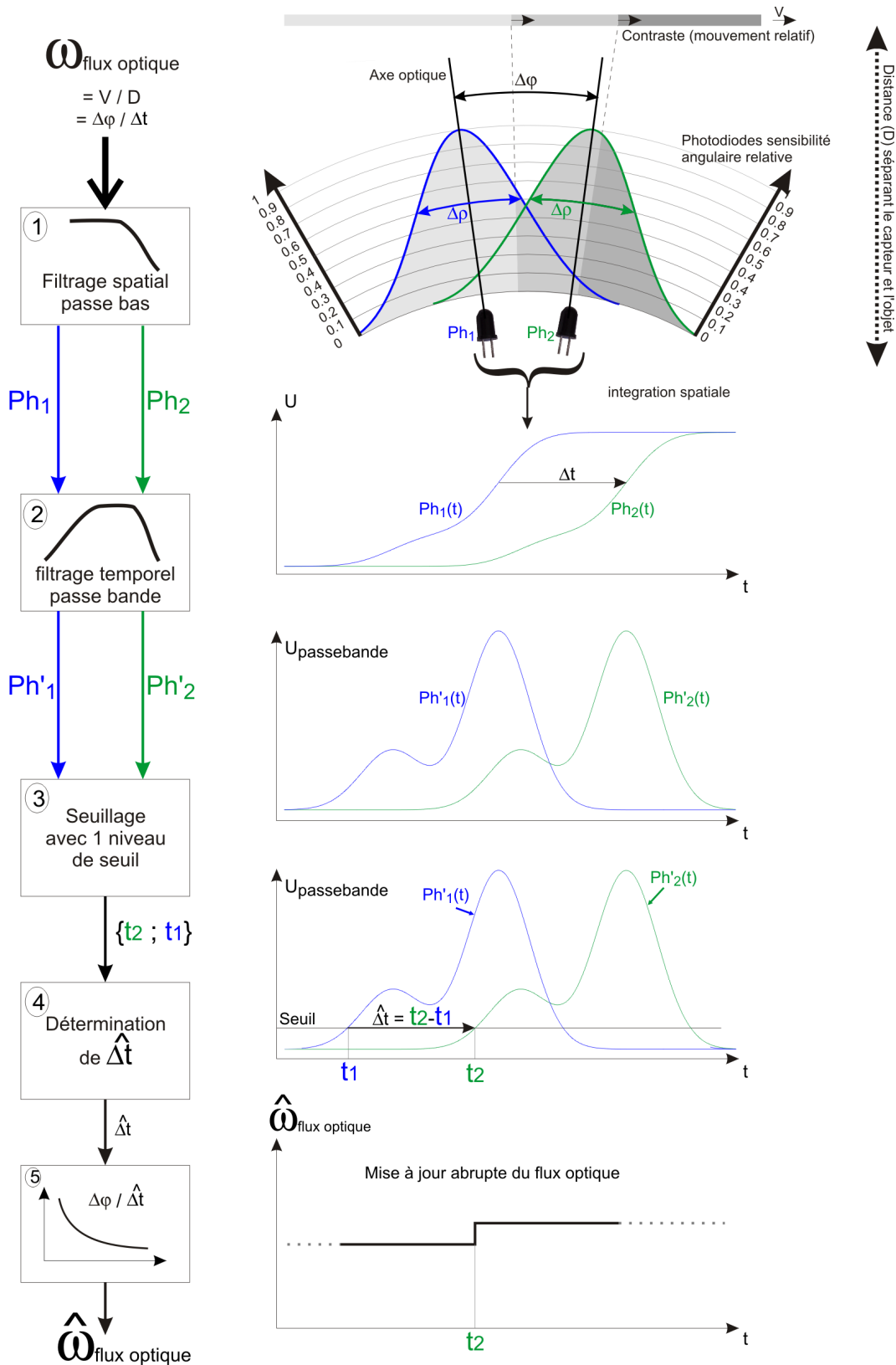


Fig. 2.22: Schéma du capteur de flux optique à 1 seuil selon le principe biomimétique développé au laboratoire en 1986 [Blanès 86, Franceschini 86, Blanès 91].

Le dispositif optique

Le dispositif optique réalisé (voir section 2.1.2 p.20) reproduit les caractéristiques de l'optique d'une ommatidie, limitée à deux photorécepteurs. Les principales caractéristiques optiques de cette ommatidie artificielle sont les suivantes :

- angle interrécepteur $\Delta\varphi = 2.87^\circ$ (voir p.23),
- sensibilité directionnelle Gaussienne de chaque photorécepteur, avec un angle d'acceptance $\Delta\rho$ (largeur à mi-hauteur) : $\Delta\rho = 3^\circ$ (voir p.23).

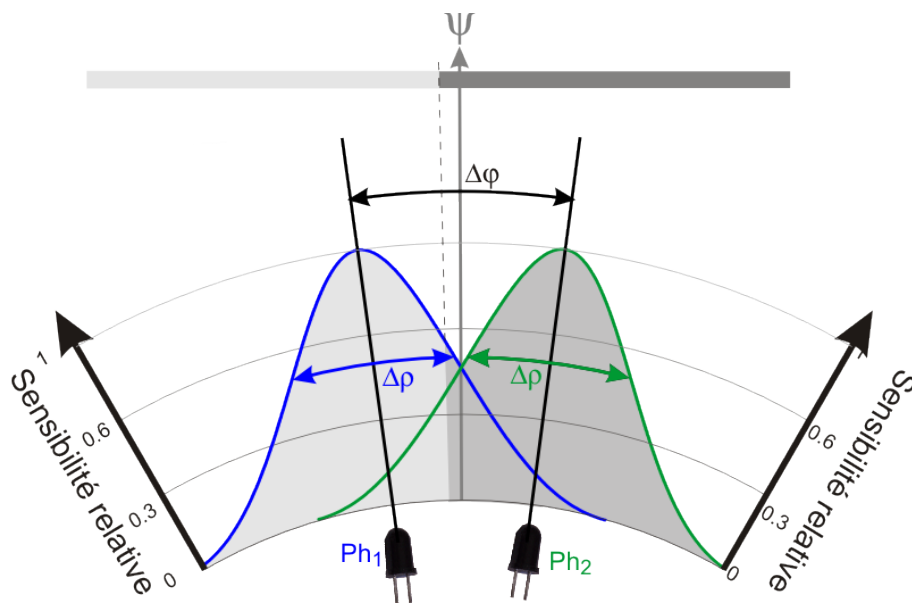


Fig. 2.23: Caractéristiques optiques du capteur de flux optique DEM. Le capteur se compose de deux photorécepteurs. L'angle interphotorécepteur est $\Delta\varphi = 2.87^\circ$ et la sensibilité directionnelle est caractérisée par sa largeur à mi-hauteur $\Delta\rho = 3^\circ$. Chaque photorécepteur délivre le produit entre le projeté des contrastes placés devant lui et sa fonction de sensibilité directionnelle. Le projeté d'un bord contrasté sur les photodiodes est ici symbolisé par le remplissage en gris des fonctions de sensibilités.

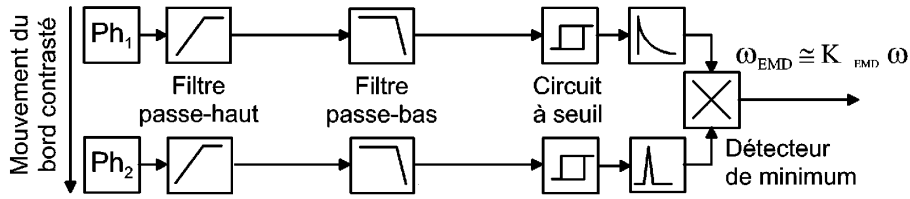
La figure 2.23 représente sur un schéma les deux paramètres optiques $\Delta\varphi$ et $\Delta\rho$.

La sensibilité gaussienne du dispositif optique caractérisée par l'angle $\Delta\rho$ permet de réaliser le filtrage spatial biomimétique (voir p.31).

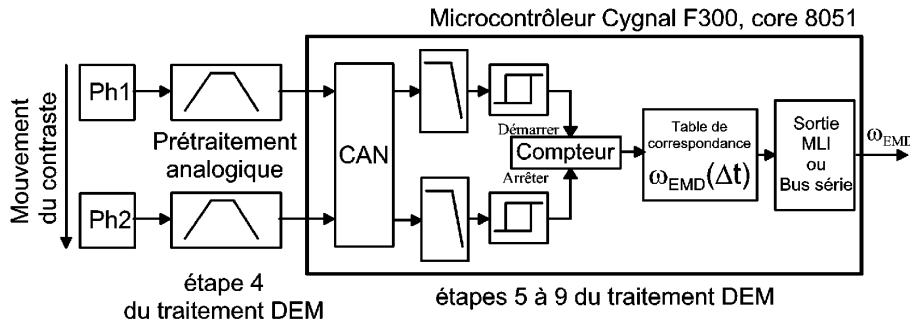
2.3.3 Les évolutions du capteur de flux optique DEM bio-inspiré réalisé au laboratoire de biorobotique

Nous reprenons ici l'évolution du *capteur de flux optique* biomimétique réalisé dans l'équipe biorobotique depuis 23 ans. La première version du DEM a été réalisée en électronique analogique discrète [Blanès 86, Franceschini 86, Blanès 91](voir 2.24a). Un filtrage passe-bande permet de réaliser une pseudo-dérivée temporelle du signal et d'éliminer les bruits à haute fréquence. Un circuit à seuil à hystérésis transforme le signal analogique en un signal porte. Ce seuil permet de localiser un fait saillant constitué d'un bord contrasté qui constitue le "token" de l'algorithme selon la classification de [Ullman 81]. Le niveau du seuil définit la sensibilité du DEM : un seuil trop bas déclenchera des mesures sur le bruit analogique des signaux tandis qu'un seuil trop haut déclenchera peu de mesures, car ce seuil ne sera franchi que pour des fronts de contraste très marqués et/ou défilant rapidement (la dérivée temporelle ayant pour effet d'augmenter l'amplitude du signal lorsque le contraste défile rapidement). De même que les signaux analogiques des voies 1 et 2 (pour Ph_1 et Ph_2) se retrouvent décalés temporellement d'un retard Δt , les signaux de porte des deux voies se retrouvent décalés temporellement de cette même valeur Δt . Ce retard Δt est alors mesuré ("time of travel"). Pour ce faire, un traitement spécifique est fait sur les deux voies. Le retard temporel Δt n'est mesuré que pour un sens de défilement déterminé (ici, le contraste doit d'abord être vu par la photodiode 1, puis par la photodiode 2). Ce capteur de flux optique ne fonctionne donc que pour un sens donné. L'adjonction de deux DEM de sens opposés permet de réaliser une mesure bidirectionnelle [Blanès 91]. La mesure de Δt est réalisée en échantillonnant par l'impulsion générée sur la voie 2, une exponentielle décroissante générée par la voie 1 (voir fig.2.24a). On substitue ainsi à la fonction $\frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$ une fonction $e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}$ qui approxime le flux optique par une fonction non-linéaire, monotone et croissante du flux optique ω [Blanès 91]. Cette fonction non linéaire agit comme une fonction de compression pour le flux optique mesuré.

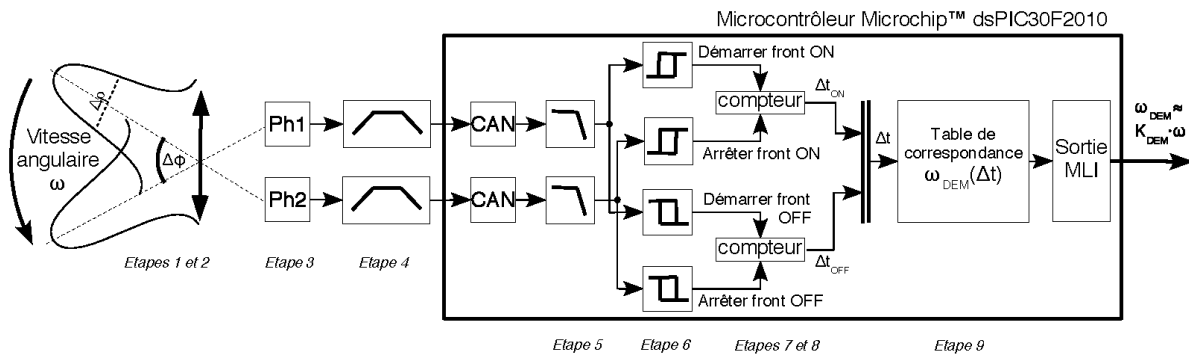
Les faibles valeurs de Δt correspondent à des flux optiques de valeur élevée. La précision et le bruit qui entachent ces faibles valeurs de Δt sont amplifiés par la fonction inverse $\frac{1}{\Delta t}$. Cette amplification du bruit est réduite avec l'approximation par la fonction exponentielle évoquée si-dessus, qui réalise ainsi une fonction de compression permettant de réduire le bruit sur les mesures de flux optiques élevées. Cette fonction de compression, qui était facilement réalisée en électronique analogique [Blanès 86, Franceschini 86, Blanès 91] a été conservée par la suite dans les versions mixtes (analogique et numérique) du DEM réalisées au laboratoire. Elle ne sera pas reprise dans la nouvelle version du capteur que



(a) Circuit DEM analogique initial fonctionnant selon le principe de la mesure du retard entre les signaux [Blanès 86, Franceschini 86]. (Extrait de [Viollet 99b, Ruffier 03])



(b) DEM mixte extrait de [Amic 02, Ruffier 03, Pudas 07]



(c) DEM mixte montrant la prise en compte des deux fronts, comme sur le DEM original [Blanès 91]. Extrait de [Serres 08]

Fig. 2.24: Évolutions des Circuits DEM de 2002 à 2008.

nous allons proposer ici.

Une première version *mixte* du DEM [Amic 02, Ruffier 03] (voir fig.2.24b) associait électronique analogique et électronique numérique. Le principe originel (time-of-travel) du fonctionnement du DEM reste identique. L’amplification et le filtrage passe-bande des deux signaux issus de l’optique sont réalisés en électronique analogique. En plus de la fonction de pseudo-dérivée, ce filtre à une fonction anti-repliement précédant l’échantillonnage du signal. Le signal est ensuite numérisé et le traitement est effectué dans

un microcontrôleur (ici, un Cygnal F300, core 8051). Le traitement numérique consiste en un filtrage passe-bas qui permet de supprimer les fréquences élevées, dont le $100Hz$ de l'éclairage artificiel. L'approximation du flux optique par une fonction exponentielle décroissante (calculée ici numériquement) est utilisée pour réaliser le même type de compression qu'évoqué plus haut pour le DEM analogique.

Le DEM utilisé pour le projet Lateral Optic flow Regulation Autopilot (LORA) [Serres 08] était un DEM mixte. Les deux DEMs présentés précédemment mettent en correspondance des fronts de contraste de type "on" qui, sur les signaux visuels dérivés, se traduisent par un accroissement des signaux. Cette version de DEM reprend le principe du DEM original [Blanès 91] en mettant en correspondance les fronts de contraste de type "on" et les fronts de contraste de type "off".

Ces DEM ont permis à divers robots, terrestres ou aériens, de naviguer de manière autonome dans des environnements inconnus, sur la base du flux optique perçu [Franceschini 92, Mura 96, Netter 02, Ruffier 04, Ruffier 05]

On note cependant quatre inconvénients de ces DEMs :

- Les erreurs de mise en correspondance entraînent une sortie erronée qui ne sera corrigée que lorsqu'un nouveau contraste de l'environnement sera perçu. La valeur erronée est donc maintenue pendant ce laps de temps.
- La sortie du capteur est discontinue (mise à jour abrupte, au gré des contrastes perçus).
- Le capteur fonctionne uniquement pour un sens de défilement. Pour un mouvement dans le sens opposé à son "sens préféré", le capteur renvoie des valeurs aberrantes.
- Les signaux optiques doivent permettre de repérer des *fronts de contraste*, ce qui nécessite un rapport signal-sur-bruit suffisant, donc un contraste important.

Ces divers inconvénients rendent plus difficile l'utilisation de ces capteurs dans une boucle de contrôle, notamment pour des systèmes ayant une dynamique rapide (micro-robots aériens de quelques grammes) dont les réactions à des commandes brusques peuvent être excessives.

Les réalisations antérieures ont montré les limites d'utilisation de ces DEMs. Ainsi, la mise en œuvre d'un DEM à seuil fixe nécessite de définir un niveau pour ce seuil. Un *seuil élevé* permet de réduire les erreurs en ne considérant que les fronts de contraste *importants*

et/ou *rapides*. Les contrastes réellement pris en compte sont alors *moins nombreux* et le rafraîchissement de la mesure en est diminué d'autant. A l'inverse, un *seuil faible* génèrera d'avantage d'erreurs de mesures car le moindre bruit présent sur les signaux sera pris en compte. En revanche, les erreurs de mesure seront corrigées plus rapidement car la prise en compte d'un plus grand nombre de contrastes augmente le rafraîchissement de la mesure. Le compromis à réaliser est difficile car l'amplitude des signaux dérivés des photodiodes est proportionnelle non seulement à la valeur du contraste mais aussi à la vitesse de défilement, de sorte qu'une même valeur de seuil ne peut être optimale à la fois pour mesurer des flux optiques élevés et des flux optiques faibles. L'inconvénient majeur de l'utilisation du seuil est que la mesure réalisée n'utilise l'information contenue dans le signal des photodiodes qu'à l'instant même où le signal intercepte le seuil. Or le signal, à cet instant précis, peut être bruité. La mesure réalisée est maintenue jusqu'à ce que le prochain contraste vu vienne la rafraîchir et la corriger.

2.3.4 Un capteur DEM d'un nouveau type capable d'estimer le flux optique de manière continue et bidirectionnelle

Le principal problème du DEM réalisé jusqu'à maintenant est le suivant : avant l'étape de seuillage, l'amplitude des signaux visuels varie avec la luminance, le contraste, la fréquence spatiale, la vitesse linéaire et l'angle sous-tendu par les objets présents dans l'environnement. Par suite du bruit présent sur les signaux, il est impossible de baisser la valeur du seuil de détection. Cependant, même si le seuil est placé à un niveau idéal, la mesure de Δt résultante sera entachée du bruit des signaux (bruit affectant les deux intersections du seuil, avec la courbe Ph'_1 , puis avec la courbe Ph'_2).

L'idée proposée ici a été de remplacer la mesure de Δt basée sur un (ou plusieurs) seuil(s) par une *boucle d'asservissement sur le retard $\hat{\Delta t}$ estimé* entre les courbes Ph_1 et Ph_2 . Au lieu d'estimer le retard Δt sur la base d'un *unique échantillon* du signal de chaque photodiode, Δt est estimé en utilisant l'information apportée par l'ensemble des échantillons constituant les courbes Ph_1 et Ph_2 . Les avantages sont alors nombreux :

- la mesure Δt est moins perturbée par le bruit présent sur les photodiodes (le bruit, de moyenne nulle, est en majeure partie supprimé),
- la mesure de Δt est mise à jour de manière continue tant que les signaux contiennent de l'information utile exploitable,
- la mesure du retard peut être réalisée sur une gamme de contraste plus large. L'effet de seuil, qui empêchait de prendre en compte les faibles contrastes, disparaît, car il n'y a plus de seuil.

La méthode de mesure de Δt proposée ici permet donc de rendre la mesure du capteur DEM robuste à l'ensemble des variations de paramètres de la scène visuelle. Cette méthode ne nécessite par ailleurs aucun système adaptatif. Tout mécanisme d'adaptation (par exemple un Contrôle Automatique de Gain (CAG) sur les signaux Ph_1 et Ph_2 , ou une adaptation sur le niveau du seuil utilisé) introduit inévitablement une constante de temps. Les transitoires créés par cette constante de temps ne permettent pas de réaliser des mesures optimales en termes de vitesse de rafraîchissement et de précision.

La prise en compte de la totalité de l'information utile des signaux permet d'effectuer une mesure utilisant toute la gamme de contrastes rencontrés, tout en s'accommodant des variations rapides de la luminance pouvant se produire. Cette logique de poursuite de Δt augmente de façon très significative la fréquence de rafraîchissement de la mesure. Par

conséquent, le signal de sortie du capteur devient graduel, et l'absence de discontinuité sur la réponse réduit les problèmes et la complexité d'un contrôleur utilisant ce capteur.

Algorithme de poursuite de Δt

Nous avons mis en œuvre cette nouvelle méthode de mesure de Δt sur les capteurs de flux optique DEM du laboratoire.

La figure 2.25 présente le nouveau capteur de flux optique modifié. Comme pour le DEM originel (fig.2.22 p.51), lorsqu'un contraste défile devant deux pixels, les tensions analogiques $Ph_1(t)$ et $Ph_2(t)$ délivrées par les deux photorécepteurs reflètent l'intensité lumineuse qu'ils captent. Les signaux des deux photodiodes sont quasi identiques mais décalés d'un retard Δt , retard dû au fait que les axes optiques des deux photorécepteurs sont séparés d'un angle $\Delta\varphi$.

Seules la troisième et la 4^{ème} étapes du traitement sont nouvelles par rapport au DEM originel décrit à la fig.2.22 (p.51). Elles sont décrites ci-après :

Troisième étape : estimation du retard $\Delta t(t)$. La mise à jour du retard $\hat{\Delta t}(t)$ se fait en estimant son évolution temporelle (c'est-à-dire sa dérivée) que l'on note $\Delta't(t)$. L'intégration de la dérivée $\Delta't(t)$ estimée et ajoutée à $\hat{\Delta t}(t)$ doit permettre à $\hat{\Delta t}(t)$ de converger vers sa valeur réelle Δt , telle que l'erreur, définie comme $Ph'_1(t - \Delta t) - Ph'_2(t)$, soit minimum. Un algorithme de type "descente de gradient" est utilisé pour déterminer $\Delta't(t)$. Plusieurs variantes en seront présentées ci-après.

Quatrième étape : sélection du sens. Les sorties de deux algorithmes de DEM utilisant la même paire de photodiodes, mais pris dans l'ordre opposé, sont comparées. La comparaison de l'erreur de mesure des deux DEMs de sens opposés permet d'identifier et de sélectionner le DEM mesurant le sens correct du mouvement (voir fig.2.26).

Si l'erreur des deux DEMs est jugée trop importante, une valeur de Δt issu d'un DEM dans sa version originelle (utilisant un seuil) est utilisée pour réinitialiser les deux algorithmes de descente.

Cinquième étape : calcul du flux optique ω . C'est à partir du $\hat{\Delta t}$ estimé, suite aux étapes 4 et 5, que la valeur du flux optique est obtenue comme fonction inverse :

$\frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$. Ce dernier calcul permet de calculer le flux optique réel, défini comme une vitesse de défilement angulaire.

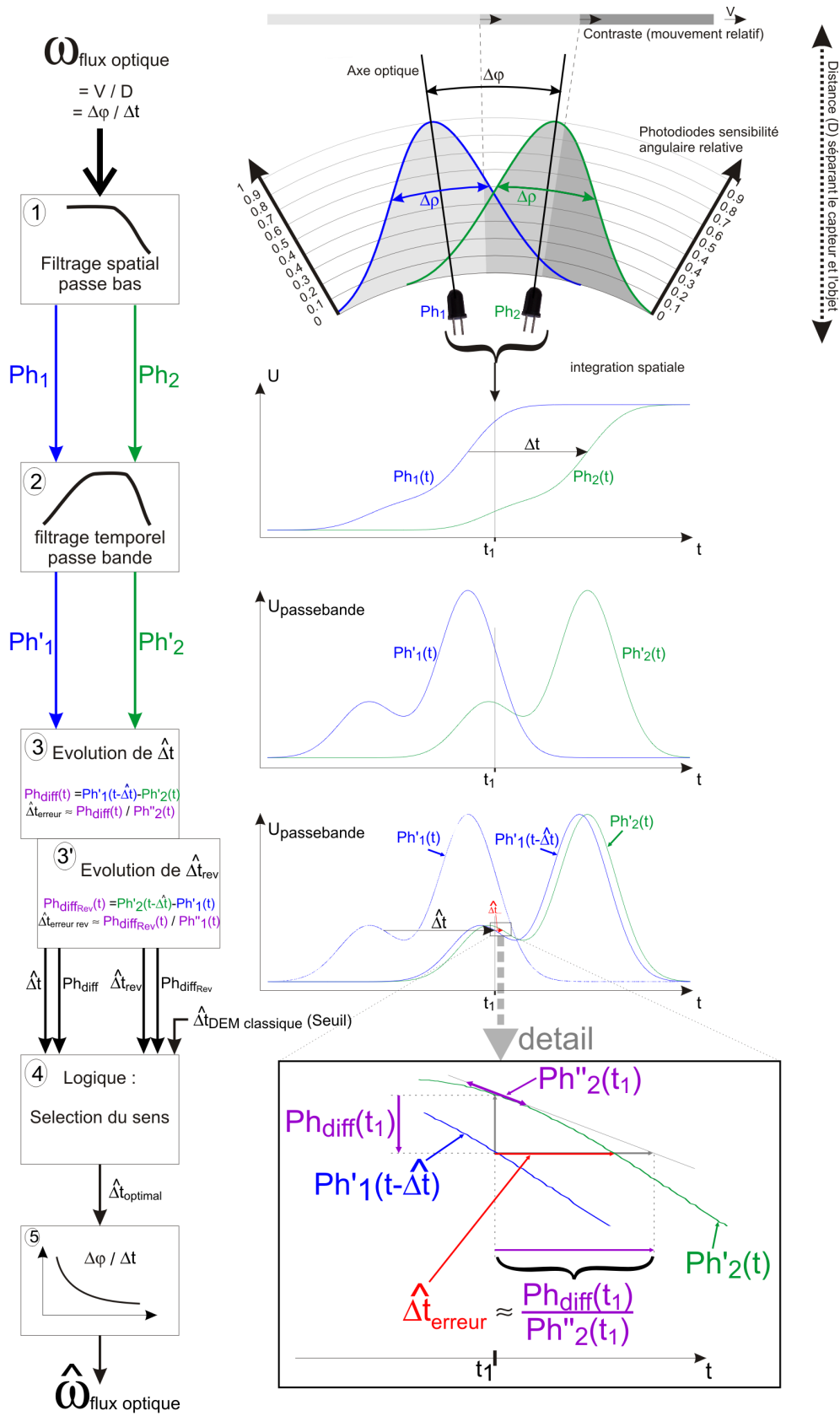


Fig. 2.25: Les 5 étapes du nouveau capteur de flux optique.

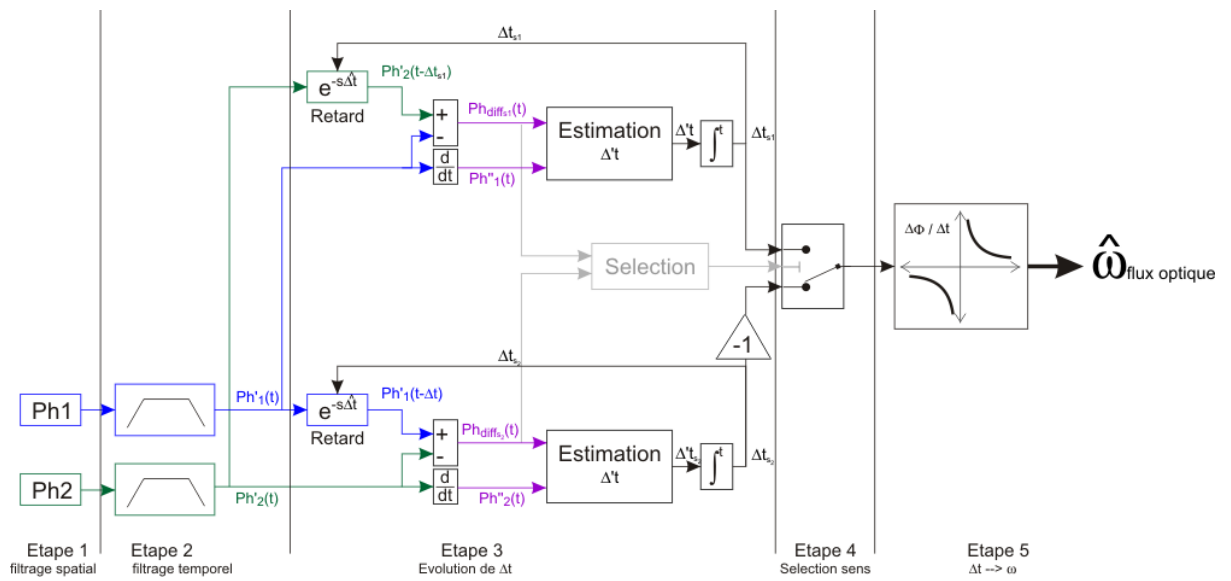


Fig. 2.26: Schéma du capteur de flux optique bidirectionnel. Deux algorithmes de poursuite fonctionnent en parallèle. L’algorithme situé en haut retarde Ph_2 alors que l’algorithme situé en dessous retarde Ph_1 . Chaque algorithme permet de poursuivre $\hat{\Delta t}$ pour un sens donné du flux optique. La comparaison des erreurs Ph_{diff} filtrées passe-bas permet de détecter et de sélectionner le “sens correct” sens.

Justification de la méthode de mesure (temps continu)

Les expériences que nous avons menées sur des robots mobiles équipés de tels capteurs de flux optique ont montré que l'évolution de la mesure de flux optique $\omega(t)$ est une fonction continue différentiable (classe C_1) par partie. Mesurer un flux optique revient à mesurer l'écart temporel Δt séparant les signaux de deux photodiodes dont les axes optiques sont séparés par un angle $\Delta\varphi$. La relation reliant le flux ω à Δt est alors :

$$\omega(t) = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}(t) \quad (2.25)$$

donc

$$\Delta t(t) = \frac{\Delta\varphi}{\omega(t)} \quad (2.26)$$

$\Delta t(t)$ est donc aussi une fonction de classe C_1 différentiable par partie, en tant que composée de fonctions de classe C_1 (par partie).

L'évolution de Δt (réel) en fonction du flux optique $\omega(t)$ (réel) est telle que la dérivée de Δt s'exprime à partir de $\omega(t)$ en tant que dérivée d'une fonction composée :

$$\Delta't(t) = -\frac{\omega'(t)}{\omega^2(t)} \quad (2.27)$$

Cette relation montre l'évolution de la dérivée de Δt en fonction du flux optique $\omega(t)$ et de ses variations $\omega'(t)$. Elle permettra par la suite de justifier les fonctions de gain (α) utilisées dans l'algorithme de descente.

Description générale de l'algorithme

Le principe de l'algorithme est d'estimer l'erreur $\Delta t_{\text{erreur}}(t)$ entre l'estimation $\hat{\Delta t}(t)$ et $\Delta t(t)$ réel et de déterminer ensuite, à partir de cette erreur, une évolution de $\hat{\Delta t}(t)$ (définie par la dérivée $\Delta t'(t)$) permettant de réduire l'erreur. L'algorithme prend donc la forme d'une *boucle de rétroaction sur le retard* $\hat{\Delta t}$, comme décrit sur la figure 2.27.

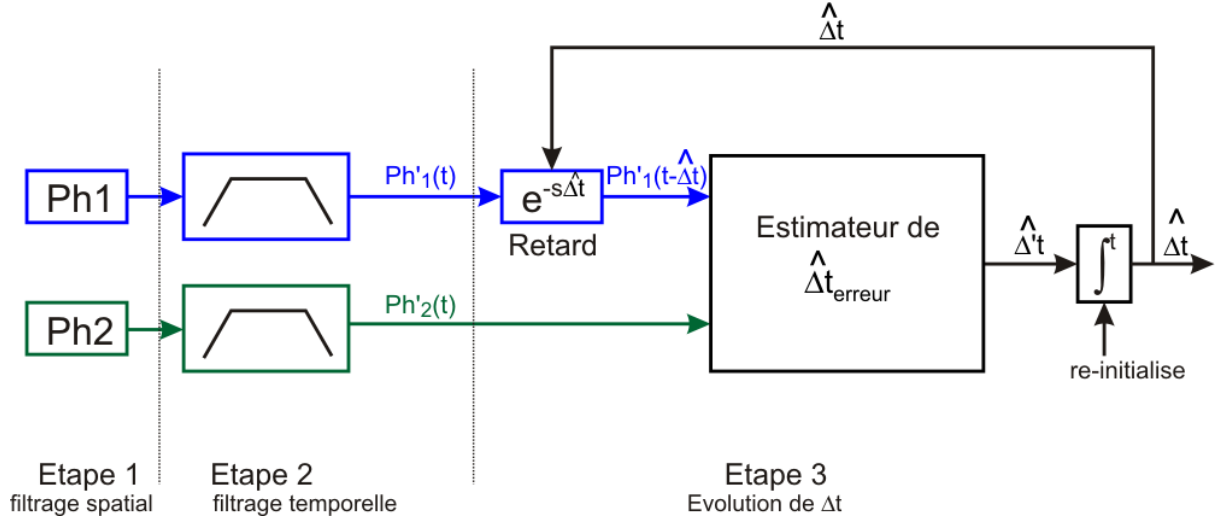


Fig. 2.27: Schéma du capteur de flux optique.

L'algorithme fait appel aux opérations suivantes :

- on part des signaux visuels filtrés spatialement et temporellement, comme indiqué plus haut (section 2.2) pour le DEM originel,
- on retarde de $\hat{\Delta t}(t)$ le signal de la photodiode amont ($Ph'_1(t)$),
- on calcule l'erreur $Ph_{diff}(t)$ (différence entre le signal amont retardé et le signal de la 2nd photodiode, voir fig.2.25),
- on calcule la dérivée temporelle $Ph''_2(t)$ du signal de la seconde photodiode filtré passe-bande ($Ph'_2(t)$),
- on ramène l'erreur $Ph_{diff}(t)$ à une erreur sur $\hat{\Delta t}(t)$ à partir de $Ph''_2(t)$,
- on détermine l'évolution de $\hat{\Delta t}(t)$.

On note $Ph'_1(t)$ et $Ph'_2(t)$ les signaux des photodiodes filtrés temporellement passe-bande. On suppose que $Ph'_2(t)$ est l'exacte copie de $Ph'_1(t)$, simplement décalée dans le temps (retard dû à l'angle inter-récepteurs $\Delta\varphi$). A un instant t donné, on décale $Ph'_1(t)$ du retard $\hat{\Delta t}(t)$ estimé.

- Si $\hat{\Delta t}(t)$ est correct, alors $Ph'_1(t - \hat{\Delta t}(t)) - Ph'_2(t) = 0$.

– Si $\hat{\Delta}t(t)$ est incorrect, alors $Ph'_1(t - \hat{\Delta}t(t)) - Ph'_2(t) \neq 0$.

On note $Ph_{diff}(t) = Ph'_1(t - \hat{\Delta}t(t)) - Ph'_2(t)$

Lorsque l'on se trouve dans le second cas, on fait évoluer $\hat{\Delta}t(t)$ de manière à minimiser $|Ph_{diff}(t)|$.

L'évolution du retard estimé $\hat{\Delta}t$ est défini par sa dérivée $\hat{\Delta}'t(t)$. L'évolution de $\hat{\Delta}t(t)$ dépend de l'erreur Ph_{diff} et de la dérivée seconde de $Ph_2(t)$ noté $Ph''_2(t)$. Sur l'encart de la figure 2.25 (zoom du retard entre $Ph'_1(t)$ et $Ph'_2(t)$), on peut voir qu'à l'instant t_1 l'estimé de $\hat{\Delta}t$ est trop petit, car le signal retardé décroissant $Ph'_1(t_1 - \hat{\Delta}t)$ est inférieur au signal $Ph'_2(t_1)$ (donc $Ph_{diff}(t) < 0$). Il est important de noter que si les signaux avaient été croissants à cet instant t_1 , le même $\hat{\Delta}t$ (trop petit) serait traduit par une valeur $Ph'_1(t_1 - \hat{\Delta}t)$ supérieure à $Ph'_2(t_1)$ (soit $Ph_{diff}(t) > 0$) (cas non représenté ici).

Le même raisonnement s'applique lorsque $\hat{\Delta}t$ estimé est trop grand. D'où, le sens d'évolution de $\hat{\Delta}t$ estimé (voir fig.2.28). Le signe de $\hat{\Delta}'_t(t)$ dépend à la fois de la pente de $Ph'_2(t)$ et de l'erreur $Ph_{diff}(t)$.

Ph_{diff} Ph''_2	+	-
+	Δt ↗	Δt ↘
-	Δt ↘	Δt ↗

Fig. 2.28: Capteur de flux optique : Évolution du retard $\hat{\Delta}t$ estimé. Ce tableau traduit le sens de variation à imposer au retard estimé $\hat{\Delta}t(t)$ pour minimiser $|Ph_{diff}(t)|$. Ce sens dépend de la pente de $Ph'_2(t)$ (signe de $Ph''_2(t)$) et de l'erreur $Ph_{diff}(t)$.

Lorsque $Ph'_1(t - \hat{\Delta}t(t))$ est parfaitement égal à $Ph'_2(t)$, on a une erreur $Ph_{diff}(t)$ nulle. On définit alors $\hat{\Delta}'t(t) = 0$ ($\hat{\Delta}t(t)$ reste inchangé).

Variantes de l'algorithme de descente de gradient

On décrit ci-après 4 variantes permettant de faire évoluer l'estimation de $\hat{\Delta}t(t)$. Cette liste d'algorithmes n'est pas exhaustive.

Une première méthode pour estimer le retard Δt consiste à utiliser une logique simple (voir fig.2.29) pour faire évoluer $\hat{\Delta}t(t)$. En s'appuyant sur les règles définies par le tableau (fig.2.28) et en désignant par $\Delta't(t)$ la dérivée de Δt , on a :

- si $Ph_{diff}(t)$ de même signe que $Ph''_2(t)$, alors on définit $\Delta't(t) = +\epsilon$,
- si $Ph_{diff}(t)$ de signe opposé à $Ph''_2(t)$, alors on définit $\Delta't(t) = -\epsilon$.

Cette méthode est extrêmement simple à mettre en œuvre, mais la vitesse d'évolution de $\hat{\Delta}t(t)$ est limitée à $\pm \frac{\epsilon}{\partial t}$.

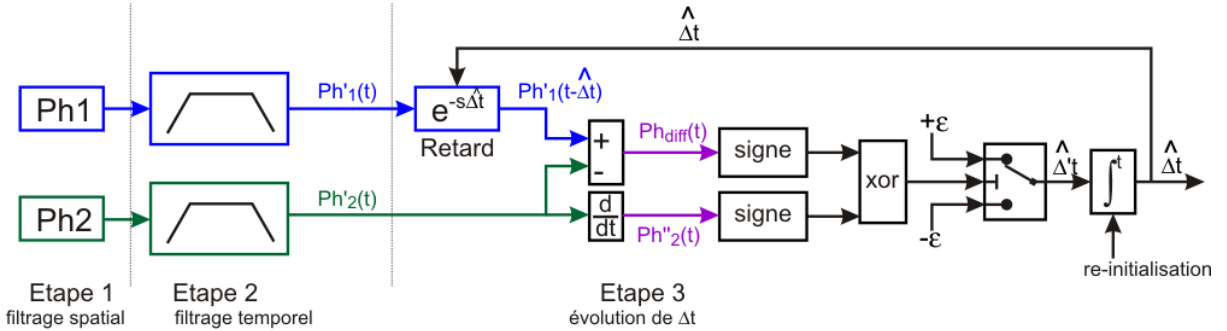


Fig. 2.29: Capteur de flux optique : évolution de Δt par la méthode \oplus (xor).

Une seconde méthode, plus élaborée, prend en compte l'amplitude de l'erreur et de la dérivée $Ph''_2(t)$ du signal visuel filtré temporellement $Ph'_2(t)$ (voir fig.2.30a) :

$$\Delta't(t) = \frac{Ph_{diff}(t)}{Ph''_2(t)} \quad (2.28)$$

En pratique, les signaux sont bruités (notamment Ph''_2). Aussi, cette relation d'évolution pour $\Delta t(t)$, prise telle quelle, donne un résultat bruité et peut, dans le pire des cas, ne pas converger vers la solution.

On pondère alors l'évolution de $\Delta t(t)$ par un facteur α , constant, pris dans l'intervalle $[0 \ 1]$.

$$\Delta't(t) = \alpha Ph_{diff}(t)/Ph''_2(t) \quad (2.29)$$

Plus le facteur α sera faible, meilleure sera l'estimation du retard $\hat{\Delta}t(t)$ car elle sera lissée. Cependant, une valeur faible de α va diminuer la vitesse de convergence de l'estimation de $\hat{\Delta}t(t)$, rendant difficile l'estimation d'un retard Δt lorsque celui-ci varie rapidement.

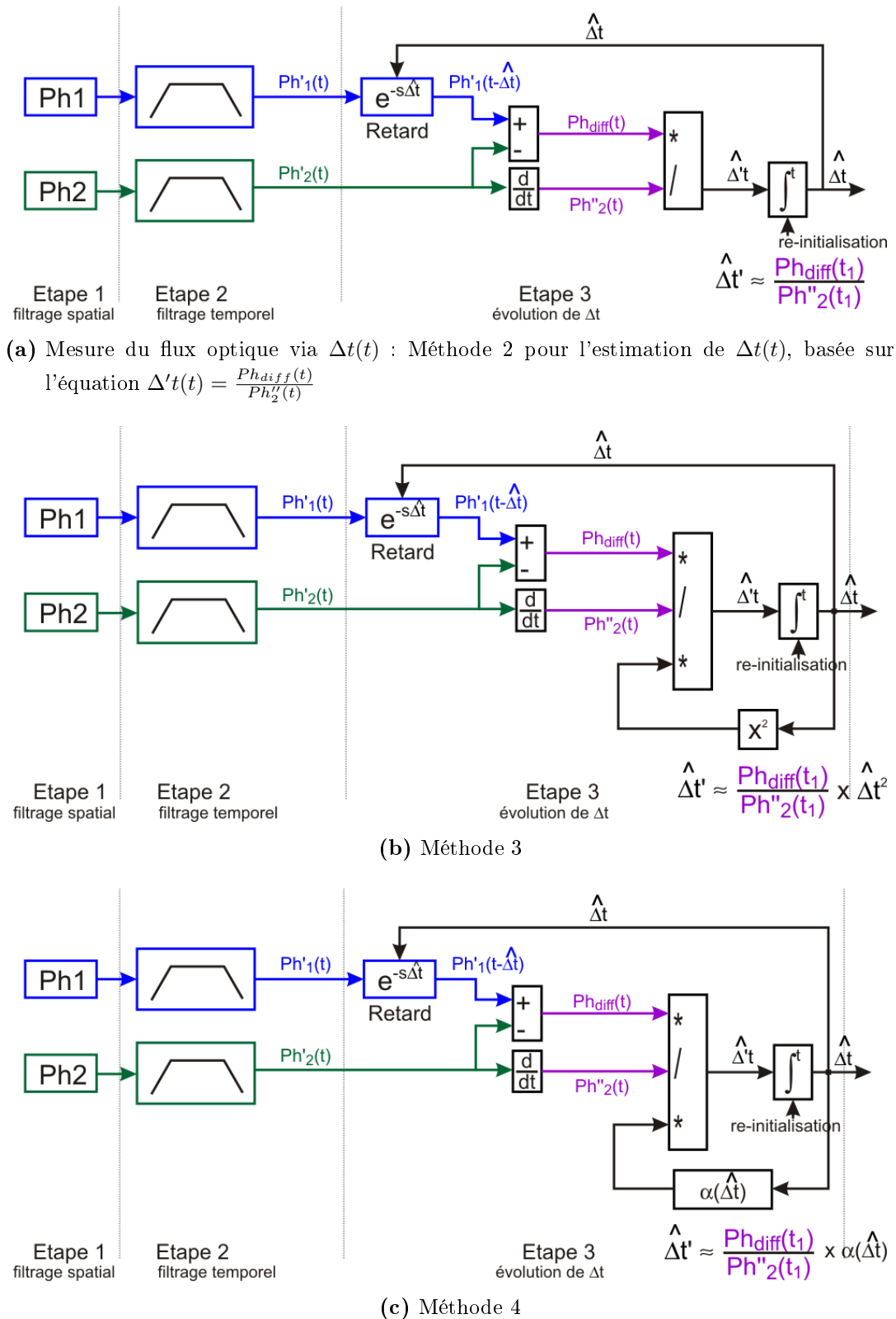


Fig. 2.30: Capteur de flux optique : 3 autres méthodes pour l'évolution de Δt .

Une troisième méthode est présentée sur la figure 2.30b. Avec les deux premières méthodes, le facteur α était constant. Le bruit dû à l'estimation $\hat{\Delta t}(t)$ était donc constant. Le flux optique étant proportionnel à l'inverse du retard, le bruit sur le flux optique calculé devient inversement proportionnel à $\Delta t(t)$, donc non constant sur la plage de mesure de flux optique. Le même raisonnement s'applique à la vitesse de convergence de l'algorithme : pour $\Delta t(t)$, la vitesse de convergence est constante sur toute la plage de $\Delta t(t)$ mesurée. Pour la mesure de flux optique $\omega(t)$, la vitesse de convergence est proportionnelle à $\omega(t)$, donc d'autant plus grande que $\omega(t)$ est plus grand.

En définissant α en fonction de $\omega(t)$, on peut rendre constant le bruit sur le flux optique calculé. L'estimation d'une variation de flux optique aura alors la même dynamique sur toute la gamme de mesure du flux optique.

On prend

$$\alpha_a(t) = \alpha_0 * \frac{1}{\omega^2(t)} = \alpha_0 * \Delta_t^2(t) \quad (2.30)$$

En l'exprimant en fonction de $\Delta t(t)$:

$$\alpha(\Delta t) = a_0 * \Delta_t^2 \quad (2.31)$$

Quatrième méthode (voir fig.2.30c) Lorsque le capteur est utilisé en présence d'un éclairage artificiel, l'ondulation à $100Hz$ est en majeure partie filtrée par le filtre analogique passe-bas de l'étape 2. Cependant, lorsqu'on mesure des flux optiques faibles, l'amplitude de la dérivée des signaux est faible et le résidu à $100Hz$, qui ne contient pas d'information utile, devient une source d'erreur. On note que ce résidu à $100Hz$ a une faible influence lorsque le retard Δt est un multiple de $10ms$ car la comparaison de Ph_2 avec Ph_1 retardé s'effectue sur une même phase de ce signal périodique à $100Hz$. On propose donc de moduler $\alpha(\Delta t)$ par la fonction $|\cos(\frac{2*\pi*\Delta t}{10*10^{-3}})|$. Soit :

$$\alpha(\Delta t) = a_0 * \Delta_t^2 * \left| \cos\left(\frac{2 * \pi * \Delta t}{10 * 10^{-3}}\right) \right| \quad (2.32)$$

et

$$\Delta't(t) = \alpha(\Delta t(t)) * \frac{Ph_{diff}(t)}{Ph_2''(t)} \quad (2.33)$$

Mise en œuvre en temps discret

Le signal de chaque photodiode filtré temporellement est échantillonné et numérisé. La mise en œuvre de la mesure du retard est réalisée sur des signaux discrets. Nous décrivons ici la méthode de calcul discrète (temporellement) qui découle des relations exprimées en temps continu. Nous verrons aussi que par simplifications successives, il est possible d'obtenir une implantation très simple sur un calculateur discret. Nous partons ici de la méthode la plus précise (quatrième méthode : fig.2.30c) avant d'en proposer des solutions simplifiées.

Soit Ts la période d'échantillonnage (ici $0.5ms$; échantillonnage à $2Khz$).

La version discrète de α se calcule par la fonction $\alpha(\Delta t)$ avec $\Delta t = n * Ts$ ($n \in \mathbb{N}$). Cette fonction discrète peut être précalculée et stockée dans un tableau.

On note $Ph_1(k)$ et $Ph_2(k)$ les versions discrètes de $Ph'_1(t)$ et $Ph'_2(t)$ (déjà filtrés temporellement passe-bande)

A chaque nouveau pas de calcul, on a :

- $Ph_1(k) = Ph'_1(t - k * Ts)$: l'échantillon de la photodiode 1 filtré passe-bande à l'instant k ,
- $Ph_2(k) = Ph'_2(t - k * Ts)$: l'échantillon de la photodiode 2 filtré passe-bande à l'instant k ,
- $\Delta t(k)$: le retard estimé à l'instant k .

À partir de ces trois informations, on déduit :

- une estimation de la dérivée : $Ph'_2(k) = (Ph_2(k) - Ph_2(k - 1))/Ts$, et
- l'erreur : $Ph_{diff}(k) = Ph_1(k - \Delta t(k)) - Ph_2(k)$.

Le retard qui sera estimé à l'échantillon suivant est :

$$\Delta t(k + 1) = \Delta t(k) + \alpha(\Delta t(k)) * Ph_{diff}(k) / Ph'_2(k) \quad (2.34)$$

A chaque pas de calcul, une unique itération permet de faire converger le retard estimé vers la valeur réelle de retard.

Variantes : Une version simplifiée de l'estimation du retard est :

$$\Delta t(k + 1) = \Delta t(k) + \alpha(\Delta t(k)) * 2(1 - \text{sign}(Ph_{diff}(k)) \oplus \text{sign}(Ph'_2(k))) \quad (2.35)$$

Où \oplus est l'opérateur ou exclusif (xor). Cette version est encore plus facile à implanter dans un microcontrôleur qui ne disposerait pas d'une unité de calculs capable d'effectuer

une division. Les fonctions signe et \oplus sont élémentaires et font parties des fonctions les plus rapidement exécutées dans un microcontrôleur.

Une simplification supplémentaire serait de remplacer $a(t)$ par une constante. Cependant, le gain en temps de calcul serait négligeable, car $a(t)$ est précalculé dans un tableau.

$$\Delta t(k+1) = \Delta t(k) + a * 2(1 - (\text{sign}(Ph_{diff}(k)) \oplus \text{sign}(Ph'_2(k)))) \quad (2.36)$$

Résultats expérimentaux

Le DEM décrit ici a été réalisé sur une plateforme robotisée (photo p.170) dont l'œil est équipé de deux photorécepteurs. Les paramètres optiques, identifiés à la section 2.1.3 (p.25) sont $\Delta\rho = 3^\circ$ et $\Delta\varphi = 2.87^\circ$. Ce robot aérien est capable de tourner autour de son axe de lacet, et il est aussi équipé d'un micro-gyromètre.

L'expérimentation consiste à faire tourner la plateforme autour de son axe de lacet, et à comparer au signal du gyromètre le flux optique, mesuré d'une part avec le DEM originel, d'autre part avec le nouveau DEM décrit ici. Le gyromètre mesure la vitesse de rotation angulaire de la plateforme et sert ainsi de référence. Le flux optique de rotation théorique correspond exactement à cette vitesse de rotation de la plateforme.

Deux enregistrements ont été réalisés (respectivement fig.2.31-2.32 et fig.2.33-2.34). Le premier enregistrement (fig.2.31, détail sur fig.2.32) illustre la rapidité avec laquelle le nouveau DEM poursuit les variations rapides de flux optique. La plateforme en rotation autour de son axe de lacet est en effet délibérément perturbée, provoquant de brusques variations de vitesse angulaire, visibles sur la mesure du gyromètre (courbe grise). On constate que sur de telles variations rapides de vitesse angulaires, le nouveau DEM (courbe bleue) est aussi réactif que le DEM originel (courbe verte). Mais on voit que les erreurs de mesure sont nettement diminuées avec le nouveau DEM.

La seconde expérience (fig.2.33) illustre la réponse à une rampe de vitesse angulaire, du DEM originel et du nouveau DEM. Cette expérience montre la capacité du nouveau DEM à discriminer le sens de rotation. Ainsi, le nouveau DEM (courbe bleue) est bidirectionnel alors que le DEM originel ne mesure le flux optique que dans son sens préféré, l'autre sens fournissant des mesure aberrantes (de 10s à 20s). Comme pour la première expérience, le détail de cette expérience (fig.2.34) montre le rafraîchissement continu apporté par le nouveau traitement, ainsi que la réduction de l'amplitude des erreurs de mesure, par rapport au DEM originel.

2.3.5 Discussion

Le nouveau capteur **DEM** de flux optique que nous avons mis au point apporte les avantages suivants :

- Mesure du flux optique bidirectionnel.
- Mesure du flux optique sur une gamme de luminance élargie.
- Mesure du flux optique non perturbée par une variation de luminance (absence de transitoire).
- Mesure du flux optique capable de suivre les variations soudaines de la vitesse du capteur relativement à son environnement visuel (absence de transitoire).
- Rafraîchissement continu de la mesure de flux optique, dès qu'une information utile est présente sur les signaux (mesure à partir de toutes les variations du signal).
- Simplicité de réalisation.
- Charge de calcul faible (nécessite peu de ressources d'un microcontrôleur).
- Mise en œuvre rapide (peu d'ajustements nécessaires).
- Robustesse (absence de système adaptatif).
- Mesure du flux optique plus fine.
- Réduction des erreurs de mesure (imprécision due au seuillage).
- Aucun surcoût : ne nécessite que le chargement d'un nouveau programme informatique embarqué dans le microcontrôleur.

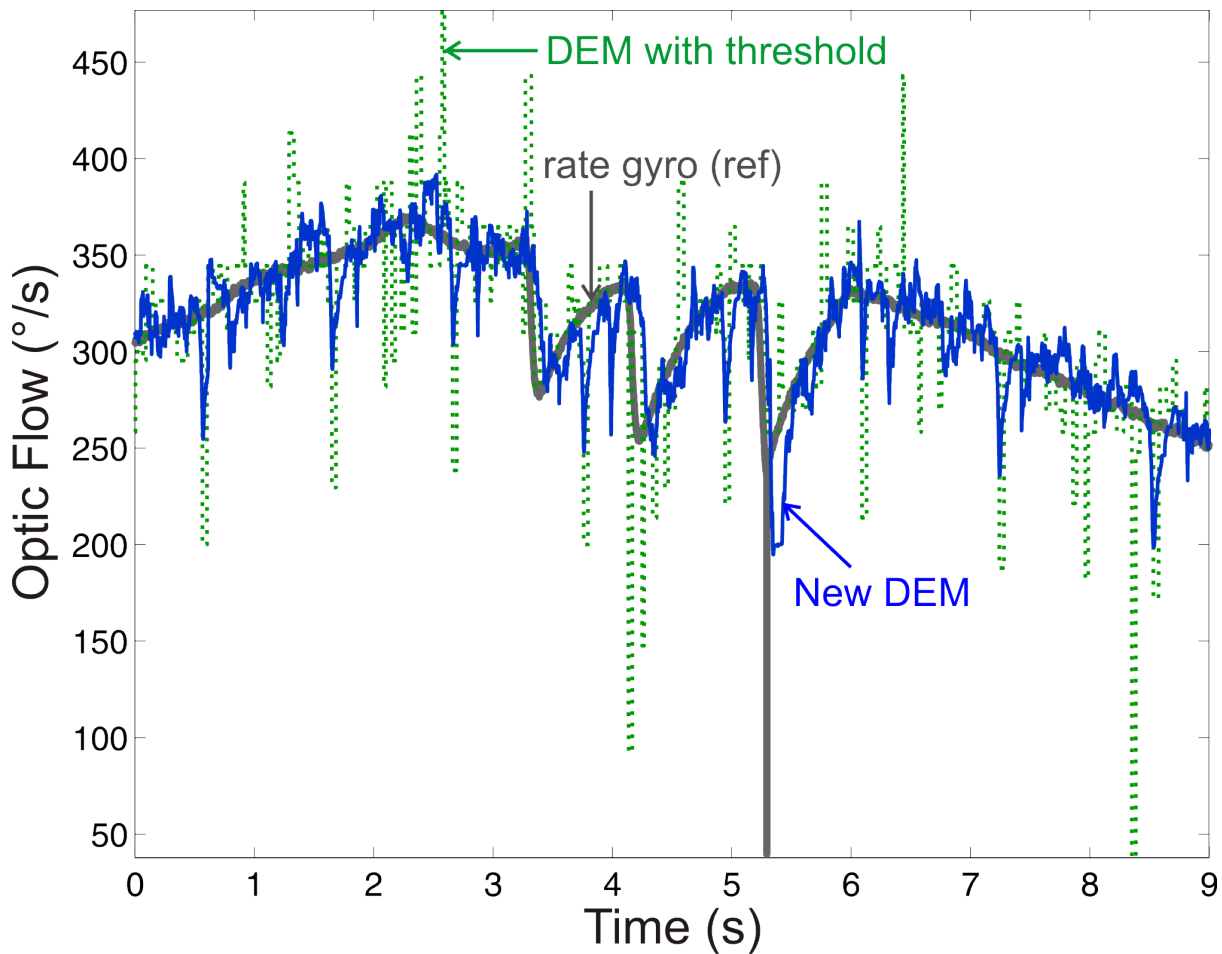


Fig. 2.31: Mesure d'un flux optique de *rotation* dans un environnement réel (bureau). Un capteur DEM est mis en rotation autour de son axe de lacet. Sa vitesse angulaire est relevée à l'aide du gyromètre (courbe grise). La sortie du capteur DEM originel (pointillés verts) et celle du capteur DEM construit selon la nouvelle méthode (courbe bleue) sont comparées avec la sortie du gyromètre, servant ici de référence : le flux optique de rotation est en effet égal à la vitesse angulaire du capteur car les éléments de la pièce sont stationnaires. On voit que les mesures fournies par le capteur DEM originel sont mises à jour de manière *brusque* et qu'elles contiennent parfois des erreurs importantes. Le nouveau capteur DEM produit au contraire une mesure *continue*, avec des erreurs par ailleurs plus faibles. La capacité du nouveau capteur DEM à suivre une brusque variation de la vitesse angulaire mesurée est aussi bonne que celle du DEM originel. Le bruit présent sur les mesures est dû au bruit entachant les signaux des photodiodes. Il serait possible de réduire ce bruit, mais au détriment de la réponse dynamique du capteur. Un détail de cet enregistrement (intervalle [4 5]s) est présenté sur la figure 2.32.

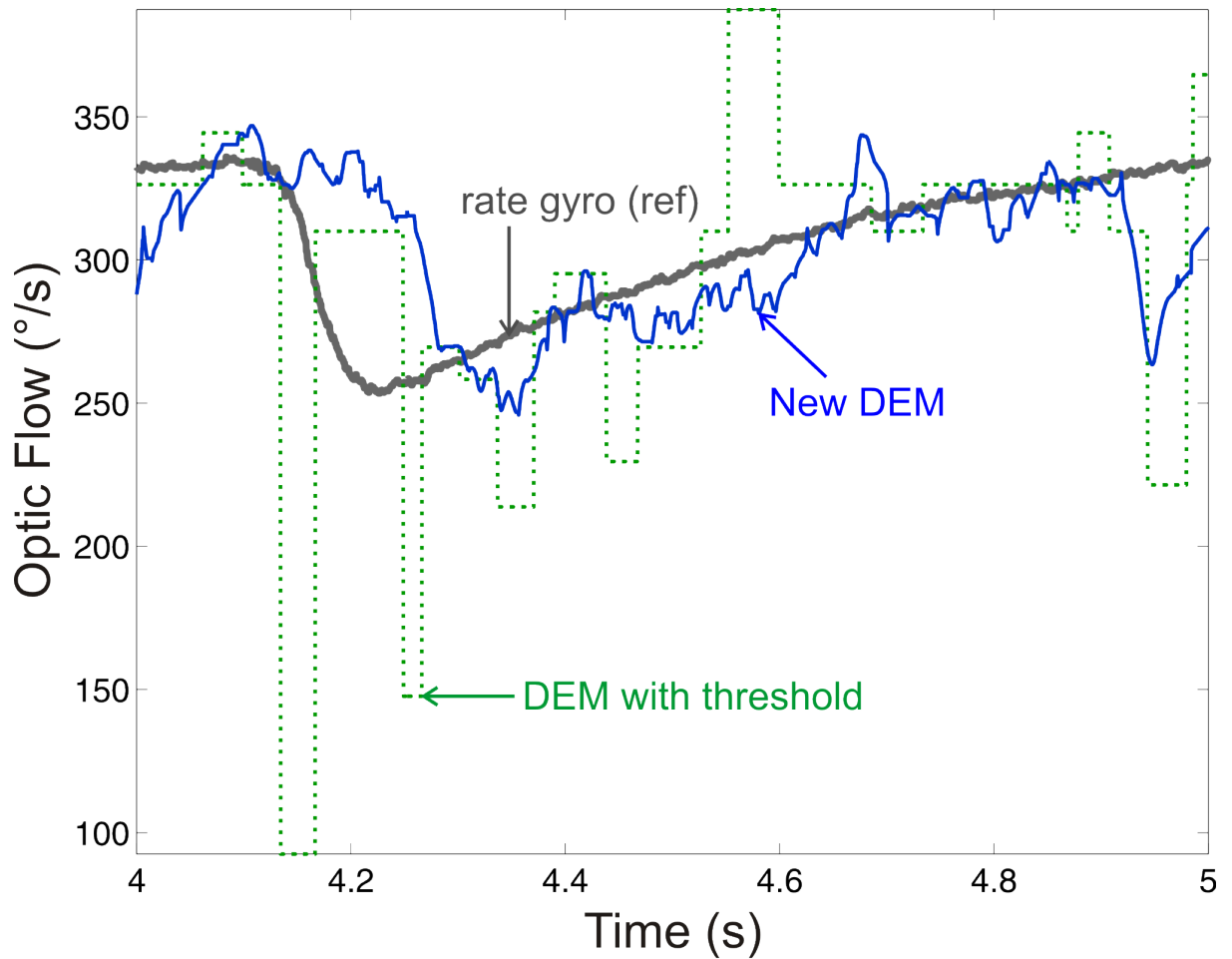


Fig. 2.32: détail de la figure 2.31 montrant une mesure de flux optique dans l'intervalle de temps [4 5]s.

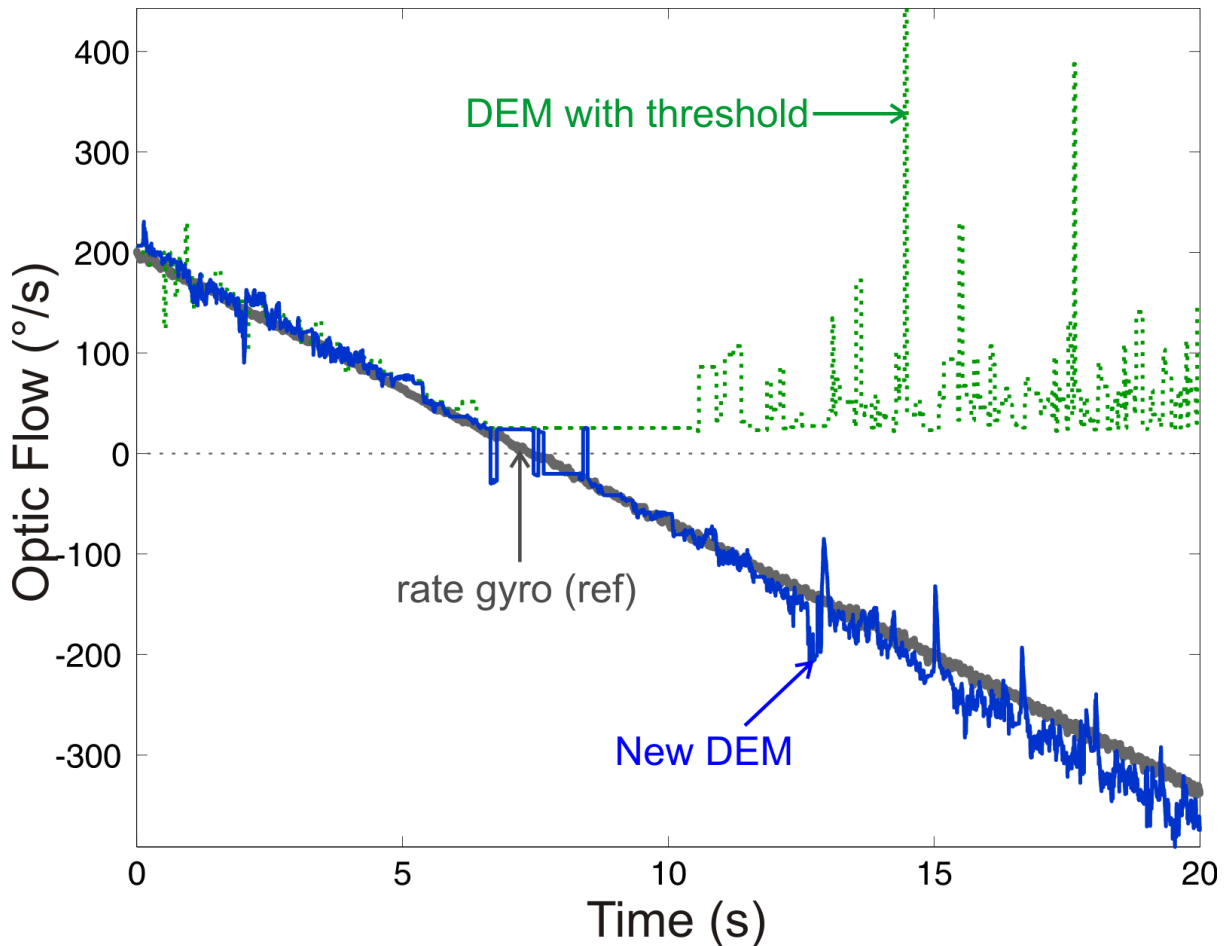


Fig. 2.33: Réponse des deux types de DEM et du gyromètre à une rampe de flux optique. Les conditions expérimentales sont identiques à celles présentées fig.2.31. Dans cette expérience, le capteur tourne dans un sens en ralentissant, puis tourne dans le sens opposé en accélérant. Les sorties des capteurs DEM originel (courbe verte pointillée) et du nouveau DEM (courbe bleue) sont comparées à celle du gyromètre (courbe grise). Le nouveau capteur permet de mesurer un flux optique dans les deux sens. Un détail de cet enregistrement (intervalle [0 1.8]s) est présenté sur la figure 2.34.

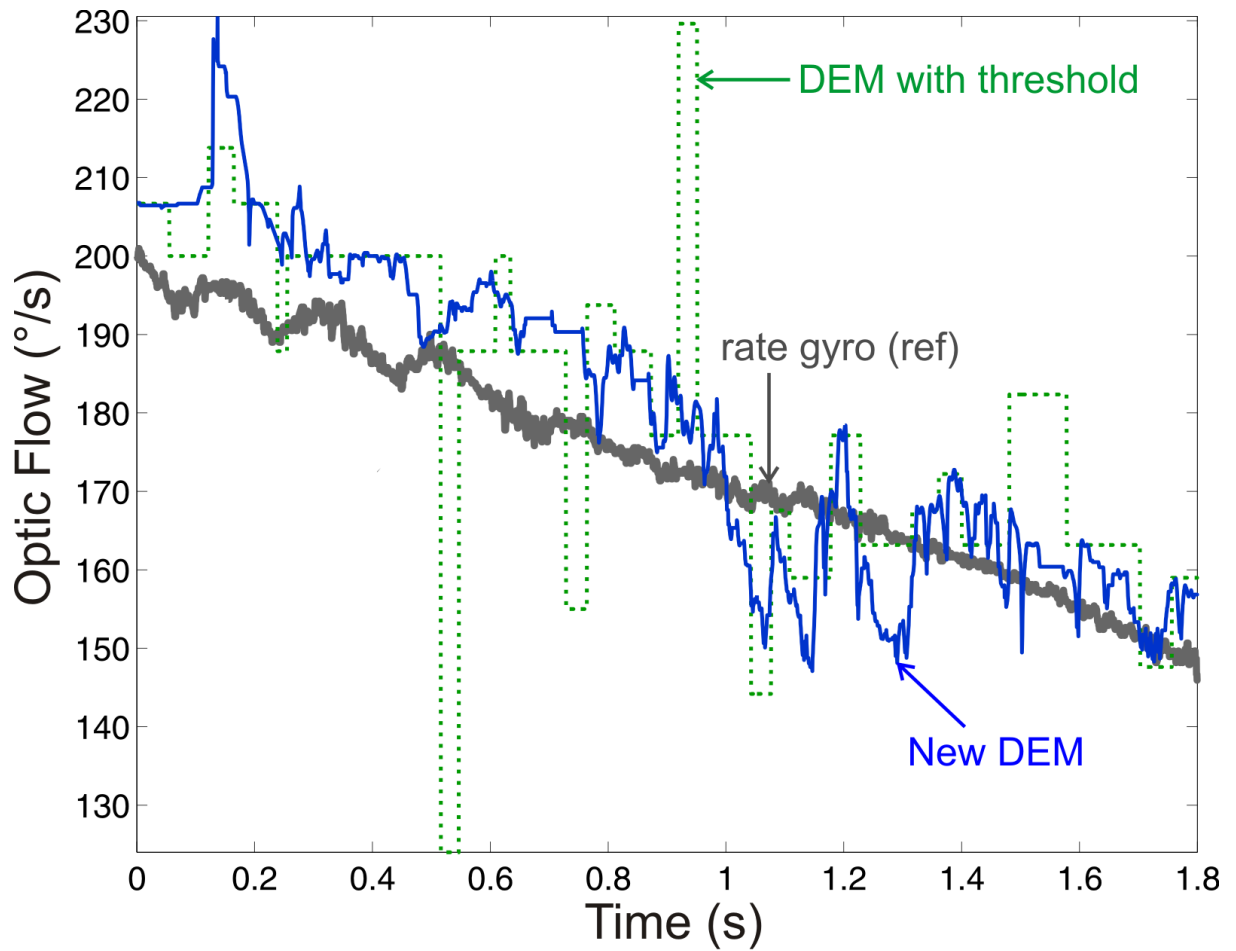


Fig. 2.34: Détail des réponses à la rampe de flux optique, montrées sur la figure 2.33 et limitées ici à la période [0 1.8].

2.4 Le capteur de position angulaire OSCAR revisité

Le capteur optique OSCAR mis au point au laboratoire au cours de la dernière décennie localise avec précision la *position angulaire* d'un bord contrasté (ou d'une barre contrastée) placé dans son champ visuel. Il est constitué simplement de deux photorécepteurs placés derrière une même lentille. Les axes optiques de ces deux photorécepteurs, séparés d'un angle $\Delta\varphi$, sont translatés périodiquement à $10Hz$ avec une amplitude d'environ $A = 2\Delta\varphi$. L'optique et le balayage sont directement inspirés du système visuel de la mouche. Le fonctionnement de ce capteur, tel qu'il est décrit dans [Viollet 99a, Viollet 99b, Viollet 01, Franceschini 04b, Viollet 05, Viollet 06] ne permet pas d'expliquer certaines caractéristiques observées.

Un nouvel éclairage sur le fonctionnement de ce capteur permet d'expliquer toutes les caractéristiques observées. Bien que le principe de fonctionnement soit plus complexe à appréhender, il conduit à une simplification dans la réalisation de ce capteur. On montre ici que *la loi de balayage périodique* peut être quelconque, et que *l'amplitude* du balayage peut être plus faible ($A < \Delta\varphi$) que ce qui était prédit. Le relâchement de ces deux contraintes (forme et amplitude du balayage) rend par ailleurs ce capteur encore plus intéressant sur le plan biologique (la mouche pourrait utiliser un tel capteur). De plus, la réalisation du capteur à bord de nos robots en est simplifiée d'autant.

2.4.1 Capteur visuel doté d'une micro-vibration

Vibration des axes optiques dans le vivant

Mouvements rétiniens chez la mouche. Les travaux réalisés au laboratoire [Franceschini 97] ont permis de comprendre l'action des muscles MOS et MOT présentés sur la figure 2.35. Alors que ces muscles étaient pressentis pour mouvoir les antennes, c'est

en fait la rétine qu'ils mettent en mouvement. L'enregistrement des impulsions de commande du muscle MOT montre un motif périodique, à une fréquence voisine de $6Hz$ (voir fig.2.39 p.83).

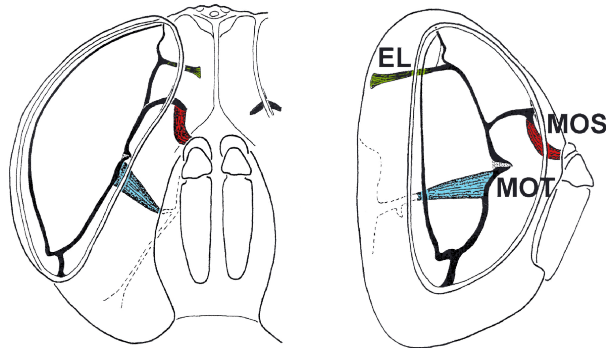


Fig. 2.35: Coupe frontale (gauche) et sagittale (droite) de la tête d'une mouche montrant les Muscles MOS et MOT actionnant la rétine de la mouche *Musca Domestica*. La contraction de ces deux muscles permet de translater la rétine. Typiquement, la rétine se translate périodiquement à une fréquence de $6Hz$. (Extrait de [Franceschini 91, Mücke 91]).

Mouvements rétiniens chez l'araignée. Des mouvements rétiniens plus lents ont été observés dans les deux yeux principaux de l'araignée sauteuse [Land 69]. Leur amplitude est de l'ordre de plusieurs dizaines de degrés (50°), leur fréquence est faible (entre 0.05 à $1Hz$) et leur vitesse varie de $2^\circ/s$ à $100^\circ/s$. Les deux yeux frontaux de l'araignée peuvent également subir un mouvement de torsion.

Mouvements oculaires chez les mammifères. Chez les mammifères, le déplacement des axes optiques est réalisé par la rotation du globe oculaire complet. Ce dernier est composé de l'ensemble [optique + rétine]. Trois catégories de mouvement oculaire sont répertoriées :

- **La poursuite fine** qui permet de suivre un objet en déplacement lent,
- **La saccade oculaire** qui permet de passer rapidement d'une zone explorée à une autre,
- **Les micromouvements.**

Les micromouvements retiennent ici notre attention. Ces derniers sont à nouveau subdivisés en trois catégories :

- **tremblement** (micro-vibration, micronystagmus),

- **dérive lente,**
- **microsaccades.**

Les mouvements de microvibration sont des mouvements de très petite amplitude et de fréquence allant de $5Hz$ à $200Hz$. L'origine et l'utilité de ces micromouvements est encore aujourd'hui controversée. Ces mouvements ne sont pas contrôlés volontairement mais il est possible d'en atténuer l'amplitude : par exemple lors d'un exercice de tir, au moment où l'on se concentre sur la cible, le micromouvement oculaire est supprimé. Pendant la suppression des micromouvements, le champ de vue se réduit (un voile noir apparaît sur les zones excentrées) jusqu'à ce qu'un mouvement de l'œil intervienne. De même, les microsaccades ont une influence sur l'attention visuelle. Une étude récente [Hafed 09] montre que ces microsaccades sont contrôlés par le cerveau.

Chez les mammifères, les micromouvements rapides des axes visuels influent sur la perception visuelle. Par extension, on suppose que le mouvement rétinien observé chez la mouche a pour fonction l'amélioration des performances visuelles. Un dispositif optique équivalent à deux facettes conjointes de la mouche est réalisé pour étayer cette hypothèse.

Capteurs électroniques dotés d'une vibration

L'étude de capteurs visuels artificiels mettant à profit une micro-vibration de leurs axes optiques est récente. Le premier capteur doté d'une vibration réalisé au laboratoire a permis d'**améliorer la sensibilité du capteur de flux optique**. Ce premier capteur [Mura 96] mettait en vibration les axes optiques de 12 photorécepteurs grâce à un microscanner galvanométrique. Les photorécepteurs alimentaient deux à deux des circuits DEM effectuant une mesure de *vitesse angulaire*. Le principe repose sur le fait que la rotation angulaire des axes optiques ajoute un offset de flux optique connu et bénéfique. Il est alors possible de déduire cet offset de la mesure fournie par le capteur. On a pu montrer ainsi que le déplacement angulaire à vitesse constante des axes optiques permettait de mesurer des *flux optiques de translation* très faibles, comme ceux qui se produisent près de la direction dans laquelle on se dirige (voir point 0 de la fig.2.20a p.47).

Les autres capteurs optiques utilisant une micro-vibration servent soit à mieux *détecter* soit à mieux *localiser* un bord contrasté. Ainsi, la micro-vibration 1D utilisée dans [Hoshino 98, Hoshino 01] permet d'améliorer la *détection* de fronts contraste. Une micro-vibration *circulaire* (2D) a ainsi été réalisée pour les axes optiques d'une matrice de $32 * 32$ pixels [Landolt 01]. Le traitement des signaux analogiques issus de ces 1024 pixels a permis de coder la présence d'un bord contrasté avec une meilleure précision.

La matrice CCD d'un appareil photo est parfois actionnée, lui permettant de se translater en 2D. Cette translation peut être actionnée de manière à stabiliser l'image lors de la prise de vue. Une translation subpixel peut également permettre de "suréchantillonner" une image : l'image est alors mémorisée pour différentes positions du capteur CCD. Les différentes images sont ensuite fusionnées pour créer une image dont la résolution est supérieure à celle de l'imageur CCD de l'appareil, mais au prix d'un accroissement considérable de la mémoire nécessaire et des calculs.

2.4.2 Le capteur OSCAR de 1998 à 2009

Les travaux sur le capteur OSCAR ont débuté au laboratoire de biorobotique en 1998. On rappelle ici l'inspiration biologique de ce dispositif optique à balayage et l'on en décrit le principe de fonctionnement, tel qu'il fut décrit à l'origine. On revient alors sur ce principe en montrant un côté caché, qui n'était pas apparu jusqu'ici. On verra alors que l'explication nouvelle du principe sous-jacent permet de simplifier la réalisation de ce capteur.

Dans sa version élémentaire, le capteur OSCAR est constitué de deux photorécepteurs placés derrière une même lentille (fig.2.36). La vibration des axes optiques des deux photodiodes est obtenue ici par la translation de la rétine (fig.2.37), comme cela est observé dans les ommatidies de la mouche (voir fig.2.35 et 2.39).

L'optique placée devant les deux photorécepteurs (en l'occurrence deux photodiodes) confère à chacun d'eux une fonction de sensibilité directionnelle (directivité) gaussienne obtenue par simple *défocalisation* (voir p.25). Les fonctions de sensibilité directionnelle des deux photorécepteurs, se recouvrent dans leur partie centrale. La figure 2.38 présente les caractéristiques optiques types du dispositif.

La sensibilité directionnelle $s(\Psi)$ d'un photorécepteur en fonction de l'angle Ψ entre son axe optique et celui d'une source lumineuse s'exprime par :

$$s(\Psi) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2} * \pi} e^{-\frac{\Psi^2}{2\sigma^2}} \quad (2.37)$$

Le paramètre $\Delta\rho$ définit la largeur à mi-hauteur ("*Full Width at Half Maximum* ($\Delta\rho$) (*FWHM*)") de cette fonction. $\Delta\rho$ est appelé aussi "angle d'acceptance" et sa valeur se déduit directement de la variance σ^2 de la gaussienne par :

$$\Delta\rho = \sigma * 2\sqrt{2 \ln 2} \quad (2.38)$$

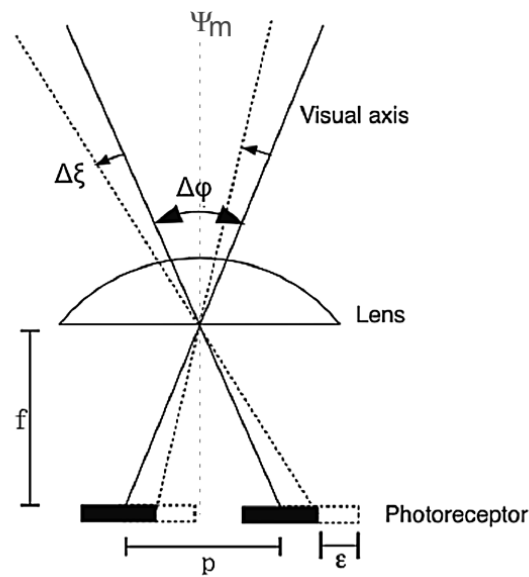


Fig. 2.36: Les deux photorécepteurs sont placés derrière une lentille fixe et chacun à un axe optique qui lui est propre. La translation de ϵ des photorécepteurs dans le plan perpendiculairement à l'axe optique de la lentille fait pivoter les deux axes optiques d'un angle $\Delta\xi$. Une translation périodique des photorécepteurs permet de faire "vibrer" les axes optiques. (Extrait de [Franceschini 04b]).

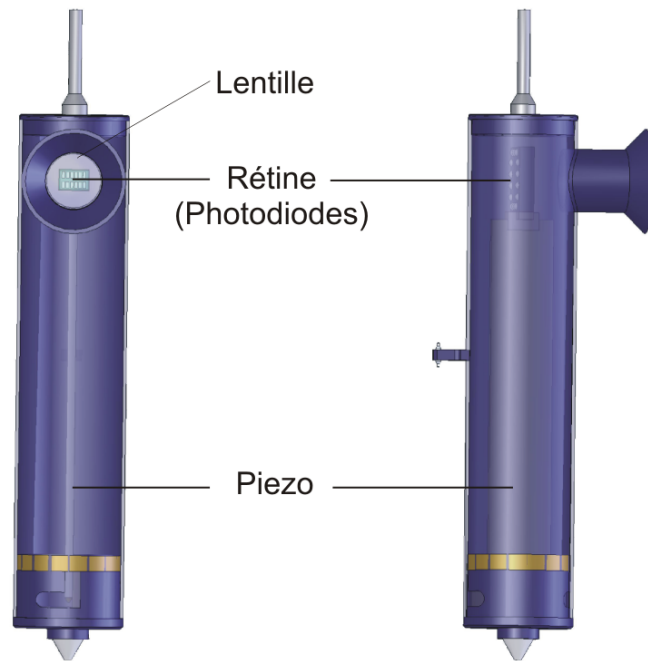


Fig. 2.37: CAO du Système visuel complet du robot OSCAR II. On peut voir par semi-transparence la lame piézo-électrique située dans le tube et servant à translater les photorécepteurs placés à son extrémité supérieur. Cette *translation* cause une *rotation* des axes optiques (voir fig.2.36). Elle reproduit la micro-translation périodique de la rétine observée chez la mouche (voir fig.2.35 et 2.39).

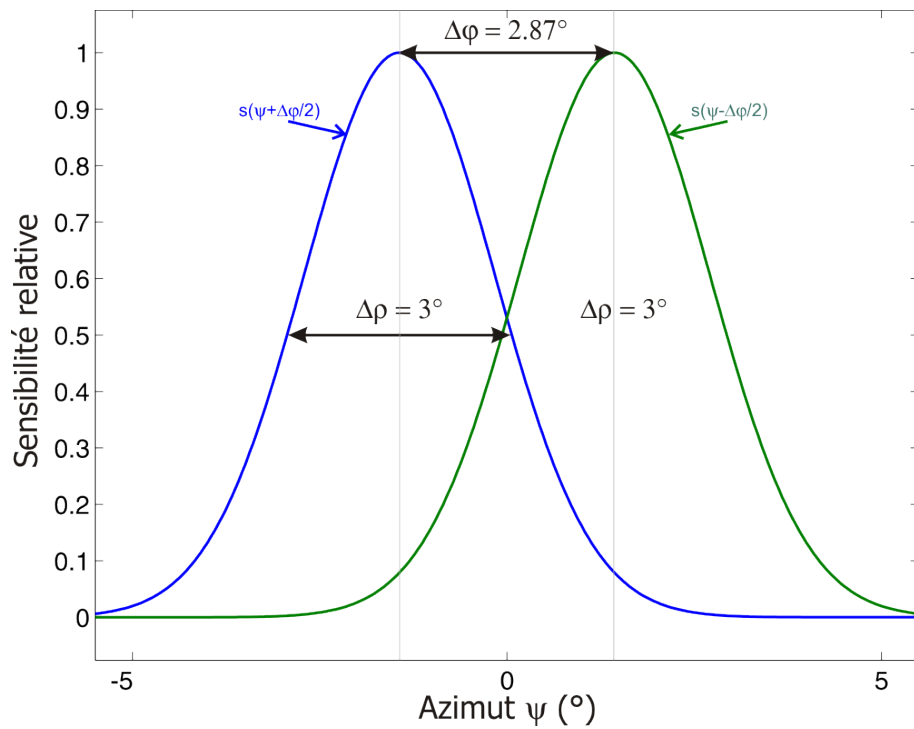


Fig. 2.38: Courbe de sensibilité angulaire $s(\Psi_1)$ et $s(\Psi_2)$ des deux photorécepteurs. L'angle inter-récepteur est $\Delta\varphi = 2.87^\circ$ et l'angle d'acceptance est $\Delta\rho = 3^\circ$.

*Codage de la position angulaire d'une cible par une mesure de vitesse
angulaire*

Les enregistrements de la commande du muscle MOT sur une mouche en vol montrent une excitation périodique du muscle. La figure 2.39a présente le signal impulsionnel (“impulsions nerveuses”) de la commande du muscle MOT, enregistré chez une mouche *Musca Domestica* en vol. On peut identifier sur cet enregistrement (voir fig.2.39b) une modulation de fréquence à 5 – 6Hz. Cette modulation est constituée d’une phase de relaxation assez courte suivie d’une phase d’excitation progressive plus longue.

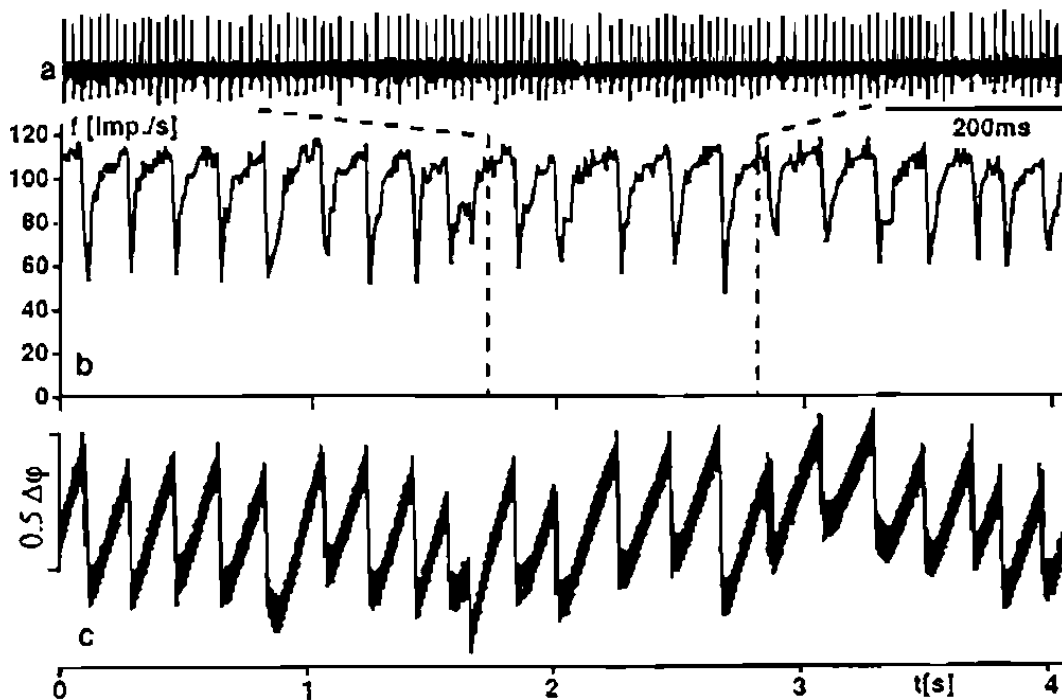


Fig. 2.39: Commande du muscle MOT chez la mouche domestique en vol. (a) enregistrement des impulsions nerveuses au niveau du muscle MOT, dont la contraction entraîne la translation de la rétine (voir fig.2.35). (b) Fréquence instantanée de ces impulsions. (c) Fréquence instantanée filtrée par un système du 1^{er} ordre permettant de reconstruire le mouvement de la rétine, qui se traduit par une rotation des axes optiques (voir fig.2.36 p.80). On reconnaît une séquence périodique dont la fréquence est de l’ordre de 5 – 6Hz. Cette séquence périodique se compose d’une phase de relaxation courte (55ms) suivie d’une phase de contraction plus longue (155ms). (Extrait de [Franceschini 97]).

Chez la mouche, la *translation* de la rétine a pour effet de générer une *rotation* des axes optiques des récepteurs d'une même ommatidie. Le capteur OSCAR dispose d'un actionneur piezo-électrique (de type *bender*, Physik Instrumente) permettant de créer pareillement une rotation périodique des axes optiques de deux photorécepteurs (figure 2.37). Ce mouvement est constitué :

- d'une phase "aller" dont le profil de vitesse est une exponentielle décroissante, reproduisant ainsi la phase de relaxation de la rétine de la mouche,
- d'une phase "retour" à vitesse constante.

La mesure de position angulaire est réalisée lors de la phase à vitesse variable (ici, exponentielle). Les signaux des deux photorécepteurs sont alors traités par un Détecteur Elementaire de Mouvement (DEM), capable de mesurer une vitesse angulaire (flux optique, ici "de rotation"). La mesure du DEM est mise à jour uniquement lorsqu'un bord contrasté est rencontré. Ainsi, par suite de la vitesse variable du balayage, le détecteur de flux optique va mesurer une *vitesse angulaire* (flux optique) qui est le reflet de la *position angulaire* du bord contrasté. La figure 2.40 présente une simulation de deux photorécepteurs (a) animés d'un balayage dont le profil est montré en (b). Les courbes (c), (d) et (e) représentent l'intensité lumineuse mesurée par les photorécepteurs lorsque le bord contrasté est placé aux positions 1, 2 et 3 (encart (a)). Les courbes (f), (g) et (h) représentent les signaux dérivés des photorécepteurs. La mesure de Δt (Le flux optique est $\frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$) est réalisée ici avec un seuil réglé à 0,1. On constate que Δt augmente d'autant plus que le contraste est plus excentré vers la droite ($\Delta t_3 > \Delta t_2 > \Delta t_1$).

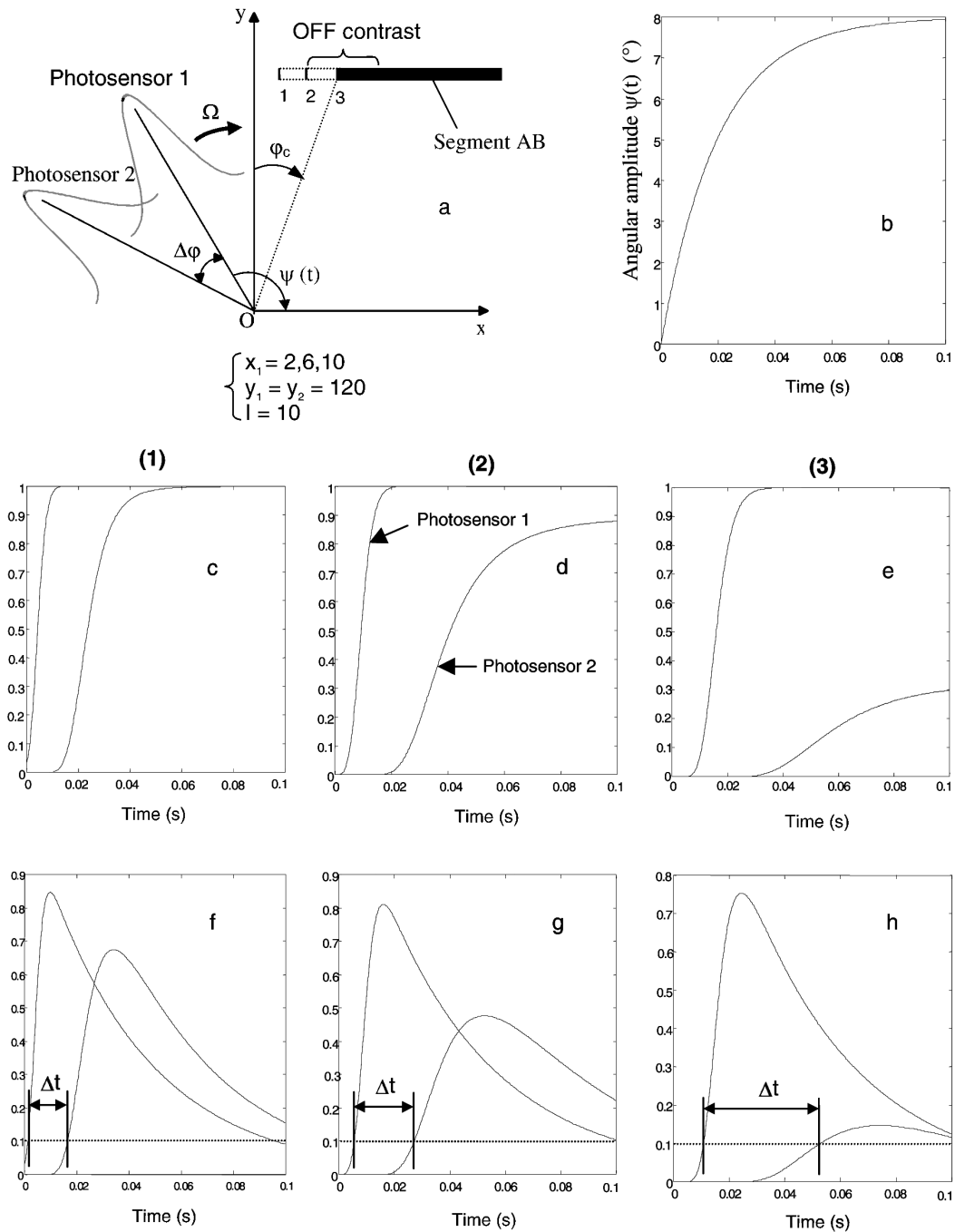


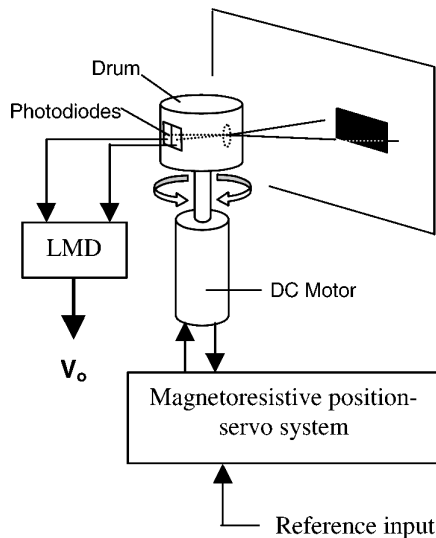
Fig. 2.40: Principe du capteur OSCAR du laboratoire, décrit dans les années 1999-2006.

(a) Rotation conjointe de deux photorécepteurs dont les axes optiques vont rencontrer le bord contrasté (segment AB). (b) Evolution temporelle de l'angle $\Psi(t)$ des axes optiques. Cette loi conduit à un profil de vitesse angulaire en "exponentielle décroissante". Les courbes (c), (d) et (e) obtenues en simulation montrent l'intensité lumineuse mesurée par les photorécepteurs au cours de leur rotation, lorsque le bord contrasté est placé aux positions 1, 2 et 3 (cf encart a). Les courbes (f), (g) et (h) montrent les signaux des photorécepteurs après dérivation. La mesure de flux optique du DEM se fait via la mesure de Δt , illustrée sur ces trois derniers encarts. (Extrait de [Viollet 99b]).

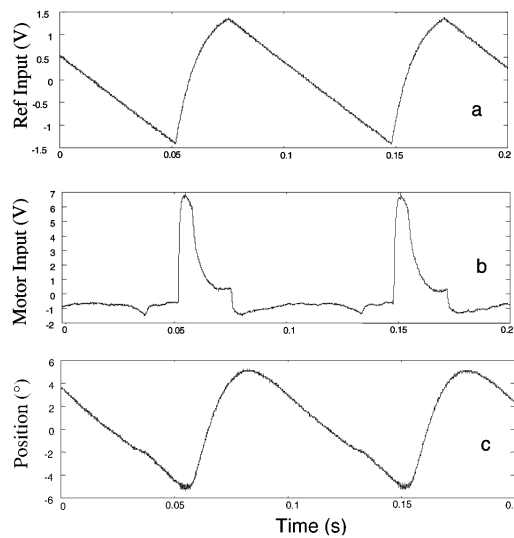
Propriétés et performances du capteur OSCAR, issues de ce principe

L'expérience a montré que ce capteur avec ses deux uniques photorécepteurs, séparés d'un angle $\Delta\varphi$, était capable de localiser un bord contrasté avec une résolution 40 fois plus fine que la résolution statique $\Delta\varphi$ [Viollet 01]. Le capteur OSCAR est donc doté d'une *hyperacuité* [Westheimer 81]. De plus, ce capteur semble insensible aux variations du bord contrasté et de la luminance. Ces performances sont décrites en détail dans [Viollet 01].

La mesure de position effectuée par le capteur OSCAR résulte en fait d'une mesure de *vitesse angulaire* réalisée par un DEM. La vitesse variable du balayage des deux axes optiques permet, en quelque sorte, de "coder en *vitesse angulaire*" les différentes *positions angulaires* du bord contrasté présent dans le champ visuel. La position mesurée est donc directement liée à la vitesse du balayage et la précision de la mesure est étroitement liée à la précision de l'actionneur générant ce balayage.



(a) Mécanisme de balayage électromécanique réalisé avec un micro-moteur DC



(b) Consigne, commande et retour du micro-moteur DC

Fig. 2.41: Dispositif de balayage originel des axes optiques, qui utilisait un moteur DC (99). La figure (a) présente l'ensemble du dispositif optique monté sur l'axe d'un micro-moteur DC. La consigne, la commande et la sortie de la boucle de contrôle du moteur sont présentées en (b). (Extrait de [Viollet 99b]).

Une attention particulière a dû être apportée à la conformité du balayage. Le système de balayage initial [Viollet 99b] utilisait un micro-moteur DC, asservi en position (fig.2.41), et mettant en *rotation* l'ensemble du dispositif optique constitué des deux photorécepteurs et de leur optique (voir fig.2.41), à la manière d'un œil caméculaire. Une avancée importante fut faite en 2005 (voir [Viollet 05, Viollet 06, Viollet 09]). C'est alors le principe d'une *translation de la rétine* (voir fig.2.37) qui fut utilisé, à l'instar de la configuration observée chez la mouche. Dans cette configuration, seuls les deux photorécepteurs, placés à l'extrémité d'une lame piézo-électrique, sont translétés derrière la lentille (voire fig.2.36, 2.37 et 2.42). Les excellentes précision et résolution de l'actionneur piézo-électrique, jointes à la faible inertie des deux photorécepteurs, permettaient d'obtenir une excellente conformité entre la commande et le balayage effectif des deux axes visuels, sans qu'il soit nécessaire d'utiliser un asservissement. Le signal de commande était simplement pré-filtré pour ne pas stimuler les résonances du dispositif.

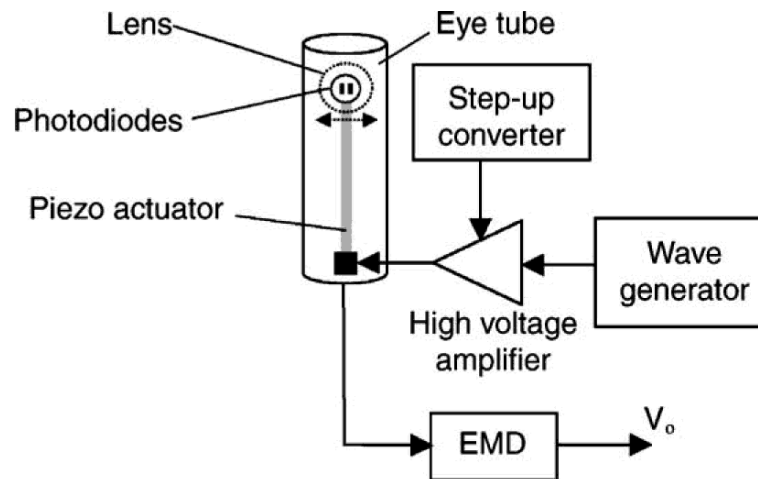


Fig. 2.42: Balayage des axes optiques utilisant une lame piézo-électrique. Sur ce dispositif, seuls les deux photorécepteurs, montés à l'extrémité d'une lame piézo-électrique, sont translétés horizontalement. Cette *micro-translation* (amplitude $1000\mu m$) périodique (10Hz) crée une *rotation conjointe* de leurs axes optiques (voir fig.2.36 p.80). L'actionneur piézo-électrique est contrôlé en boucle ouverte, car la dynamique rapide et la précision statique inhérente à ce type d'actionneur ne nécessitent aucune boucle de contrôle. (Extrait de [Viollet 05]).

Limites du principe de fonctionnement énoncé

Le fonctionnement du capteur OSCAR, tel qu'il a été décrit jusque ici est séduisant par sa simplicité théorique : la position d'un bord contrasté est simplement codée par une vitesse angulaire, qui est mesurée avec un DEM. Ce DEM effectue la mesure lorsque le second photorécepteur rencontre le bord contrasté. La vitesse de rotation du dispositif variant de façon monotone et connue, il est possible d'établir une équivalence (ou bijection) entre la vitesse mesurée par le DEM et la position angulaire du bord contrasté.

Deux observations cependant remettent en cause non pas le capteur lui-même, mais l'explication de son principe de fonctionnement tel qu'il a été compris jusqu'ici. En comprenant mieux le principe de fonctionnement, on peut améliorer la conception du capteur donc mieux appréhender ses possibilités et ses limites.

Première observation : Selon l'explication donnée, le codage de la position du bord contrasté ne peut se faire que si la vitesse de balayage des axes optiques est *variable*. En effet, si la vitesse de balayage est constante, l'explication prédit une mesure constante, indépendante de la position du contraste.

Or, on montre en simulation (fig.2.43) et par l'expérimentation (fig.2.44) qu'une *vitesse de balayage constante* permet bel et bien de localiser avec précision la position angulaire d'un bord contrasté. La vitesse variable du balayage ne serait donc pas un élément indispensable au fonctionnement du capteur OSCAR. Le codage de la position angulaire d'un bord contrasté ne se fait pas par une mesure de vitesse angulaire, malgré l'utilisation d'un circuit DEM. On va montrer que le fonctionnement de celui-ci est en fait dégradé, mais que la mesure réalisée permet tout de même de coder la position du bord contrasté.

Seconde observation : Selon l'explication donnée, il est nécessaire, pour qu'une mesure soit réalisée, que les axes optiques des deux photorécepteurs rencontrent successivement le bord contrasté. Pour qu'il en soit ainsi, l'amplitude (A) du balayage des axes optiques doit être supérieure à l'angle ($\Delta\varphi$) séparant ces deux axes optiques soit :

$$A \geq \Delta\varphi \tag{2.39}$$

Or, on montre en simulation (fig.2.45) et par l'expérimentation (fig.2.46) qu'une *amplitude de balayage inférieure à $\Delta\varphi$* permet bel et bien de localiser avec précision la position angulaire du bord contrasté.

2.4.3 Le capteur OSCAR revisité

Tant les simulations (fig.2.43 et 2.45) que les mesures expérimentales (fig.2.44 et 2.46, très proches des simulations) montrent que la mesure de position réalisée par le dispositif OSCAR ne peut pas résulter d’une mesure de vitesse angulaire classique faite par le DEM. Le principe de fonctionnement du capteur OSCAR est donc revu ici. Le nouveau principe invoqué permet d’expliquer les mesures des figures 2.43 et 2.45.

Principe de fonctionnement (2009)

Le fonctionnement du capteur OSCAR s’explique si l’on prend en compte :

1. *Les phénomènes transitoires* générés au moment du changement de sens du balayage.
2. *le filtre passe-bande* (voir p.42) qui atténue non seulement les fréquences basses (fonction de dérivation) mais aussi les fréquences élevées.

La prise en compte de l’interaction des transitoires avec le filtrage passe-bande permet de jeter une lumière nouvelle sur le fonctionnement du capteur OSCAR. Jusqu’ici, le transitoire accompagnant le changement de sens du balayage n’était pas pris en compte, pas plus que la composante passe-bas du filtre.

Ainsi, la figure 2.40 [Violet 99b] présente les signaux des photorécepteurs (encart c, d et e) ainsi que leurs dérivées respectives (encart f, g et h). On peut voir sur la première colonne (encarts c et f) que la dérivée du 1^{er} photorécepteur est déjà positive à l’instant 0 alors que cette dérivée, due à la fois au filtre dérivateur et au changement de sens du balayage, devrait être négative à l’instant 0.

Pour les trois conditions simulées correspondant à trois positions de contraste différentes, le balayage commence toujours à une position très excentrée : le premier photorécepteur (“photosensor 1”) a toujours un niveau 0 au début de la séquence du balayage. Par ailleurs, cette planche ne présente pas le cas où l’axe optique du 1^{er} photorécepteur est déjà sur le bord contrasté au moment où se produit le changement de sens du balayage. Cette configuration permet pourtant de réaliser une mesure correcte.

La figure 2.47 (p.94) présente une planche de simulations avec, sur la première ligne (a-e), la position angulaire moyenne Ψ_m des axes optiques se translatant de -3° à $+3^\circ$ à vitesse constante ($120^\circ/s$) entre les instants $25ms$ et $75ms$. La seconde ligne (f-j) présente la sortie brute des photorécepteurs. La dernière ligne (k-o) présente les signaux des photodiodes filtrés par le filtre passe-bande (voir p.40 et p.42).

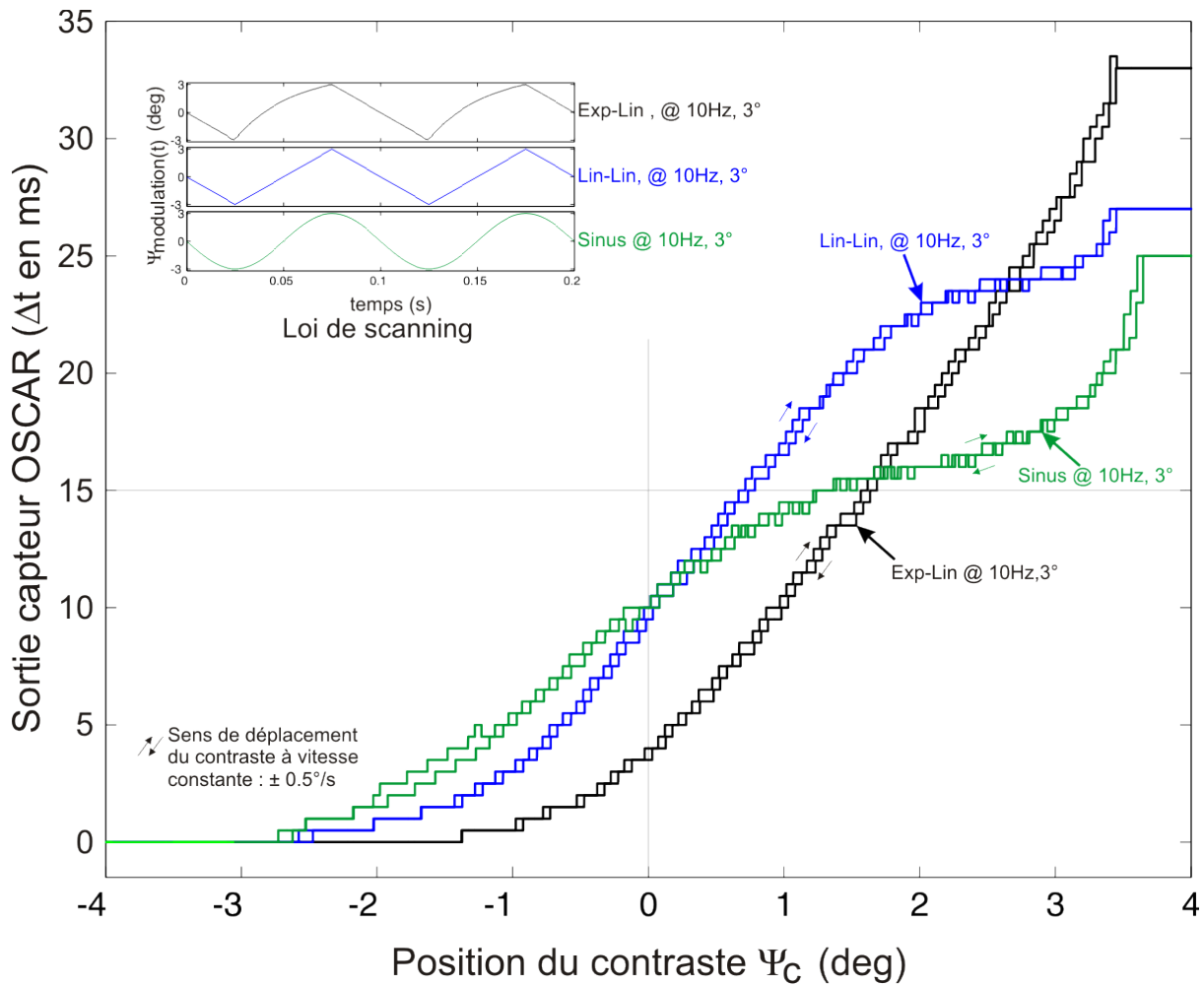


Fig. 2.43: Caractéristiques statiques *théoriques* du capteur OSCAR avec des lois de balayage *exponentielle, linéaire* ou *sinusoïdale*. La simulation de trois capteurs OSCAR est réalisée sous simulink. Le bord contrasté est ici déplacé à vitesse constante (très lente : $0.5^\circ/s$) dans un sens puis l'autre, dans le champ visuel du capteur et l'on trace les trois caractéristiques statiques. Les trois capteurs sont identiques, excepté pour le mouvement conjoint de leurs deux axes optiques, auquel on impose les trois lois de balayage évoquées. Chaque capteur a sa propre loi de balayage présentée sur l'encart en haut et à gauche. La caractéristique noire correspond au balayage composé d'une phase exponentielle et d'une phase linéaire (identique au capteur OSCAR originel). La caractéristique bleue correspond à un balayage triangulaire (deux phases linéaires) et la caractéristique verte correspond à un balayage sinusoïdal. Les trois lois de balayage utilisées permettent toutes de localiser le bord contrasté dans un champ de vision de l'ordre de 4.5° (de -1° à 3.5°). Le pendant expérimental de cette simulation est présenté sur la figure 2.44 p.91. Paramètres optiques adoptés dans ces simulations : $\Delta\rho = 2.6^\circ$; $\Delta\varphi = 2.87^\circ$.

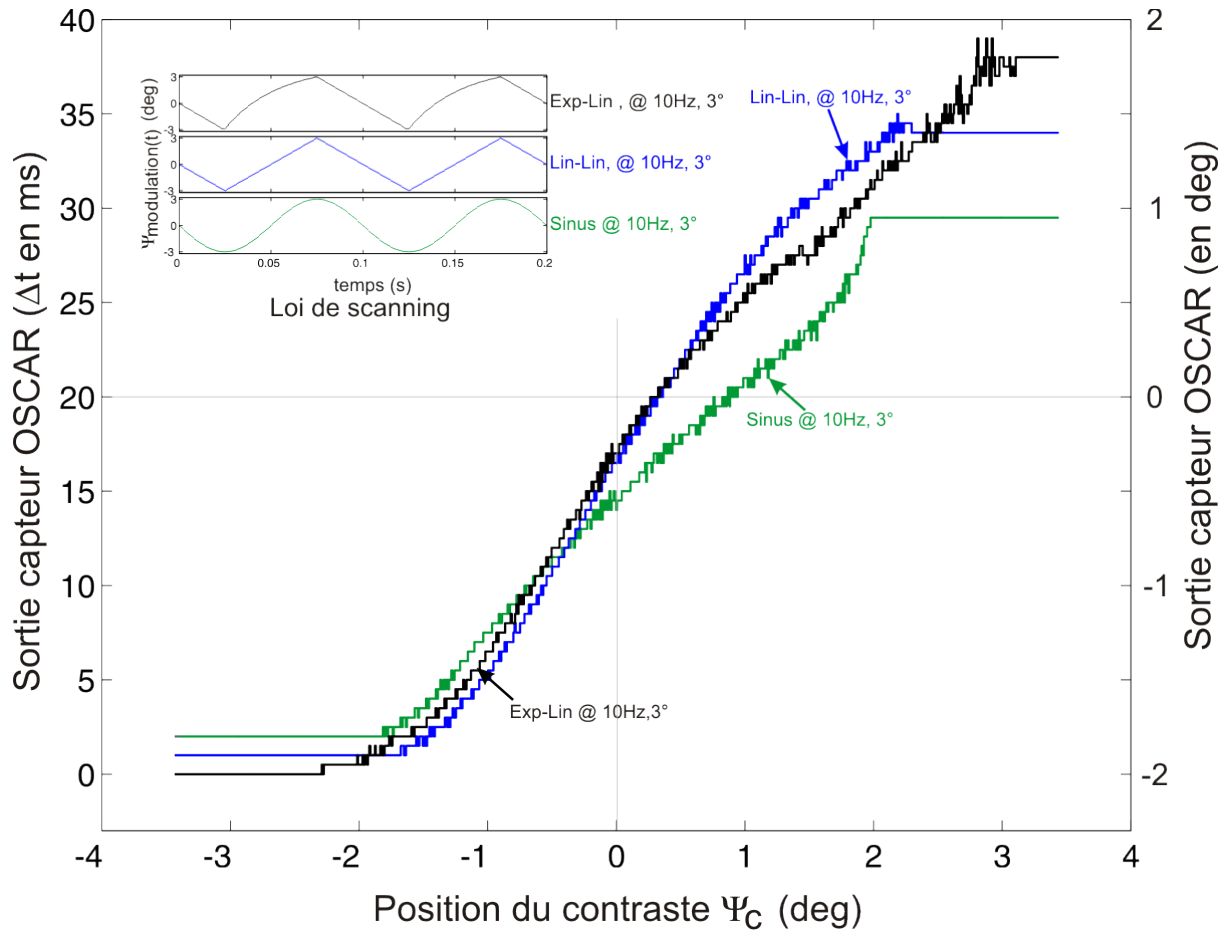


Fig. 2.44: Caractéristiques statiques *expérimentales* du capteur OSCAR avec des lois de balayage exponentielle, linéaire ou sinusoïdale. Trois enregistrements sont successivement réalisés. Pour chacun d’eux, un bord contrasté est déplacé très lentement à vitesse constante devant le capteur durant les mesures. Ces capteurs sont identiques, excepté pour le mouvement conjoint de leurs deux axes optiques qui suit l’une des trois lois de balayage. La caractéristique noire correspond au balayage composé d’une phase exponentielle et d’une phase linéaire (identique au capteur OSCAR originel). La caractéristique bleue correspond à un balayage en triangle (deux phases linéaires) et la caractéristique verte correspond à un balayage sinusoïdal. On voit que les trois lois de balayage utilisées permettent bien de localiser le bord contrasté. Le pendant théorique de ces courbes expérimentales est présenté sur la figure 2.43. Paramètres optiques identifiés sur le dispositif : $\Delta\rho = 3^\circ$; $\Delta\varphi = 2.87^\circ$.

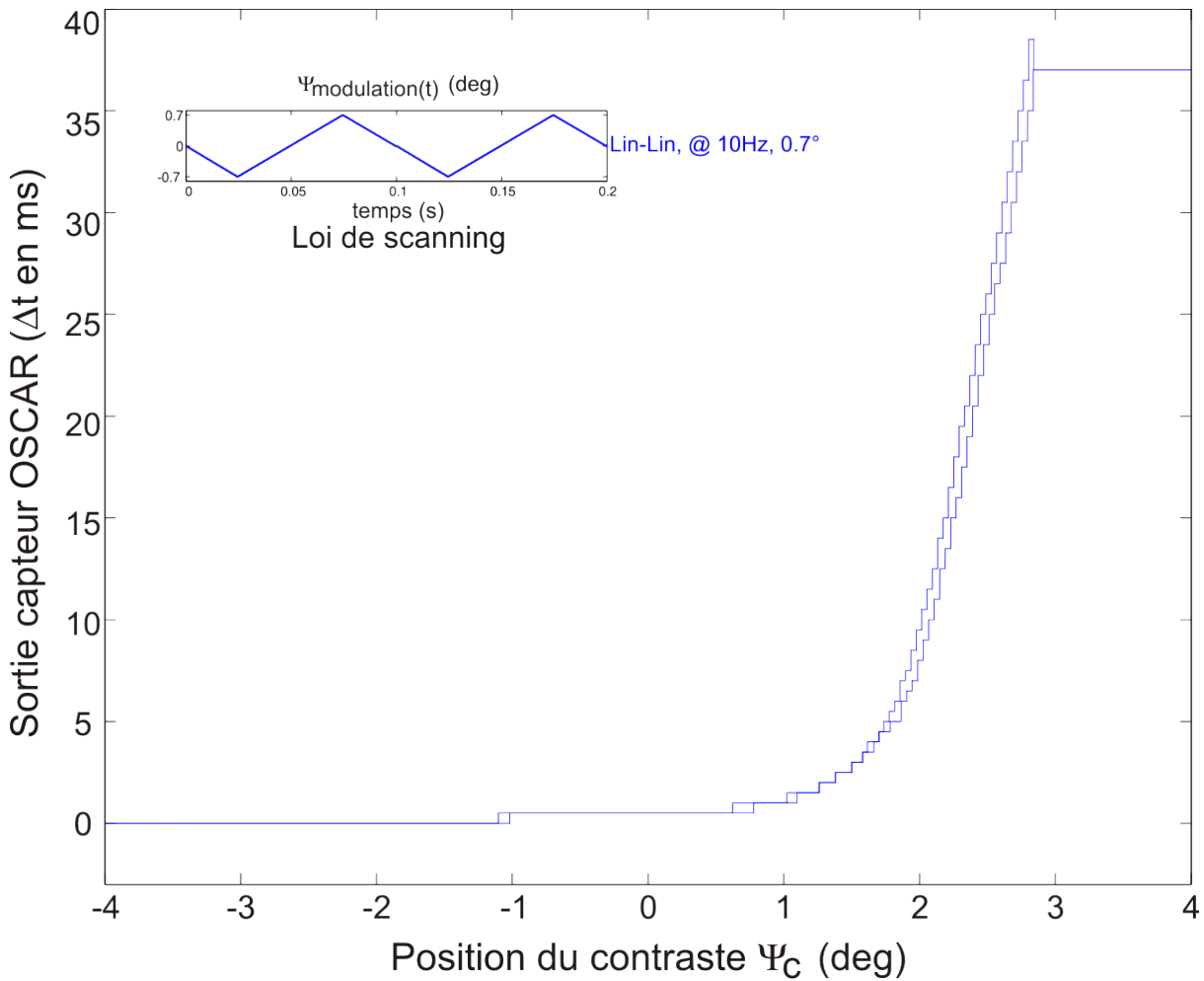


Fig. 2.45: Caractéristiques statiques *simulées* du capteur **OSCAR** avec une loi de balayage triangulaire (linéaire) d'amplitude réduite : $A = \frac{\Delta\varphi}{2}$. La simulation du capteur **OSCAR** est réalisée sous Simulink. Le déplacement d'un bord contrasté se déplaçant à vitesse lente constante (dans un sens puis l'autre à $0.5^\circ/s$) devant le capteur permet de tracer sa caractéristique statique. La loi de balayage utilisée est présentée dans l'encart en haut et à gauche. Cette loi de balayage, qui comprend deux phases linéaires (balayage à vitesse constante), permet bien de localiser le bord contrasté, pourvu toutefois que celui-ci soit placé dans un champ visuel réduit à environ 1.5° (de 1.5° à 3°). Le principe du capteur, tel qu'il était décrit jusqu'ici, ne permettait pas d'expliquer cette mesure, car le balayage est ici d'amplitude inférieure à $\Delta\varphi$ et la vitesse de balayage n'est pas variable. Le pendant *expérimental* de cette caractéristique statique est présenté sur la figure 2.46. Paramètres optiques de la simulation : $\Delta\rho = 3^\circ$; $\Delta\varphi = 2.87^\circ$.

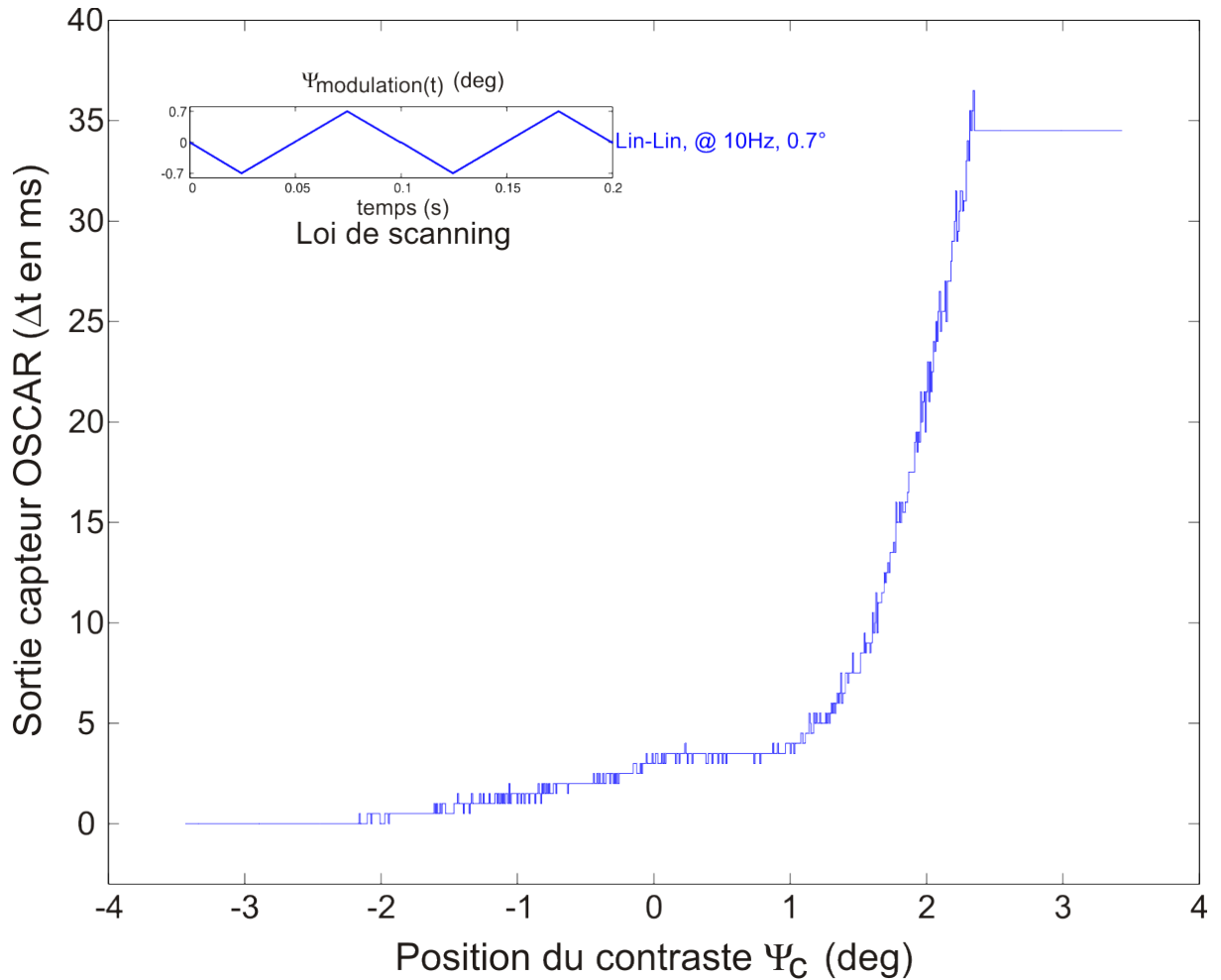


Fig. 2.46: Caractéristiques statiques *expérimentales* du capteur OSCAR avec une loi de balayage linéaire d'amplitude réduite : $A = \frac{\Delta\varphi}{2}$. Un bord contrasté se déplace à vitesse lente constante devant le capteur OSCAR, dont on enregistre la sortie. La loi de balayage utilisée est présentée dans l'encart situé en haut et à gauche. Cette loi de balayage comprend deux phases linéaires (balayage à vitesse constante, dans un sens puis dans l'autre). On voit que cette loi de balayage permet bien de localiser le bord contrasté, pourvu toutefois que celui-ci soit placé dans un champ visuel réduit à environ 1.5° (de 1° à 2.5°). Le pendant simulé de cette caractéristique est présenté sur la figure 2.45. Paramètres optiques : $\Delta\rho = 3^\circ$; $\Delta\varphi = 2.87^\circ$; $A = \frac{\Delta\varphi}{2}$.

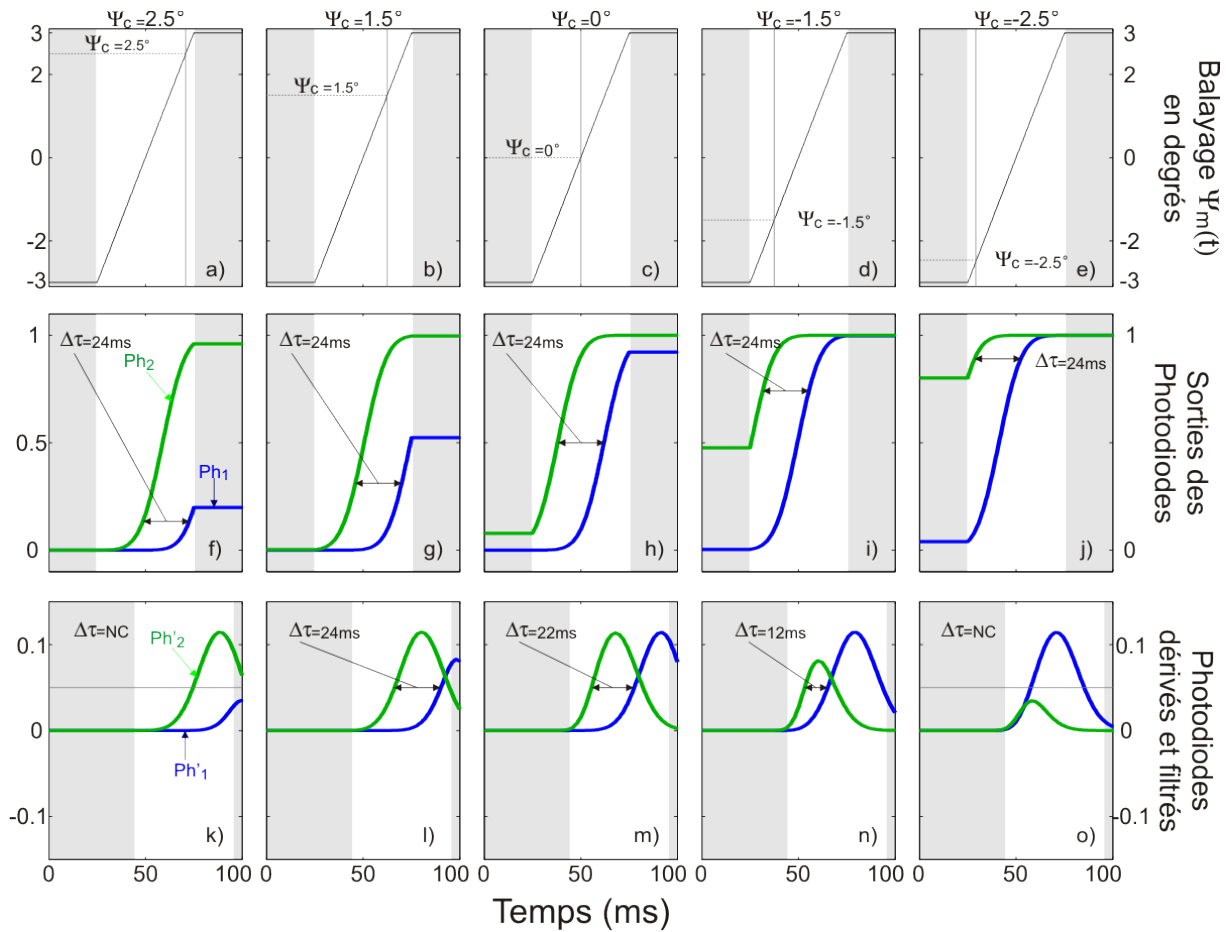


Fig. 2.47: Planche de signaux *simulés* Ph et Ph' du capteur OSCAR lors d'un brusque déplacement (de -3° à $+3^\circ$) de ses deux axes optiques. (a,b,c,d,e) : en ordonnées, $\Psi_m(t)$ indique le déplacement linéaire rapide de la bissectrice des axes optiques (fig.2.36 p.80) devant un bord contrasté placé à diverses positions angulaires Ψ_c . Dans les deux zones grisées, les axes optiques sont immobiles. La ligne verticale fine marque l'instant où la bissectrice des axes optiques (Ψ_m) rencontre le bord contrasté (à la position Ψ_c). (f,g,h,i,j) présentent la sortie des deux photorécepteurs (Ph_1 et Ph_2). L'écart temporel entre Ph_1 et Ph_2 est indépendant de la position Ψ_c du bord contrasté. (k,l,m,n,o) présentent les signaux de (f,g,h,i,j) filtrés par le filtre passe-bande (dérivateur analogique, voir p.40 et passe-bas numérique, voir p.42). La mesure Δt (réalisée ici avec un seuil constant de 0.05) est bien fonction de la position du contraste Ψ_c dans le champ visuel, et ce bien que le balayage ait lieu à vitesse constante. Paramètres optiques simulés : $\Delta\rho = 2.6^\circ$; $\Delta\varphi = 2.87^\circ$; $A = 6^\circ$.

Le fond grisé des encarts correspond aux instants, préalables et postérieurs au balayage, où les axes optiques sont fixes. Ce fond grisé est décalé temporellement de $20ms$ sur les encarts (k-o) par suite du retard pur de $20ms$ introduit par le filtre numérique (voir p.42). Le balayage, qui commence brusquement à l'instant $25ms$, permet d'observer les phénomènes transitoires. L'écart temporel séparant les sorties brutes des deux photodiodes est de $24ms$, correspondant à l'écart $\Delta\varphi = 2.87^\circ$ entre les deux photodiodes divisé par la vitesse de balayage ($\Psi'(t) = 120^\circ/s$). On voit que cet écart est constant et indépendant de la position du contraste. *Par contre, on constate que l'écart temporel entre les signaux dérivés des deux photodiodes varie* (fig.2.47). La valeur de cet écart Δt permet donc de retrouver la position du contraste : Δt varie en effet de manière monotone avec la position du contraste Ψ_c dans son champ visuel (voir fig.2.43).

Le signal Ph'_1 ne se décale pas temporellement par rapport à Ph_1 . Sur les encarts (f à i), le signal Ph_1 augmente graduellement en suivant la même forme coudée due à l'entrée progressive du bord contrasté dans son champ visuel. Les encarts (k à n) montre que la dérivée Ph'_1 présente le même retard de $20ms$ vis-à-vis du signal Ph_1 .

Le signal Ph'_2 se décale dans le temps par rapport à Ph'_1 . Sur les encarts (f à i), le signal Ph_2 augmente avec un point anguleux et une pente plus ou moins abrupte suivant la position du contraste Ψ_c . Sur les courbes (l), les deux signaux Ph'_1 et Ph'_2 présentent le même écart $\Delta t = 24ms$ que Ph_1 et Ph_2 (courbes g). Sur les courbes (n) par contre, cet écart se réduit à $\Delta t = 12ms$.

Deux phénomènes entrent en jeu pour expliquer ce décalage :

1. Sur les courbes (g à j), le signal Ph_2 augmente dès que le balayage est activé (zone blanche à partir de l'instant $25ms$) car le bord contrasté est déjà visible par cette photodiode lorsque le balayage commence. La dérivée de ce signal (Ph'_2 sur les courbes l à o) agit donc comme un "trigger" qui est fixe dans le temps (à environ $0.25ms$) et indépendant de la position du bord contrasté (Ψ_c). Le signal dérivé Ph'_1 , par contre, dépend de la position du bord contrasté, et par conséquent l'écart temporel entre Ph'_2 et Ph'_1 varie en fonction de la position du bord contrasté.
2. Cet écart est renforcé par un second phénomène : la dérivée théorique parfaite du signal Ph_2 de l'encart i) est discontinue à l'instant $50ms$. Cette dérivée théorique est filtrée passe-bas par le filtre pseudo-dérivateur utilisé. De fait, la discontinuité qui est composée de fréquences élevées est donc filtrée passe-bas et crée un signal

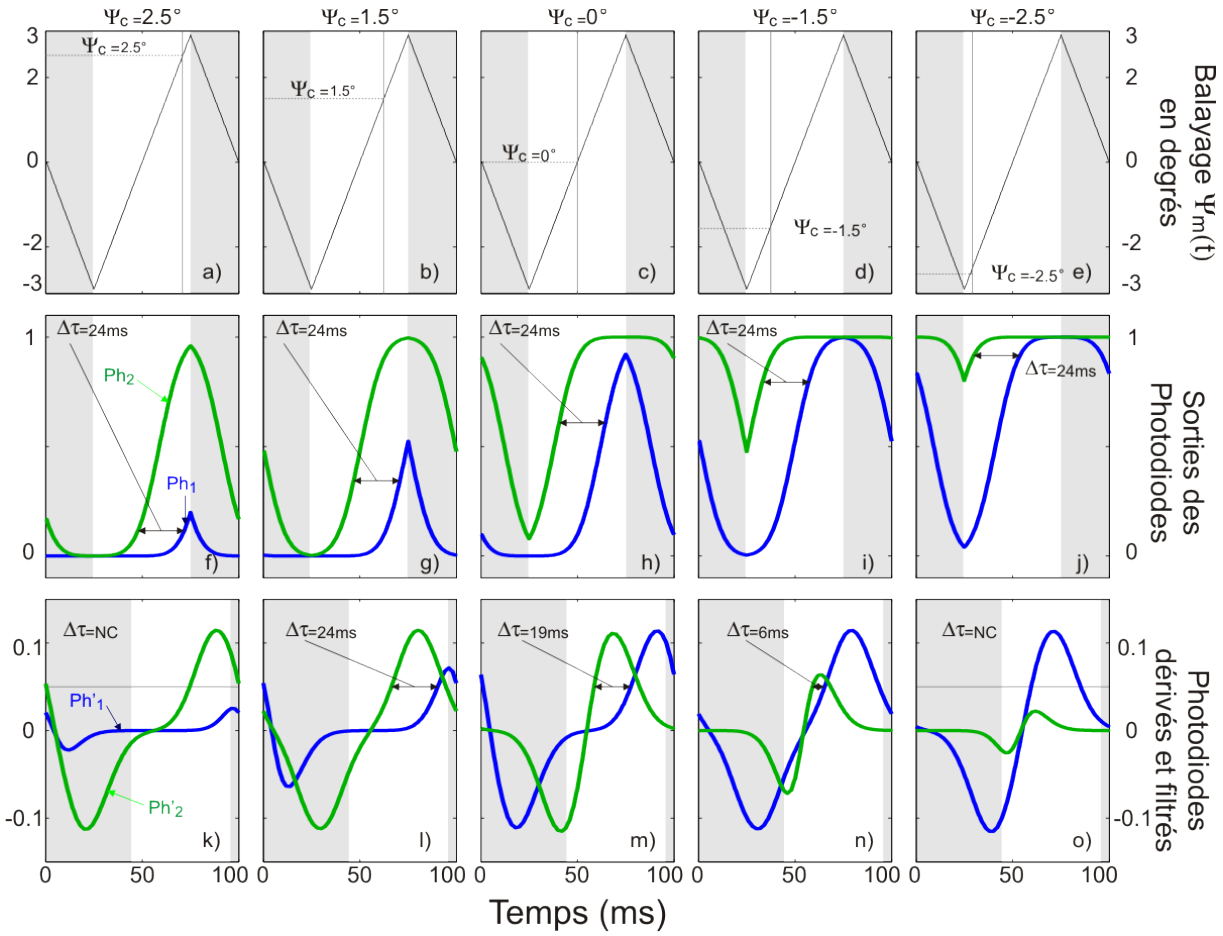


Fig. 2.48: Planche de signaux *simulés* Ph et Ph' du capteur OSCAR lors d'un balayage triangulaire (à vitesse constante), pour différentes positions d'un bord contrasté placé dans le champ visuel du capteur. La planche est identique à celle présentée sur la figure 2.43, sauf que le balayage qui est ici périodique. Les axes optiques se traduisent à vitesse constante dans des aller-retour successifs. Les zones grises et blanches identifient les deux phases de balayage. La plage de mesure Δt , qui code la position du contraste Ψ_c , est ici plus grande que sur la planche 2.43. Les signaux simulés sont assez similaires aux signaux réels enregistrés et présentés sur la figure 2.49. Paramètres optiques de la simulation : $\Delta\rho = 2.6^\circ$; $\Delta\varphi = 2.87^\circ$; $A = 3^\circ$.

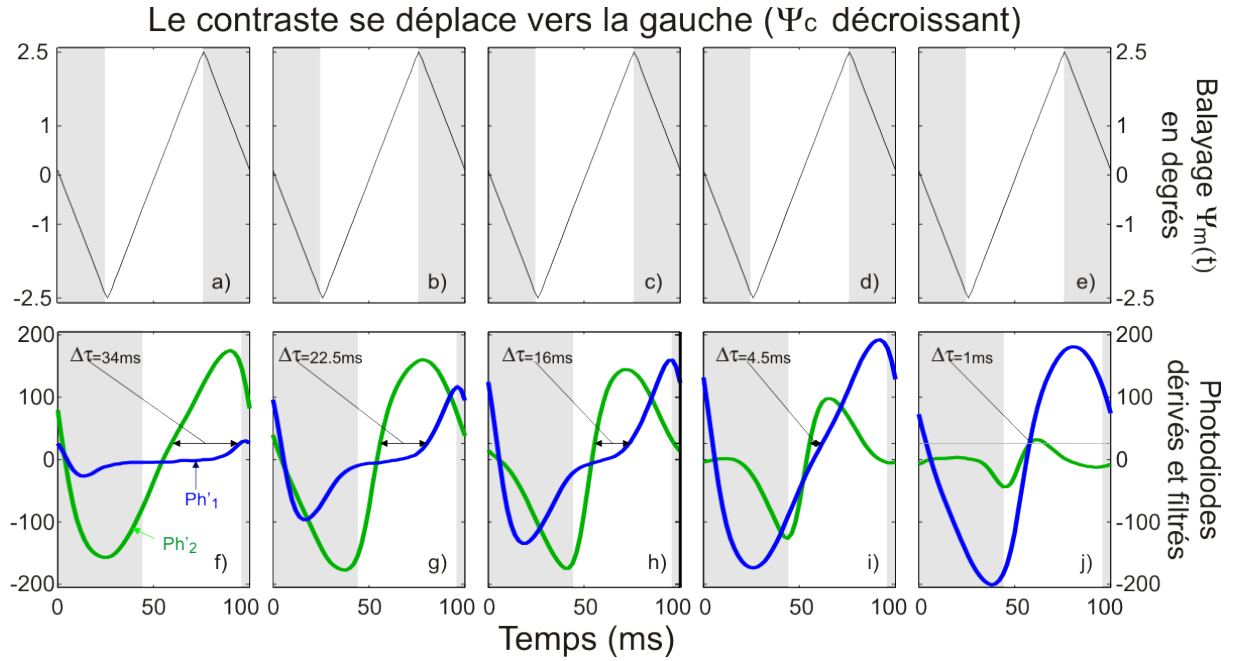


Fig. 2.49: Planche de signaux Ph' réels mesurés sur le capteur OSCAR lors d'un balayage alternatif à vitesse constante, pour différentes positions d'un bord contrasté placé devant le dispositif. Cette planche est le pendant de la planche de signaux simulés présentée sur la figure 2.48. La 1^{ère} ligne (a,b,c,d,e) montre l'évolution temporel de l'axe optique moyen (bissectrice) du capteur. La 2^{ème} ligne (f,g,h,i,j) présente les signaux des photodiodes dérivés par le filtre analogique passe-bande (voire p.40) et par le filtre numérique (voire p.42). Cette planche montre que la mesure de Δt dépend de la position du contraste Ψ_c , malgré le balayage à vitesse constante. On constate une bonne correspondance avec les signaux simulés présentés sur la figure 2.48. Paramètres optiques : $\Delta\rho = 3^\circ$; $\Delta\varphi = 2.87^\circ$.

Ph'_2 qui semble de ce fait retardé. En réalité, ce signal Ph'_2 est une version *déformée* de la dérivée de Ph_2 .

La simulation de la figure 2.47 est incomplète. Sur cette simulation, on ne considère en effet que la phase “aller” du balayage, en prenant en compte les effets de transitoires. La même simulation présentée sur la figure 2.48 présente une planche identique, avec le même traitement, mais avec un balayage en triangle (une phase “aller” et une phase “retour” à vitesse constante, mais de sens opposé). Le second phénomène impliquant le filtrage passe-bande joue ici un rôle encore plus important que sur la planche précédente. On constate que les écarts Δt varient maintenant de $24ms$ à $6ms$ (contre une variation de $24ms$ à $12ms$ sans prise en compte de la phase “retour” du balayage). La résolution de la mesure en est donc améliorée d’autant.

Les signaux Ph'_1 et Ph'_2 de la planche 2.49 sont qualitativement très semblables aux signaux simulés Ph'_1 et Ph'_2 présentés sur la planche 2.48.

La figure 2.50 montre que même en présence d’un Contrôle Automatique de Gain (CAG), on peut voir la mesure de Δt varier. On note cependant que cette variation n’est pas monotone sur toute la plage de mesure de Ψ_c (voir encarts k, l et m).

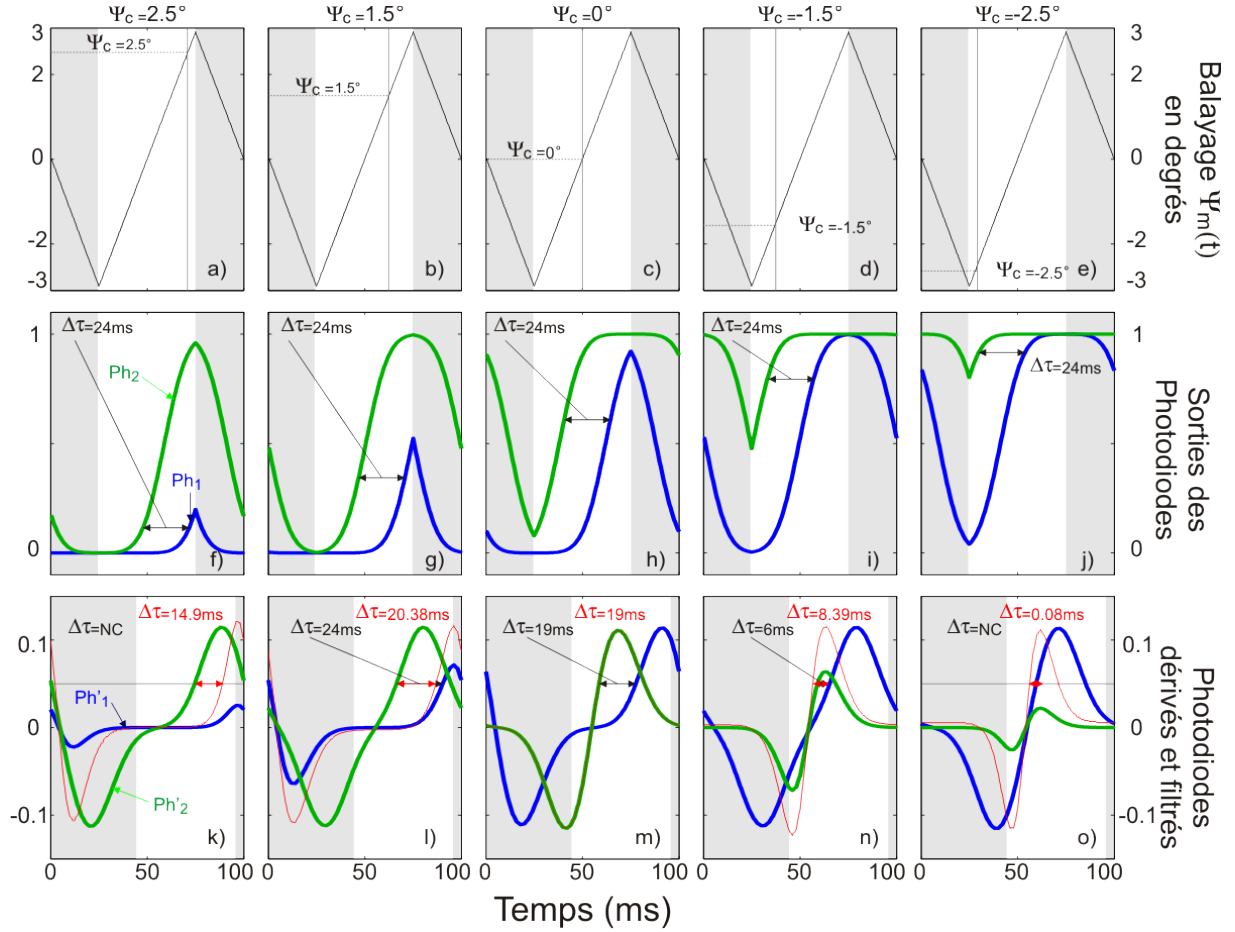


Fig. 2.50: Planche de signaux **simulés** Ph et Ph' du capteur OSCAR lors d'un balayage à vitesse constante, pour différentes positions d'un bord contrasté placé devant le dispositif équipé ici d'un CAG. La planche est identique à la figure 2.48 mais l'amplitude des signaux à été modifiée de façon à simuler un CAG. Les courbes rouges sur les encarts k) et l) sont une version étirée du signal Ph'_1 (en bleu) et les courbes rouges en n) et o) donnent une version étirée du signal Ph'_2 (en vert). On peut constater que la variation de Δt à lieu même avec l'utilisation d'un CAG sur chaque voie, comme dans [Viollet 01]. Paramètres optiques de la simulation : $\Delta\rho = 2.6^\circ$; $\Delta\varphi = 2.87^\circ$; $A = 6^\circ$.

Conséquences

Le capteur **OSCAR** est construit à l'aide d'un **DEM**. Ce **DEM** est utilisé ici dans des conditions très éloignées de son mode de fonctionnement normal et ne mesure pas, à proprement parler, un flux optique (vitesse de déplacement angulaire). La mesure réalisée lorsque les axes optiques balayent l'environnement permet cependant de localiser avec une grande précision la *position* angulaire d'un bord contrasté.

Conséquence sur la loi de balayage. Nous avons montré ici que le capteur **OSCAR** peut être utilisé avec un balayage quelconque. Ce balayage doit simplement être périodique. Le capteur a ainsi pu être testé avec deux nouvelles lois de balayage (voir fig.2.43) :

- une loi sinusoïdale
- une loi en triangle

Par ailleurs, l'amplitude du balayage peut être inférieure à $\Delta\varphi$ (voir fig.2.45 p.92).

Conséquence sur l'actionneur. Le capteur n'est pas aussi sensible qu'on le pensait à la conformité de la loi de balayage. La bande passante de l'actionneur est de moindre importance. Cependant, le capteur fonctionne d'autant mieux que le changement de sens du balayage est marqué par un saut de vitesse important. Ainsi, le balayage à deux phases linéaire sur la figure 2.43 donne un résultat meilleur que le balayage sinusoïdal, du fait du saut de vitesse important associé au balayage en triangle.

Conséquence sur la mesure. Le temps de montée du filtre pseudo-dérivateur influe sur le Δt mesuré. Le seuil utilisé pour la mesure de Δt est fixe. Aussi, l'amplitude du signal a une influence sur la mesure Δt . Le capteur **OSCAR** est donc légèrement influencé par la luminance ambiante ou par le type de contraste. Le signal étant périodique, il est cependant facile de réaliser un **CAG** permettant de normaliser le signal et de rendre ainsi la mesure de Δt indépendante à la fois de la luminance et du contraste. Le **CAG** utilisé dans le capteur **OSCAR** originel lui conférait cette robustesse par rapport à la luminance et au type de contraste.

Retour sur la biologie. L'enregistrement du muscle MOT présenté sur la figure 2.39 (p.83) et le profil de déplacement de la rétine reconstruit montre que les axes optiques de la mouche en vol se translatent d'une amplitude comprise entre $0.5\Delta\varphi$ et $1\Delta\varphi$ [Franceschini 97]. Cette faible amplitude de déplacement est compatible avec le principe de fonctionnement revu du capteur **OSCAR**. On note toutefois que le balayage en triangle

linéaires d'amplitude $A = 0.5\Delta\varphi$ (fig.2.46 p.93) réduit le champ visuel utile à une fraction seulement de l'angle inter-récepteur $\Delta\varphi$. La figure 2.39 montre aussi que le déplacement des axes optiques se fait à vitesse constante. Ce déplacement à vitesse constante est aussi compatible avec le principe revu du capteur. La figure 2.46 présente des mesures réalisées avec un dispositif optique inspiré de la mouche, et avec une loi de balayage proche de celle observée chez la mouche. On vient de montrer que le traitement réalisé dans un capteur de flux optique DEM permet de mesurer avec précision la *position angulaire* d'un bord contrasté. Il est possible que la mouche utilise ses DEMs, couplés à la translation de sa rétine, pour accroître la faible résolution de son œil à facettes. Cela permettrait d'expliquer les performances des Diptères dans des tâches d'interception précises, telles que la poursuite de congénères à grande vitesse ou encore le vol stationnaire près d'un tronc d'arbre [Franceschini 04a].

Le balayage des axes optiques du capteur OSCAR est de relativement grande amplitude et de faible fréquence. La faible fréquence du balayage confère au capteur un retard de mesure important. Augmenter la fréquence du balayage rend difficile la mesure de Δt , qui devient alors très petit. Une amplitude importante du balayage est mécaniquement contraignante à réaliser. La précision du capteur OSCAR dépend de la conformité du balayage, même si celui-ci peut être de forme quelconque.

La figure 2.39 (p.83) montre que la rétine est probablement animée de microvibrations de même fréquence que les potentiels d'actions actionnant le muscle (entre $50Hz$ et $120Hz$).

Dans la section suivante, nous décrivons le capteur Vibrating Optical Device for the Kontrol of Autonomous-robots (VODKA) que nous avons mis au point. Nous allons voir que VODKA est un capteur de position angulaire *encore plus précis*, capable d'utiliser des vibrations d'amplitude *encore plus faible* et de fréquence plus élevées, avec une absence totale de contrainte sur la loi de balayage, qui peut même devenir *apériodique et aléatoire*.

2.5 VODKA, un nouveau capteur de position angulaire doté d'hyperacuité

Le capteur optique **VODKA** est capable de localiser avec une extrême précision, sous éclairage ambiant, la position d'un bord contrasté (ou d'une barre) placé dans son champ visuel. Cette mesure de position est basée sur la modulation d'amplitude des signaux issus de deux photorécepteurs dont les axes optiques vibrent de concert de quelques dixièmes de degrés. Une simple vibration propre (aléatoire) de la plateforme (par exemple un robot aérien) sur laquelle est monté le dispositif suffit à créer cette vibration fonctionnelle conjointe des 2 axes optiques. En l'absence de vibration naturelle, une vibration artificielle peut être générée selon une loi quelconque.

2.5.1 Description du capteur

Deux axes optiques animés d'une vibration conjointe

Le capteur **VODKA** est encore constitué de deux photorécepteurs placés derrière une même lentille (fig.2.51). La vibration conjointe (synchrone) de leurs axes optiques peut être obtenue :

- soit par la vibration propre (aléatoire) de la plateforme sur laquelle est monté le dispositif (un robot terrestre ou aérien),
- soit par l'ajout d'un actionneur dédié (voir dispositif fig.2.52). Dans ce cas, la vibration des axes optiques peut être obtenue :
 1. soit par une *translation* de la rétine derrière une lentille fixe,
 2. soit par *translation* de la lentille placée devant une rétine fixe,
 3. soit par une *rotation* du dispositif complet (rétine + lentille).

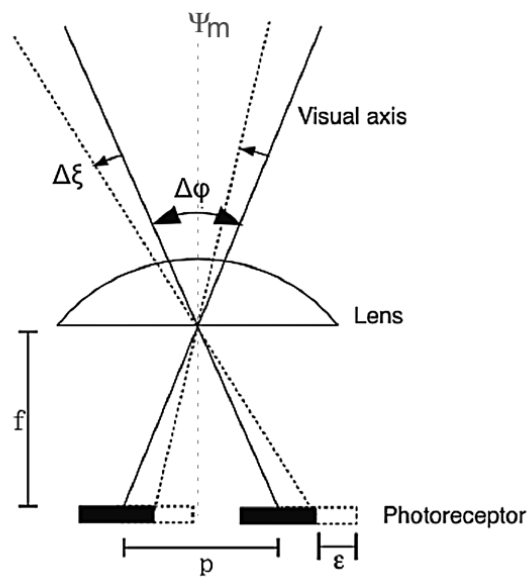


Fig. 2.51: Les deux photorécepteurs sont placés derrière une lentille fixe et leurs axes optiques sont tracés. On voit qu'une translation d'amplitude ϵ des photorécepteurs dans le plan perpendiculaire à l'axe optique de la lentille fait pivoter les deux axes optiques d'un angle $\Delta\xi$. Une translation périodique des photorécepteurs permet de faire "vibrer" les axes optiques. (Adapté de [Franceschini 04b]).

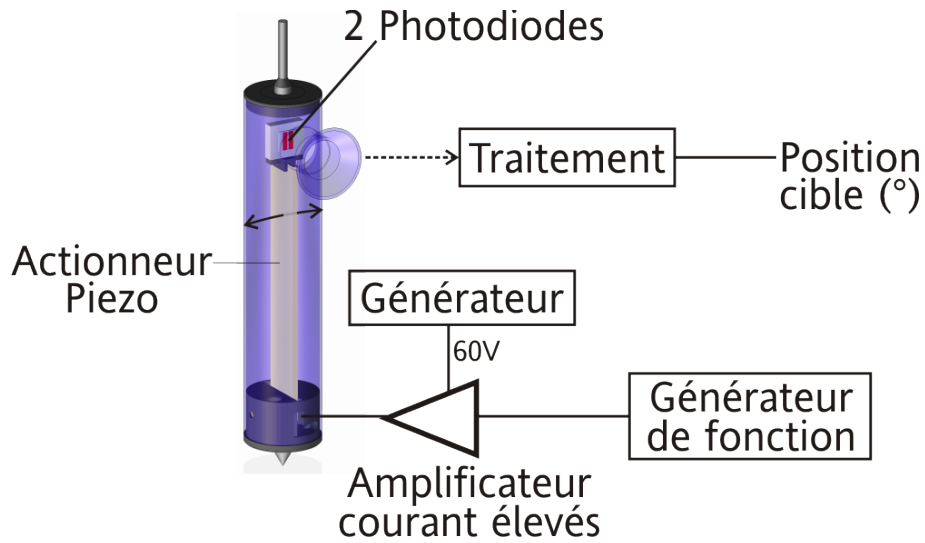


Fig. 2.52: Mécanique et optique du capteur équipé d'un actionneur dédié. Les 2 photodiodes, placées derrière la lentille, sont montées à l'extrémité libre de l'actionneur piézo-électrique. Cet actionneur permet de translater les deux photodiodes dans un plan vertical, perpendiculaire à l'axe optique de la lentille. Ce mouvement de translation est commandé par un générateur de fonction. Un traitement spécifique des signaux $Ph_1(t)$ et $Ph_2(t)$ issus des deux photodiodes va permettre de déterminer la *position angulaire* d'une cible contrastée de manière ultra précise.

Sensibilité gaussienne des photorécepteurs

On se retrouve ici dans une situation semblable à celle décrite au chap 2.4. Rappelons que l'optique placée devant les deux photorécepteurs (en l'occurrence deux photodiodes) leur confère une fonction de sensibilité directionnelle gaussienne. Les sensibilités directionnelles des deux photorécepteurs se recouvrent dans leur partie centrale. Rappelons que cette caractéristique gaussienne est obtenue ici par une légère *défocalisation* (voir p.25). La figure 2.53 définit les caractéristiques optiques essentielles du dispositif.

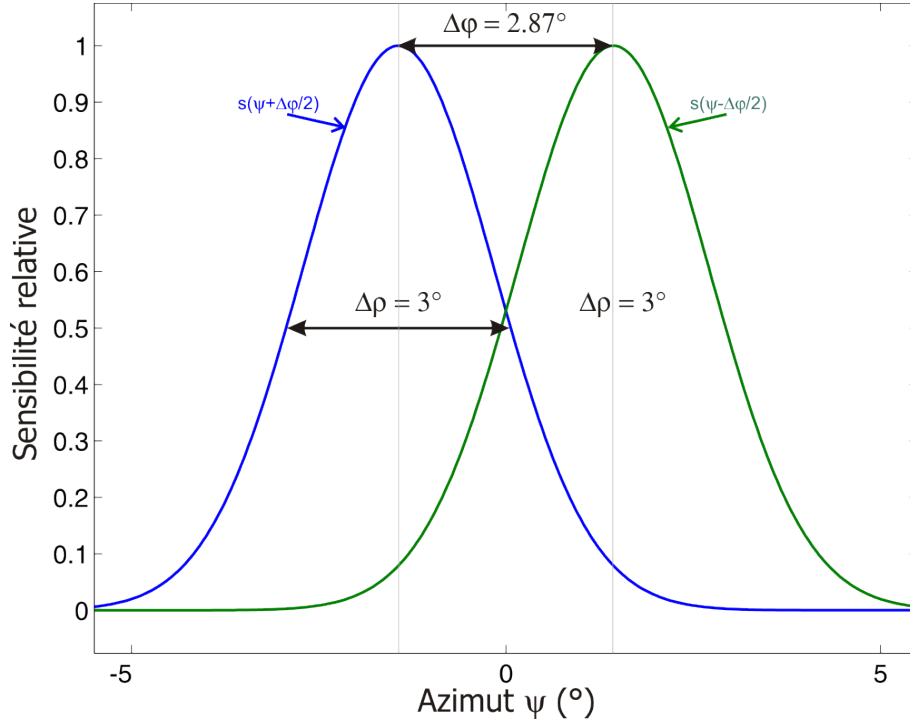


Fig. 2.53: Courbes de sensibilité directionnelle $s(\Psi_1)$ et $s(\Psi_2)$ des deux photorécepteurs. L'angle inter-récepteur est $\Delta\phi = 2.87^\circ$ et l'angle d'acceptance est $\Delta\rho = 3^\circ$.

La sensibilité directionnelle en fonction de l'angle azimuthal Ψ entre une source lumineuse ponctuelle et l'axe du photorécepteur est notée $s(\Psi)$:

$$s(\Psi) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2} * \pi} e^{-\frac{\Psi^2}{2\sigma^2}} \tag{2.40}$$

Le paramètre $\Delta\rho$ est la largeur à mi-hauteur ("*Full Width at Half Maximum* ($\Delta\rho$) (*FWHM*)") de cette fonction. On convient de l'appeler "angle d'acceptance". $\Delta\rho$ se déduit directement de la variance σ^2 de la gaussienne par la relation :

$$\Delta\rho = \sigma * 2\sqrt{2 \ln 2} \tag{2.41}$$

2.5.2 Choix de l'expression du capteur S_{VODKA}

Le choix de l'expression du capteur S_{VODKA} découle des propriétés de l'optique (notamment de la courbe de sensibilité directionnelle $s(\Psi)$), et de la micro-vibration qui génère un signal que l'on qualifie de "dynamique", par opposition aux signaux "statiques" qui seraient obtenus sans cette micro-vibration.

On étudie ci-dessous les propriétés de cette partie dynamique des signaux. La *dérivée* des signaux des photorécepteurs permet de ne conserver que la partie dynamique des signaux des photorécepteurs.

Propriétés des signaux visuels dynamiques (générés par la micro-vibration)

Lorsqu'on déplace le contraste dans le champ visuel (étroit) du capteur $VODKA$, sa position $\Psi_c(t)$ varie lentement dans le temps, comparée à la modulation $\Psi_{mod}(t)$ (eq 2.44). On peut approximer $\Psi_c(t)$ par une constante, qui reflète la position du contraste à un instant donné.

La moyenne temporelle de la modulation $\Psi_{mod}(t)$ est nulle. La position $\Psi(t)$ se simplifie en $\Psi_c(t)$. La dérivée $\Psi'(t)$ dépend majoritairement de la modulation $\Psi_{mod}(t)$, dont la fréquence est élevée vis-à-vis de $\Psi_c(t)$, supposé constant.

En décomposant la position du contraste (eq 2.44) avec $\Psi_c(t)$ et $\Psi_{mod}(t)$, l'expression des signaux des photodiodes *dérivés* (eq 2.46) peut s'approximer ainsi :

$$\begin{aligned} Ph'_1(\Psi(t)) &= k * \frac{\Psi'_{mod}(t)}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(\Psi_c(t) - \frac{\Delta\varphi}{2})^2}{2\sigma^2}} \\ Ph'_2(\Psi(t)) &= k * \frac{\Psi'_{mod}(t)}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(\Psi_c(t) + \frac{\Delta\varphi}{2})^2}{2\sigma^2}} \end{aligned} \quad (2.42)$$

Avec cette approximation (eq 2.42), l'amplitude des signaux $Ph'_1(t)$ et $Ph'_2(t)$ (distinctes) dépend de trois paramètres. Pour chacun des deux signaux en effet,

1. **L'amplitude est fonction de la position relative $\Psi_c(t)$ du contraste dans le champ visuel** Lorsque l'axe optique d'un photorécepteur est orienté dans la direction du contraste, l'amplitude du signal est maximale. Cette amplitude décroît en $e^{-\frac{\psi_c}{2\sigma^2}}$ avec l'écart angulaire entre la position du bord contrasté Ψ_c et l'axe optique du photorécepteur considéré.
2. **L'amplitude est proportionnelle à la dérivée de $\Psi_{mod}(t)$.** Plus la fonction de modulation $\Psi_{mod}(t)$ se compose de *fréquences* élevées, plus l'amplitude de sa dérivée $\Psi'_{mod}(t)$ sera grande, et par conséquent, plus l'*amplitude* du signal dérivé

Ph' sera importante (eq 2.42). De même, plus l'amplitude du signal de modulation $\Psi_{mod}(t)$ est grande, plus l'amplitude du signal dérivé Ph' sera importante. Il est donc possible de réduire l'*amplitude* de la vibration et de la compenser par une augmentation de la (ou des) *fréquences* de vibration composant $\Psi_{mod}(t)$ afin de conserver un bon rapport signal-sur-bruit.

3. **L'amplitude est proportionnelle à la variation d'intensité lumineuse mesurée par les photorécepteurs.** Cette variation d'intensité lumineuse qui est créée par le déplacement même de chaque axe optique par rapport au bord contrasté, dépend à la fois du contraste (paramètre m , qui est ici inclus dans k , le gain) et de l'éclairage ambiant. Cette variation d'intensité lumineuse est modélisée par le gain k . En condition d'éclairage naturel, ce gain k est constant et varie avec les modifications d'éclairage (passage de nuages). En condition d'éclairage artificiel par des tubes fluorescents, ce gain k se voit modulé à $100Hz$.

Différents candidats pour la mesure de la position angulaire d'un bord contrasté

L'objectif est de déterminer la position Ψ_c d'un bord contrasté dans le champ visuel du capteur. Il convient d'extraire une information contenue dans Ph_1 et Ph_2 et corrélée à la position Ψ_c . Cela équivaut à trouver une fonction monotone de la variable $\Psi_c(t)$ à partir des expressions des deux photodiodes (Ph_1 et Ph_2). Cette expression doit être, dans la mesure du possible, indépendante de l'éclairage ambiant et du contraste m (donc du paramètre k). Trois types de traitement simple sont évoqués ici :

Le calcul du rapport entre les deux signaux $\frac{Ph'_1}{Ph'_2}$ donnerait une expression indépendante à la fois de **la luminance**, du **contraste** (gain k), et de la loi de **modulation** $\Psi_{mod}(t)$. La caractéristique statique résultant de ce rapport (fig 2.54a) est monotone décroissante, mais fortement non linéaire, ce qui la rend difficilement exploitable. Son expression a été étudiée dans [Brückner 06] pour des signaux statiques, c'est-à-dire sans vibration aucune des axes optiques. L'utilisation de signaux optiques bruts (sans modulation) génère beaucoup de bruit sur la mesure.

Le calcul de la différence entre les deux signaux $Ph'_1 - Ph'_2$ (2.54b) permettrait d'éliminer le **bruit de mode commun** car ce bruit est synchrone sur les deux voies (il est principalement composé du $100Hz$ et de ses harmoniques, engendrés par la modulation à $100Hz$ liée à l'éclairage artificiel). La soustraction, par contre, n'est pas robuste

à l'éclairement ambiant ni au bord contrasté. De plus, la caractéristique statique résultant de cette soustraction (fig.2.54b) n'est pas monotone. L'exploitation d'une telle soustraction de deux photocapteurs adjacents est décrite dans [Riley 08]. Dans ce cas encore, l'utilisation des signaux optiques bruts (sans démodulation) génère un bruit important.

Le calcul du rapport de la différence sur la somme des signaux dérivés $\frac{Ph'_1 - Ph'_2}{Ph'_1 + Ph'_2}$ permet de réduire le bruit de mode commun (introduit par l'éclairage artificiel) tout en s'affranchissant des variations de luminance et de contraste, sans exiger de connaître la loi de balayage. C'est cette expression qui a été retenue pour la conception du capteur VODKA.

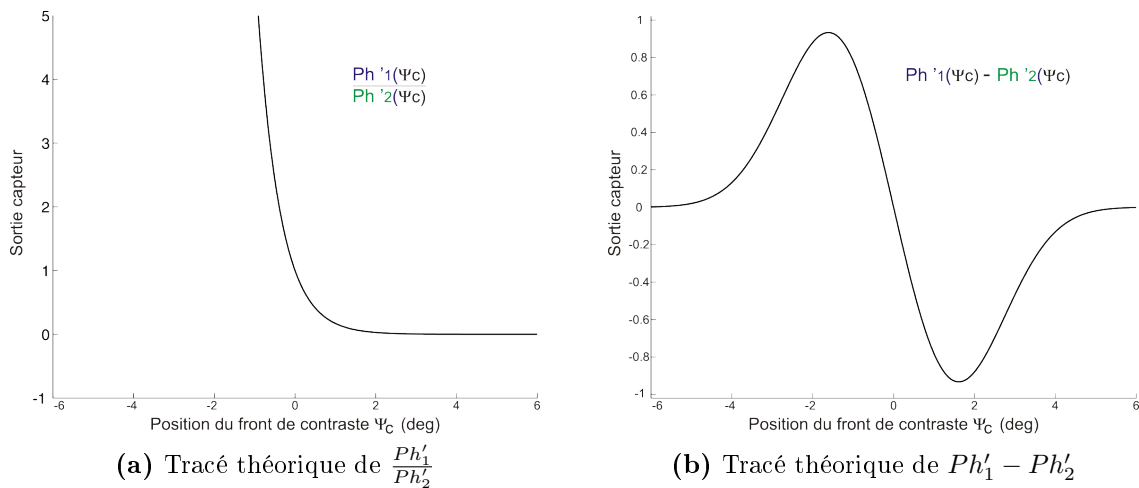


Fig. 2.54: Tracé théorique de $\frac{Ph'_1}{Ph'_2}$ et $Ph'_1 - Ph'_2$.

2.5.3 Principe du capteur VODKA

Pour estimer la position angulaire d'un bord contrasté (ou d'une barre) placé dans son champ visuel, le capteur VODKA réalise un traitement particulier qui consiste à évaluer le rapport de la *différence sur la somme de la dérivée* des signaux des deux photorécepteurs : Ph'_1 et Ph'_2 . La sortie du capteur VODKA s'exprime plus précisément par :

$$S_{VODKA}(t) = \frac{|Ph'_1(t)| - |Ph'_2(t)|}{|Ph'_1(t)| + |Ph'_2(t)|} \quad (2.43)$$

Le paragraphe 2.5.4 précise maintenant les caractéristiques de la sortie S_{VODKA} dans le cas d'un *bord* (front de contraste) et d'une *barre* de largeur L .

2.5.4 Modélisation du capteur VODKA

Mouvement relatif du bord contrasté ou de la barre

L'évolution temporelle de la position du contraste (bord contrasté ou barre) dans le référentiel du capteur noté $\Psi(t)$ est la somme de la position relative du contraste $\Psi_c(t)$ par rapport à l'axe du capteur VODKA (axe défini comme la bissectrice entre ses deux axes optiques, en négligeant la vibration), et de la fonction de modulation $\Psi_{mod}(t)$, qui traduit l'effet de la vibration des deux axes optiques. $\Psi_c(t)$ est considérée comme statique relativement à $\Psi_{mod}(t)$ qui est dynamique : $\Psi_c(t) = \text{constante}$.

$$\Psi(t) = \underbrace{\Psi_c(t)}_{\text{Position relative du bord contrasté}} + \underbrace{\Psi_{mod}(t)}_{\text{Modulation (Vibration des axes optiques)}} \quad (2.44)$$

Réponses des photorécepteurs

Réponse des photorécepteurs pour un bord contrasté. Les principaux résultats obtenus dans les sections 2.1.3 et 2.1.4 sont rassemblés ici. Le signal de sortie de chaque photodiode est décrit par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} Ph_1(\Psi) &= k * \frac{1}{2} \left(1 + erf \left(\frac{(\Psi - \frac{\Delta\varphi}{2}) * 2\sqrt{\ln(2)}}{\Delta\rho} \right) \right) + Offset_{Ph_1} \\ Ph_2(\Psi) &= k * \frac{1}{2} \left(1 + erf \left(\frac{(\Psi + \frac{\Delta\varphi}{2}) * 2\sqrt{\ln(2)}}{\Delta\rho} \right) \right) + Offset_{Ph_2} \end{aligned} \quad (2.45)$$

voir détails (eq 2.11 p.28).

La dérivée temporelle de ces deux signaux Ph_1 et Ph_2 permet d'en extraire la partie dynamique :

$$\begin{aligned} Ph_1'(\Psi(t)) &= k * \frac{\Psi'(t)}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(\Psi(t) - \frac{\Delta\varphi}{2})^2}{2\sigma^2}} \\ Ph_2'(\Psi(t)) &= k * \frac{\Psi'(t)}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(\Psi(t) + \frac{\Delta\varphi}{2})^2}{2\sigma^2}} \end{aligned} \quad (2.46)$$

voir détails (eq 2.20 p.42).

Réponse des photorécepteurs pour une barre de largeur L . On rappelle ici les principaux résultats obtenus dans les sections 2.1.3 et 2.1.4.

La réponse brute de chaque photodiode à une barre de largeur L est :

$$\begin{aligned} Ph_{1\text{ barre}}(\Psi) &= k * S \left(\Psi - \frac{\Delta\varphi}{2} + \frac{L}{2} \right) - S \left(\Psi - \frac{\Delta\varphi}{2} - \frac{L}{2} \right) + Offset_{Ph_1} \\ Ph_{2\text{ barre}}(\Psi) &= k * S \left(\Psi + \frac{\Delta\varphi}{2} + \frac{L}{2} \right) - S \left(\Psi + \frac{\Delta\varphi}{2} - \frac{L}{2} \right) + Offset_{Ph_2} \end{aligned} \quad (2.47)$$

avec

$$S(\Psi_c) = \frac{1}{2} \left(1 + erf \left(\frac{\Psi_c * 2\sqrt{\ln(2)}}{\Delta\rho} \right) \right) \quad (2.48)$$

voir détails (eq 2.13 p.30 et eq 2.10 p.28).

La dérivée temporelle de ces deux signaux Ph_1 et Ph_2 s'écrit :

$$\begin{aligned}
 Ph'_{1\text{ barre}}(\Psi(t)) &= \frac{\Psi'(t)}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(\Psi(t) - \frac{\Delta\varphi}{2})^2 + \frac{L^2}{4}}{2\sigma^2}} * \sinh \left\{ \left(\Psi(t) - \frac{\Delta\varphi}{2} \right) * \frac{L}{2\sigma^2} \right\} \\
 Ph'_{2\text{ barre}}(\Psi(t)) &= \frac{\Psi'(t)}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(\Psi(t) + \frac{\Delta\varphi}{2})^2 + \frac{L^2}{4}}{2\sigma^2}} * \sinh \left\{ \left(\Psi(t) + \frac{\Delta\varphi}{2} \right) * \frac{L}{2\sigma^2} \right\}
 \end{aligned} \tag{2.49}$$

voir détails (eq 2.21 p.42).

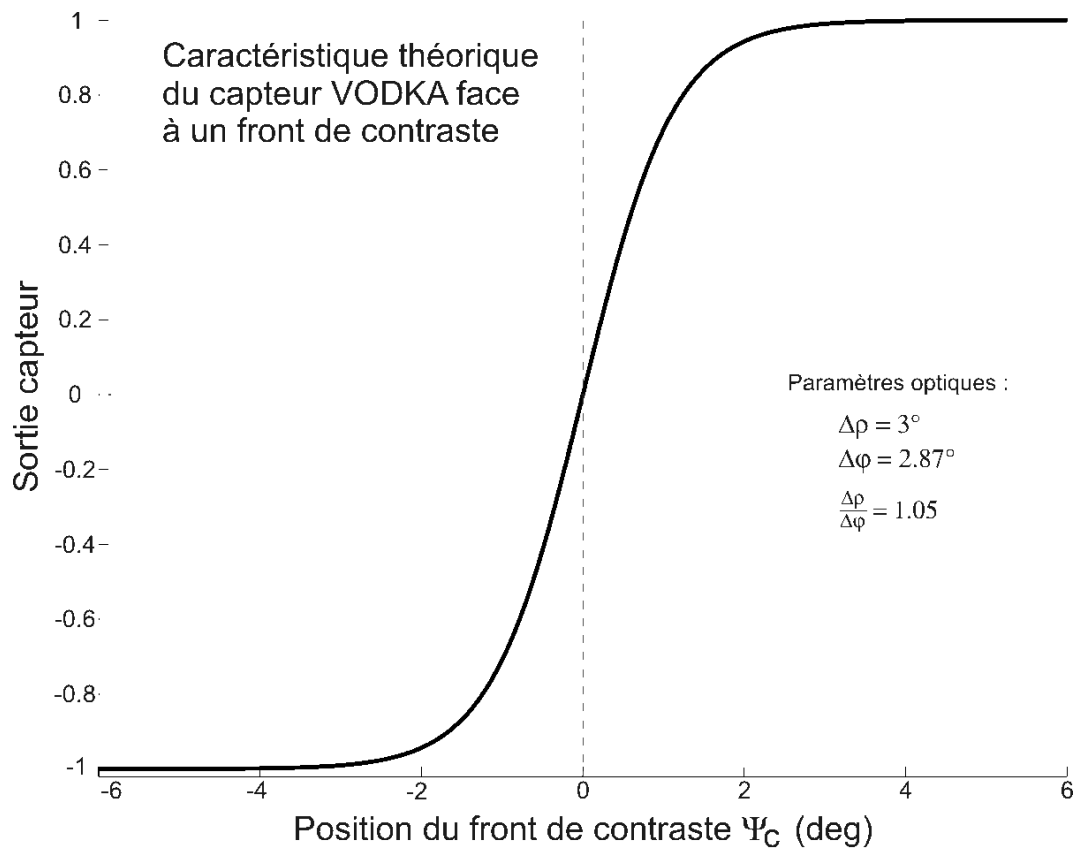


Fig. 2.55: Caractéristique statique *théorique* du capteur **VODKA** face à un bord contrasté. Cette caractéristique statique est la fonction tangente hyperbolique (eq 2.54). Elle est le résultat du quotient de la différence sur la somme des signaux dérivés des deux photodiodes Ph_1 et Ph_2 (eq 2.43). Sur ce tracé, on a $\Delta\varphi = 2.87^\circ$ et $\Delta\rho = 3^\circ$. Le rapport $\frac{\Delta\rho}{\Delta\varphi}$ est voisin de 1 (1.05).

Réponse du capteur VODKA

Réponse du capteur VODKA à la présentation d'un *bord contrasté* placé dans son champ visuel.

Les signaux Ph'_1 et Ph'_2 sont de même signe. Les valeurs absolues de l'expression 2.43 se simplifient alors :

$$S_{VODKA}(t) = \frac{Ph'_1(t) - Ph'_2(t)}{Ph'_1(t) + Ph'_2(t)} \quad (2.50)$$

Cette expression est plus facilement exploitable par le calcul.

La somme et la différence (eq 2.50) s'expriment à partir des expressions de Ph'_1 et Ph'_2 (voir eq 2.20 p.42).

$$\begin{aligned} Ph'_1(\Psi(t)) - Ph'_2(\Psi(t)) &= k * \frac{\Psi'(t)}{\sigma\sqrt{2\pi}} * \left(e^{-\frac{(\Psi(t) - \frac{\Delta\varphi}{2})^2}{2\sigma^2}} - e^{-\frac{(\Psi(t) + \frac{\Delta\varphi}{2})^2}{2\sigma^2}} \right) \\ &= k * \frac{\Psi'(t)}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{\Psi^2(t) + \frac{\Delta\varphi^2}{4}}{2\sigma^2}} * \left(e^{+\frac{\Psi(t)\Delta\varphi}{2\sigma^2}} - e^{-\frac{\Psi(t)\Delta\varphi}{2\sigma^2}} \right) \\ &= k * \frac{\Psi'(t)}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{\Psi^2(t) + \frac{\Delta\varphi^2}{4}}{2\sigma^2}} * \sinh\left(\Psi(t) * \frac{\Delta\varphi}{2\sigma^2}\right) \end{aligned} \quad (2.51)$$

$$\begin{aligned} Ph'_1(\Psi(t)) + Ph'_2(\Psi(t)) &= k * \frac{\Psi'(t)}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{\Psi^2(t) + \frac{\Delta\varphi^2}{4}}{2\sigma^2}} * \left(e^{+\frac{\Psi(t)\Delta\varphi}{2\sigma^2}} + e^{-\frac{\Psi(t)\Delta\varphi}{2\sigma^2}} \right) \\ &= k * \frac{\Psi'(t)}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{\Psi^2(t) + \frac{\Delta\varphi^2}{4}}{2\sigma^2}} * \cosh\left(\Psi(t) * \frac{\Delta\varphi}{2\sigma^2}\right) \end{aligned} \quad (2.52)$$

Le rapport de la différence sur la somme (2.50) s'écrit alors, à partir de (2.51) et (2.52) :

$$\begin{aligned} S_{VODKA}(t) &= \frac{Ph'_1(\Psi(t)) - Ph'_2(\Psi(t))}{Ph'_1(\Psi(t)) + Ph'_2(\Psi(t))} \\ &= \frac{k * \frac{\Psi'(t)}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{\Psi^2(t) + \frac{\Delta\varphi^2}{4}}{2\sigma^2}} * \sinh\left(\Psi(t) * \frac{\Delta\varphi}{2\sigma^2}\right)}{k * \frac{\Psi'(t)}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{\Psi^2(t) + \frac{\Delta\varphi^2}{4}}{2\sigma^2}} * \cosh\left(\Psi(t) * \frac{\Delta\varphi}{2\sigma^2}\right)} \\ &= \tanh\left(\Psi(t) * \frac{\Delta\varphi}{2\sigma^2}\right) \end{aligned} \quad (2.53)$$

Comme la variance σ^2 peut s'exprimer judicieusement en fonction de la largeur à mi-hauteur $\Delta\rho$ de la courbe de sensibilité directionnelle (gaussienne) (eq 2.4) de chaque photodiode (voir figure 2.6) on obtient finalement, avec (eq 2.5) :

$$S_{VODKA}(t) = \tanh\left(\Psi(t) * \frac{4\Delta\varphi \log(2)}{\Delta\rho^2}\right) \quad (2.54)$$

La caractéristique d'une mesure de la position d'un *bord contrasté* réalisé en utilisant cette expression présente les trois propriétés suivantes :

1. \tanh est une fonction *monotone* de la position Ψ_c du bord contrasté.
2. \tanh est en plus une fonction *impaire*, symétrique par rapport à la position 0.
3. \tanh est une fonction qui *compresse* la mesure pour les positions les plus excentrées.

Réponse du capteur **VODKA** à la présentation d'une *barre* dans son champ visuel

D'après les équations (2.43) et (2.21), la sortie du capteur S_{VODKA} s'écrit :

$$S_{VODKA} = \frac{|Ph'_{1\ barre}(\Psi(t))| - |Ph'_{2\ barre}(\Psi(t))|}{|Ph'_{1\ barre}(\Psi(t))| + |Ph'_{2\ barre}(\Psi(t))|} \quad (2.55)$$

$$= \frac{\left| e^{\frac{\Psi(t)\Delta\varphi}{2\sigma^2}} * \sinh \left\{ \left(\Psi(t) - \frac{\Delta\varphi}{2} \right) * \frac{L}{2\sigma^2} \right\} \right| - \left| e^{-\frac{\Psi(t)\Delta\varphi}{2\sigma^2}} * \sinh \left\{ \left(\Psi(t) + \frac{\Delta\varphi}{2} \right) * \frac{L}{2\sigma^2} \right\} \right|}{\left| e^{\frac{\Psi(t)\Delta\varphi}{2\sigma^2}} * \sinh \left\{ \left(\Psi(t) - \frac{\Delta\varphi}{2} \right) * \frac{L}{2\sigma^2} \right\} \right| + \left| e^{-\frac{\Psi(t)\Delta\varphi}{2\sigma^2}} * \sinh \left\{ \left(\Psi(t) + \frac{\Delta\varphi}{2} \right) * \frac{L}{2\sigma^2} \right\} \right|}$$

Ici, les valeurs absolues ne se simplifient pas, contrairement au cas de la localisation d'un *bord contrasté* (eq 2.50).

La figure 2.74 présente la caractéristique statique théorique du capteur pour les valeurs $\Delta\rho$ et $\Delta\varphi$ de l'optique dont on dispose. Les valeurs de $\Delta\rho$ et $\Delta\varphi$ donnent ici une faible pente sur la caractéristique, autour de la position 0. Cette faible pente ne permet pas de localiser une barre fine avec précision. Cependant, on montre dans l'étude paramétrique (voir p.153) que l'on peut obtenir une caractéristique statique plus intéressante en jouant sur ces paramètres optiques, en particulier sur le rapport $\frac{\Delta\rho}{\Delta\varphi}$. En particulier, les figures 2.75 et 2.76 (p.154) présentent les caractéristiques du capteur, face à un bord contrasté et face à une barre, pour $\frac{\Delta\rho}{\Delta\varphi} = 0.70$.

Lorsque le capteur est face à une barre, on remarque que les signaux dérivés $Ph'_{1\ barre}$ et $Ph'_{2\ barre}$ sont en opposition de phase lorsque la barre est située dans l'intervalle $\pm \frac{\Delta\varphi}{2}$. Cette caractéristique permet de réaliser facilement un *détecteur de barre*.

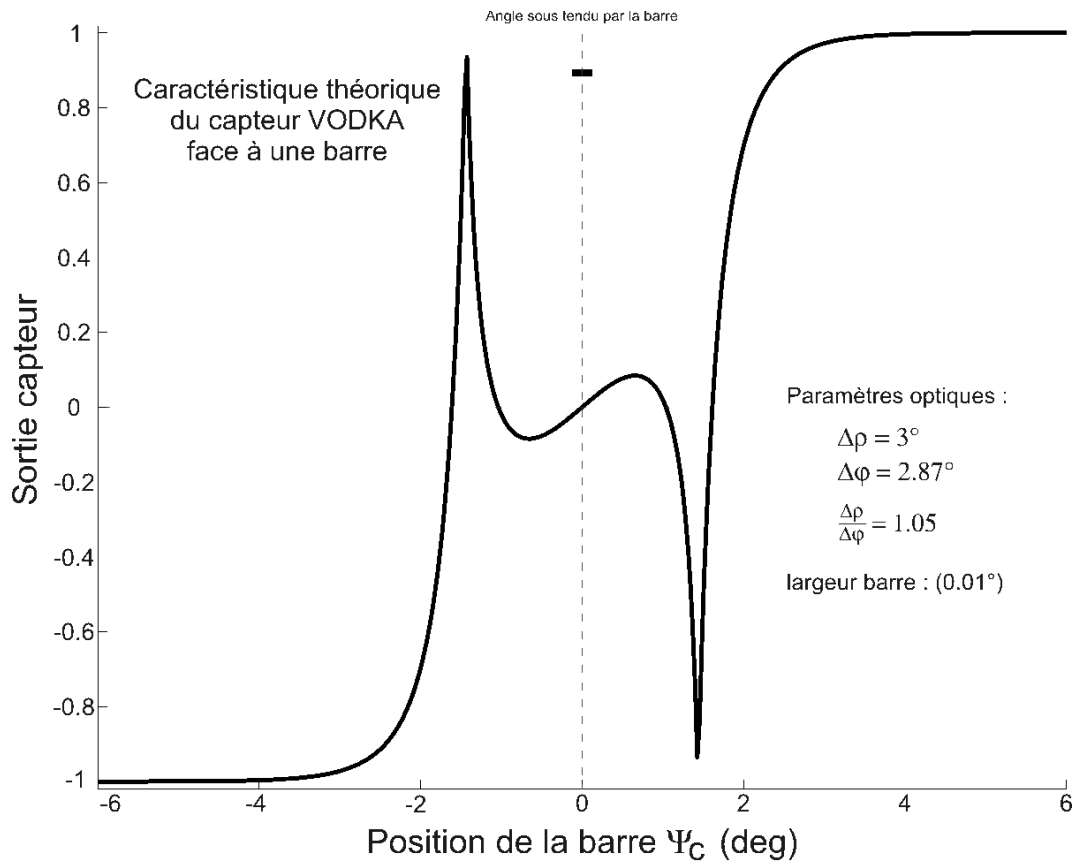


Fig. 2.56: Caractéristique statique théorique du capteur face à une barre fine dont la largeur sous-tend un angle de 0.01° . Cette caractéristique est le résultat du quotient de la différence sur la somme des signaux *dérivés* issus des deux photodiodes (2.43). Le résultat en est la fonction donnée par l'équation (eq 2.55). Pour ce tracé, on a $\Delta\varphi = 2.87^\circ$ et $\Delta\rho = 3^\circ$. Le rapport $\frac{\Delta\rho}{\Delta\varphi}$ est voisin de 1 (1.05).

2.5.5 Simulation

Deux simulations (fig.2.57 et fig.2.58) présentent de manière détaillée le fonctionnement du capteur **VODKA** placé face à un bord contrasté. Ces deux simulations montrent les signaux à chaque étape du calcul, en commençant par les signaux des deux photodiodes jusqu'à la sortie S_{VODKA} du capteur. La modulation Ψ_{mod} est le seul paramètre qui diffère entre ces deux simulations. Cette modulation est d'abord un *sinus* d'amplitude 0.2° à 40Hz (2.57) puis un *triangle* d'amplitude 0.1° à 125Hz (figure 2.58). Ces deux planches permettent de visualiser le fonctionnement du capteur et montrent bien l'invariance de sa sortie au type de vibration Ψ_{mod} utilisé.

On a vu précédemment (voir p.113) que l'expression de la sortie du capteur $S_{VODKA}(t)$ se simplifiait dans le cas d'une mesure de la position d'un bord contrasté en

$$S_{VODKA}(t) = \frac{Ph'_1(t) - Ph'_2(t)}{Ph'_1(t) + Ph'_2(t)}$$

Les deux simulations présentées ici utilisent cette expression pour simplifier la compréhension.

La simulation des signaux optiques se base sur les caractéristiques présentées au paragraphe 2.1.3. La simulation est continue (à pas variable) sur la partie relative aux signaux analogiques (signaux engendrés par les photodiodes et filtrage analogique) et discrétisée à $500Hz$ pour la partie échantillonnée. On simule un bord contrasté se déplaçant très lentement, à vitesse angulaire constante, relativement au dispositif optique, sa position angulaire variant de -5° à $+5^\circ$ en 10s, puis de $+5^\circ$ à -5° durant les 10s suivantes.

Sur les deux planches (fig.2.57 et fig.2.58), le déplacement angulaire (Ψ_c) du bord contrasté est présenté sur la courbe (b). La courbe (a) présente la fonction de modulation Ψ_{mod} . La courbe (c) montre la position angulaire relative Ψ , qui est la somme de Ψ_c et Ψ_{mod} (eq 2.44). L'effet de la modulation Ψ_{mod} sur Ψ est à peine visible sur la courbe (c) (il se traduit par l'épaisseur de la courbe) car l'amplitude de la modulation est très faible.

Les courbes (e) à (j) présentent des signaux sur la même et unique base de temps (précisée au bas de la courbe j).

encart (e) Les signaux Ph_1 et Ph_2 sont analogues à l'intensité lumineuse reçue par chaque photorécepteur (eq 2.11). L'amplitude des signaux varie ici de -400 à $+400$, montrant le passage successif de chaque photodiode d'une zone sombre ($t = 0s$) à

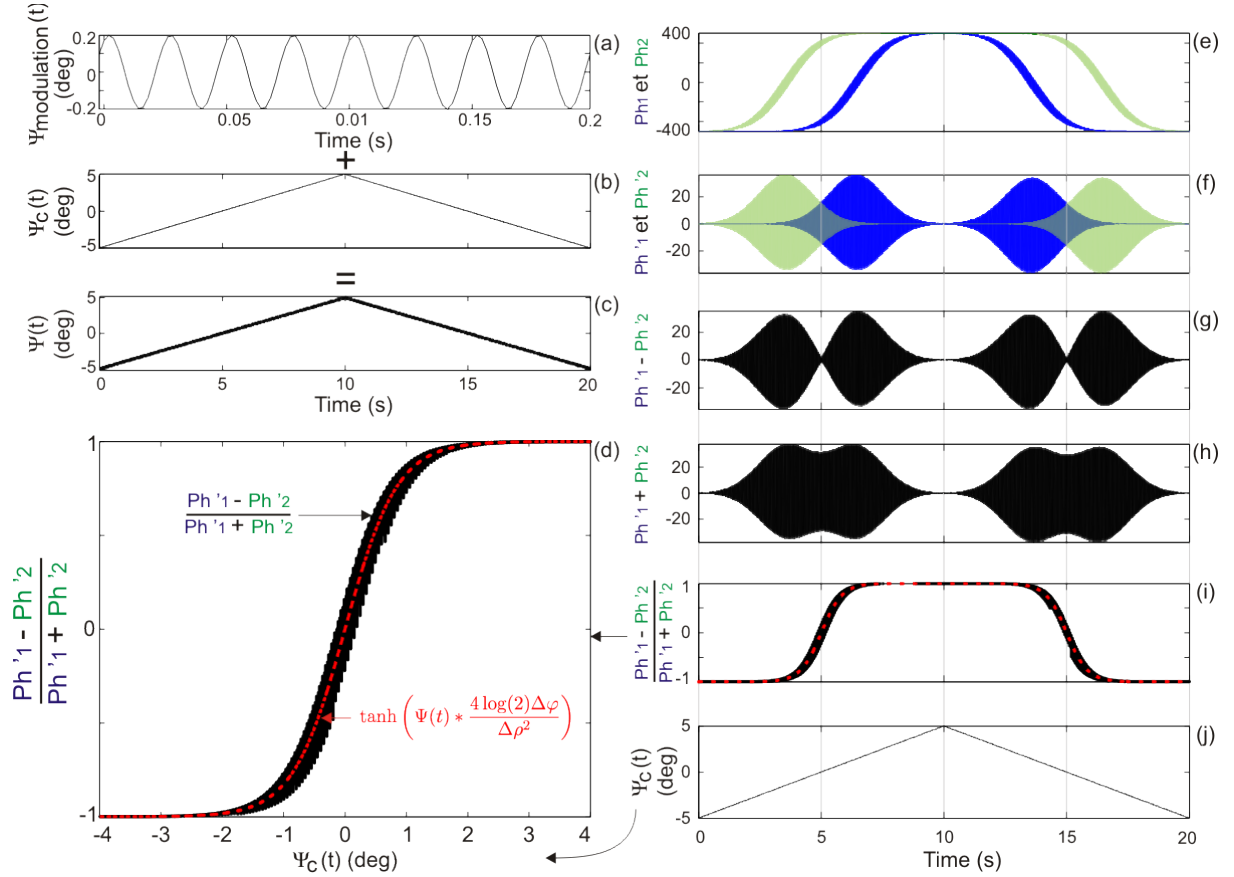


Fig. 2.57: Simulation du capteur de position angulaire **VODKA**. Le capteur n'est composé que de deux photodiodes (dans la configuration décrite au paragraphe 2.1.2), dont les axes optiques sont animés d'une vibration sinusoïdale. **a)** fonction de modulation $\Psi_{mod}(t)$ ou vibration translatant les deux axes optiques. Une modulation sinusoïdale à 40Hz est considérée ici, dont l'amplitude est très faible (0.2°) par rapport à l'angle interrécpteur ($\Delta\varphi = 2.87^\circ$). **b)** position du bord contrasté $\Psi_c(t)$ par rapport à la bissectrice des deux axes optiques en position statique. **c)** position relative du bord contrasté $\Psi(t)$ résultant à la fois du déplacement lent du bord contrasté (b) et de la modulation (a), rapide et de faible amplitude. **e)** Signaux de sortie $Ph_1(t)$ et $Ph_2(t)$ des deux photodiodes. **f)** signaux de chaque photodiode $Ph_1(t)$ et $Ph_2(t)$ filtrés par le pseudo dérivateur analogique décrit à la section 2.2.2. Les signaux issus de ce filtrage sont $Ph'_1(t)$ et $Ph'_2(t)$. **g)** Résultat de la soustraction $Ph'_1(t) - Ph'_2(t)$. **h)** Résultat de l'addition $Ph'_1(t) + Ph'_2(t)$. **i)** Rapport de (g) sur (h) : $\frac{Ph'_1(t) - Ph'_2(t)}{Ph'_1(t) + Ph'_2(t)}$. On voit que ce rapport est une fonction monotone de la position du contraste montrée en **(j)**. la courbe **d)** compare le rapport $\frac{Ph'_1(t) - Ph'_2(t)}{Ph'_1(t) + Ph'_2(t)}$ en fonction de la position Ψ_c du contraste (courbe noire) avec la courbe théorique (eq 2.54, courbe rouge). Paramètres utilisés : $\Delta\rho = 2.6^\circ$, $\Delta\varphi = 2.87^\circ$, échantillonnage à 500Hz, fonction de modulation : sinus à 40Hz, amplitude 0.2° .

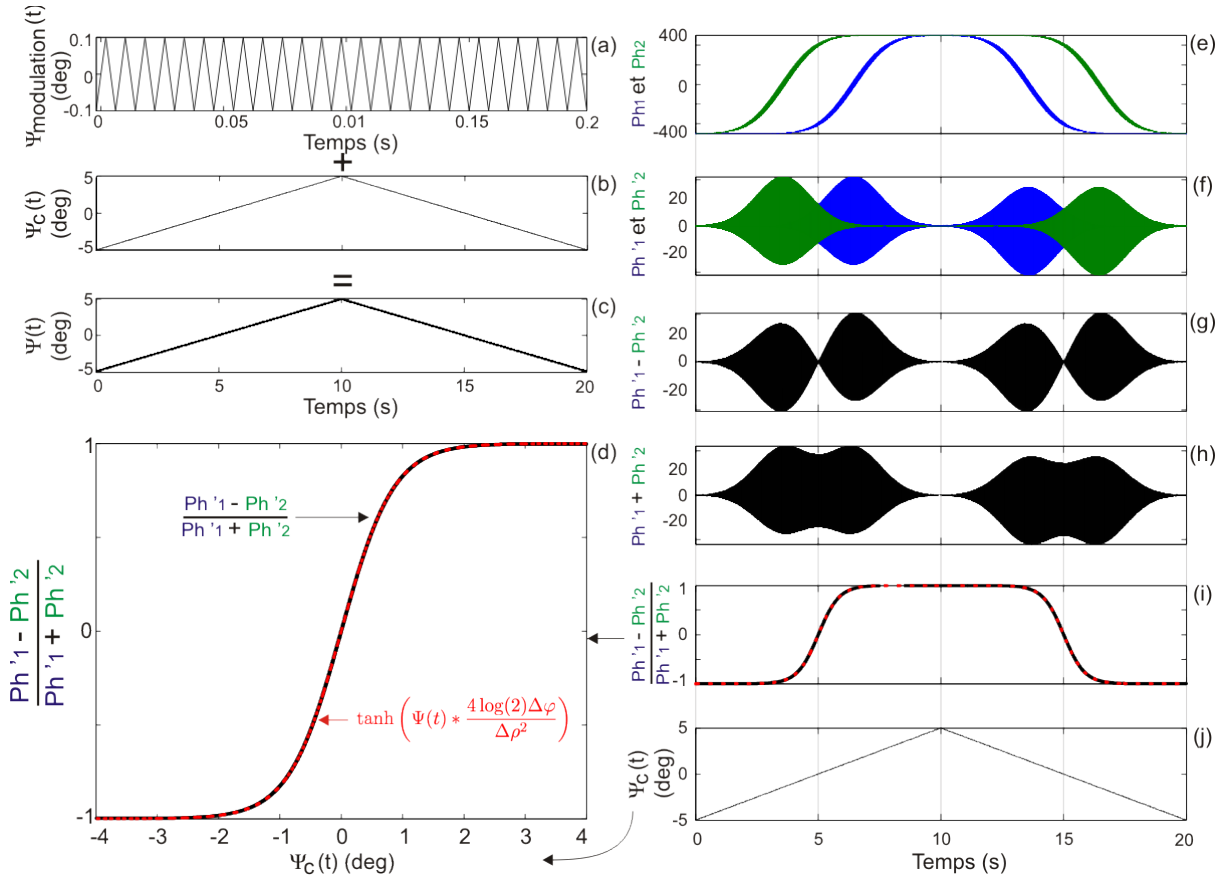


Fig. 2.58: Simulation du capteur de position angulaire VODKA. Cette figure est identique à la figure 2.57, excepté que le signal de modulation est ici un *triangle* de fréquence plus élevée (125Hz) et d'amplitude deux fois plus faible (0.1°). Les courbes a) b) et c) présentent respectivement les signaux $\Psi_{mod}(t)$, $\Psi_c(t)$ et $\Psi(t)$. Les courbes e) et f) présentent respectivement les signaux des photodiodes ($Ph_1(t)$ et $Ph_2(t)$) et leurs dérivées ($Ph'_1(t)$ et $Ph'_2(t)$). g) et h) présentent respectivement la différence $Ph'_1(t) - Ph'_2(t)$ et la somme $Ph'_1(t) + Ph'_2(t)$. i) et d) présentent le rapport $\frac{Ph'_1(t) - Ph'_2(t)}{Ph'_1(t) + Ph'_2(t)}$ (i) en fonction du temps, et en fonction de la position Ψ_c du bord contrasté. La caractéristique statique théorique \tanh est superposée aux mesures sur ces deux dernières courbes. Paramètres utilisés : $\Delta\rho = 2.6^\circ$, $\Delta\varphi = 2.87^\circ$, échantillonnage à 500Hz, fonction de modulation : sinus à 125Hz, 0.1° crête-à-crête dont la forme discrétisée à 500Hz est équivalente à une fonction triangle discrétisée à la même fréquence 500Hz.

une zone claire ($t = 10s$), puis de nouveau à une zone sombre ($t = 20s$). Cette large variation d'amplitude des signaux est nullement exploitée par le capteur, comme on le montre par la suite. La largeur de la courbe de chaque signal est due à la modulation Ψ_{mod} qui module (à $40Hz$) l'intensité lumineuse reçue par les photodiodes. C'est cette composante dynamique qui est utilisée par le capteur VODKA.

encart (f) Les variations rapides engendrées par la modulation Ψ_{mod} sont isolées sur les signaux Ph'_1 et Ph'_2 par l'action dérivée (eq 2.20).

encart (g) et (h) . Les courbes (g) et (h) présentent respectivement la différence $Ph'_1 - Ph'_2$ et la somme $Ph'_1 + Ph'_2$ des signaux dérivés des deux photodiodes.

encart (i) La courbe noire est le rapport de la différence (courbe g) sur la somme (courbe h) des deux signaux dérivés : $\frac{Ph'_1 - Ph'_2}{Ph'_1 + Ph'_2}$. La fonction \tanh (eq 2.52) est superposée en rouge au résultat de la simulation. Cette superposition montre une très bonne correspondance entre la simulation et la courbe théorique.

encart (j) La courbe (j) montre la position relative du contraste Ψ_c en fonction du temps. Les courbes (e) à (i), présentées avec la même base de temps que la courbe (j), peuvent donc être lues indirectement en fonction de la position du contraste Ψ_c au travers de la courbe (j).

encart (d) L'encart (d) est une combinaison de la courbe (i) et (j) car il montre en noir la même mesure de position présentée sur la courbe (i) en fonction de la position Ψ_c du bord contrasté présenté sur la courbe (j). La fonction \tanh est également tracée en rouge sur cet encart (d).

Dans les deux simulations présentées, les signaux dérivés Ph' (courbe (f)) ont la même amplitude. La réduction par un facteur 2 de l'amplitude de la modulation Ψ_{mod} ($0.2^\circ \rightarrow 0.1^\circ$) est compensée par l'augmentation de la fréquence de modulation ($40Hz \rightarrow 125Hz$).

L'encart (d) de la figure 2.58 montre la sortie du capteur VODKA en fonction de la position Ψ_c du bord contrasté. Sont superposées ici (en noir) les mesures effectuées sur la phase "aller" du déplacement du bord contrasté (de -5° à $+5^\circ$) puis sur la phase "retour" (de $+5^\circ$ à -5°). La superposition quasi-parfaite des courbes correspondant à ces deux phases montre le retard négligeable de la mesure.

Dans cette simulation, seul le filtre analogique crée un retard. Le délai de groupe du filtre analogique (fig.2.16) est de 4ms à 40Hz et inférieur à 1ms à 125Hz.

Le bruit visible sur la mesure de la courbe (d) et (i) de la figure 2.57 est dû à l'indétermination du rapport de la différence sur la somme de la dérivée des photodiodes (eq 2.50). La vitesse de vibration des axes optiques ($\Psi_{mod}(t)$) s'annule deux fois par période. L'expression de la dérivée des photodiodes (2.46) et (2.49) s'annule donc aussi deux fois par période, de sorte que la sortie S_{VODKA} (eq 2.43) se trouve indéterminée (division par 0) deux fois par période. Lors de la simulation, l'échantillonnage des signaux avec un offset temporel choisi permet de ne pas tomber sur une indétermination de type division par 0. Ainsi, la sortie du capteur VODKA sur la simulation présentée sur la figure 2.58 est lisse contrairement à la simulation présentée sur la figure 2.57. Cependant, la précision limitée du calcul en virgule flottante du logiciel de simulation utilisé (simulinkTM) génère des erreurs lors du calcul du rapport de deux valeurs très petites. La largeur de la caractéristique statique sur l'encart (d) est due à ces erreurs. On verra, lors de la mise en oeuvre réelle du capteur, comment on peut s'affranchir de ce problème et rendre le capteur particulièrement robuste aux bruits présents sur les signaux réels.

2.5.6 Mise en œuvre et robustesse

Les sections précédentes ont décrit le principe de fonctionnement du capteur VODKA. Les deux simulations présentées sur les figures 2.57 et 2.58 illustrent ce principe. Bien que ces deux simulations ne prennent pas en compte le bruit issu des capteurs, le principe du capteur appliqué à des signaux visuels simulés (donc parfaits) donne un résultat bruité par suite des imprécisions dues au calcul numérique.

Sur des signaux réels, donc bruités, le bruit de mode commun est supprimé au numérateur par le calcul de la différence (eq 2.50), mais reste présent au dénominateur, et le calcul de la division est très sensible au bruit présent sur les signaux des deux photodiodes, d'autant plus que ces signaux ont une valeur proche de 0. Le principe de fonctionnement va donc donner des résultats très bruités si on l'applique directement.

Robustesse acquise par une démodulation

L'information utile contenue dans les signaux Ph'_1 et Ph'_2 est codée par leur amplitudes relatives. En présence de bruit, l'information d'amplitude de ces deux signaux peut être extraite avec avantage par *démodulation*. Trois techniques de démodulation d'amplitude, adaptées à 3 situations différentes, permettent d'extraire de manière robuste l'amplitude des deux signaux.

Dans un premier temps, l'amplitude des signaux dérivés (eq 2.20 42) (bord contrasté) ou (eq 2.21 p.42) (barre) est isolée à l'aide d'un démodulateur. C'est ensuite le signal démodulé qui sera utilisé pour le calcul de S_{VODKA} (eq 2.43 p.109).

La figure 2.59 présente le fonctionnement complet du capteur avec une démodulation d'amplitude *asynchrone*. Nous détaillerons par la suite deux autres types de démodulateur.

Sur la figure 2.59 le capteur VODKA est placé devant un bord contrasté représenté à l'extrémité gauche. Les photodiodes sont dessinées avec leur sensibilité directionnelle gaussienne $s(\Psi)$ (voir section 2.1.3 p.23) et leur angle d'acceptance $\Delta\rho$. La position Ψ_c du contraste relativement à la bissectrice des axes optiques est indiquée par la petite flèche rouge dirigée vers le bas, devant le bord contrasté. La vibration ou modulation Ψ_{mod} des deux axes optiques est également indiquée par les doubles flèches rouges de part et d'autre des axes optiques des deux photodiodes. Le spectre du signal d'une photodiode est dessiné après chaque étape de traitement (a-f).

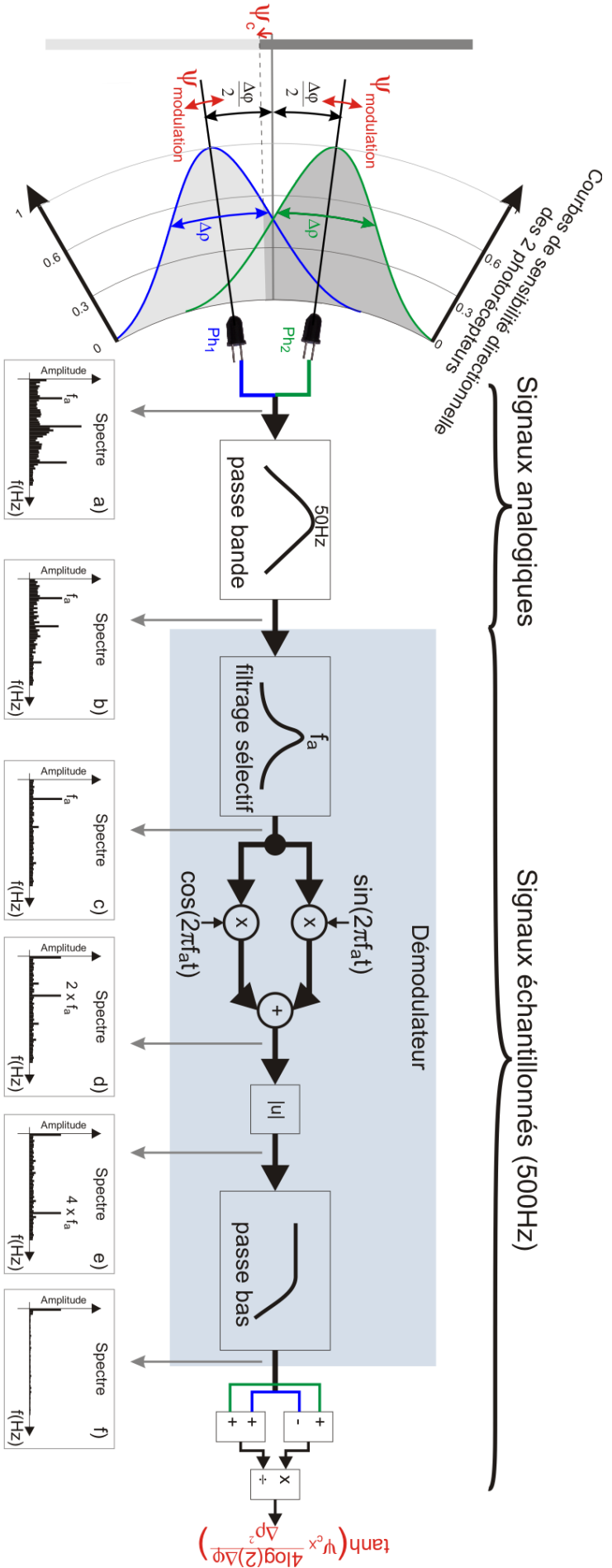


Fig. 2.59: Schéma de fonctionnement du capteur de position angulaire VODKA. Une représentation spectrale du signal type d'une photodiode est tracée à chaque étape. La première étape commence à gauche par le filtrage spatial introduit par la sensibilité directionnelle gaussienne $s(\Psi)$ de chaque photodiode. Un bord contrasté est placé à la position Ψ_c par rapport à la bissectrice des deux axes optiques au repos. Une vibration mécanique (ici de fréquence f_a) est appliquée au dispositif optique, ce qui se traduit, au niveau des deux axes optiques, par une faible modulation angulaire notée $\Psi_{mod}(t)$. Le spectre, à la sortie des photodiodes, montre les pics aux fréquences f_a (40Hz) et 100Hz (dû à l'éclairage artificiel) et à sa première harmonique (200Hz). Le filtrage passe-bande agit comme un dérivateur (eq 2.20) et un atténuateur des fréquences élevées. Le démodulateur est ici constitué d'un filtre sélectif éliminant toutes les fréquences excepté f_a . Le quotient $\frac{Ph_1 - Ph_2}{Ph_1 + Ph_2}$ (2.54) se réduit à l'expression \tanh , qui est une fonction monotone et impaire de la position du bord contrasté Ψ_c .

- Le spectre (a) montre les caractéristiques fréquentielles du signal en sortie d'une photodiode lorsque une micro-vibration sinusoïdale de fréquence f_a (ici $40Hz$) est activée. Le pic à $100Hz$ et ses harmoniques sont caractéristiques de l'éclairage artificiel.
- Le filtre analogique passe-bande, centré sur $50Hz$, agit avant tout comme un pseudo-dérivateur et permet d'isoler la partie dynamique du signal. Le spectre (b) montre la suppression de la composante continue ainsi que la suppression des hautes fréquences.
- Le filtrage sélectif, centré sur la fréquence f_a , supprime du spectre (c) toutes les fréquences pour ne conserver que la fréquence f_a .
- L'étape de démodulation (ici asynchrone) est réalisée par la multiplication du signal avec deux sinus en quadrature à la fréquence f_a . Sur le spectre (d), cette démodulation se traduit par la translation de la raie de fréquence f_a aux fréquences respectives de 0 et $2f_a$. Après cette étape, la composante continue du signal représente l'enveloppe du signal modulé à la fréquence f_a . Ce signal est cependant bruité par la fréquence $2f_a$ engendrée par la démodulation.
- La valeur absolue, translate la raie fréquentielle $2f_a$ vers $4f_a$ (spectre e). Ce doublement de fréquence rend la dernière étape de filtrage (passe-bas) plus efficace pour supprimer cette fréquence image ($2f_a$), résidu de la démodulation. La valeur absolue est aussi nécessaire pour le calcul de la sortie S_{VODKA} (voir eq 2.43).
- Le dernier filtrage passe-bas permet de ne conserver que la partie statique (utile) du signal, qui est le reflet de l'amplitude du signal de fréquence f_a de départ.
- La dernière étape calcule le rapport de la différence sur la somme (voir eq 2.43) des deux signaux suite à leur démodulation.

3 démodulateurs adaptés à 3 configurations

Il existe plusieurs techniques classiques de démodulation. Chaque technique nécessite des filtres adaptés. La figure 2.60 présente trois techniques, adaptées à trois configurations différentes et listées ci-après :

- **démodulation asynchrone** : Le signal de modulation Ψ_{mod} n'est pas accessible. La modulation est supposée sinusoïdale et l'on en connaît la fréquence a priori,
- **démodulation synchrone** : Le signal de modulation Ψ_{mod} est accessible : ce peut être via le signal de commande d'un actionneur faisant vibrer les axes optiques des photorécepteurs (par exemple, un barreau piézo-électrique ou un galvanomètre) ou via un capteur mesurant la micro-vibration des axes optiques (par exemple, un

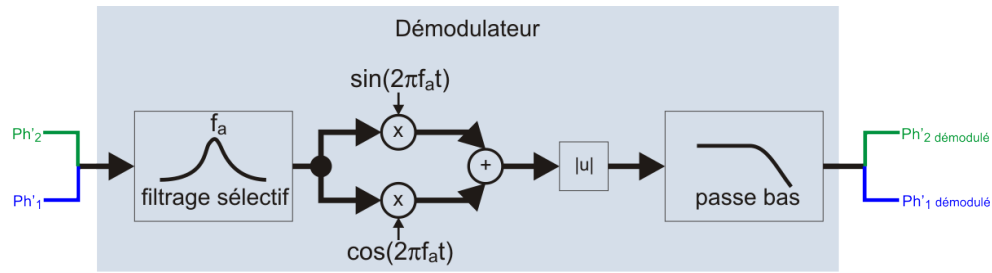
gyromètre). On effectue alors une *démodulation synchrone*. La modulation Ψ_{mod} peut être quelconque ou prédéfinie. Le filtrage utilisé en dépendra,

- **détection d’enveloppe** : Cette solution fonctionne avec une modulation Ψ_{mod} quelconque, sans que l’on ait besoin de connaître ce signal de modulation. Toute la bande passante des signaux issus des photodiodes est alors utilisée. C’est la solution la moins contraignante.

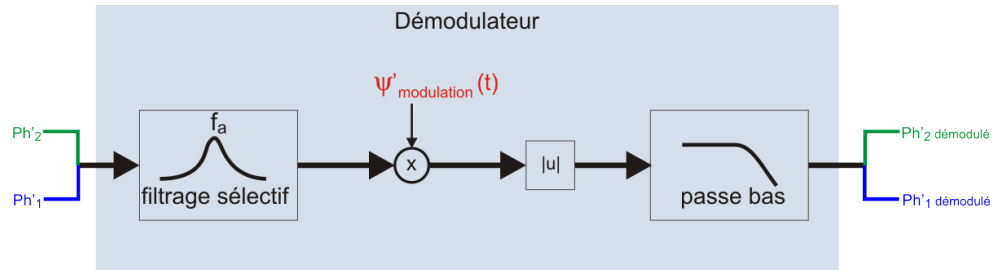
Le démodulateur asynchrone nécessite que la modulation Ψ_{mod} soit une fonction sinusoïdale de fréquence connue. Il n’est cependant pas nécessaire de disposer du signal Ψ_{mod} lui-même. Le démodulateur asynchrone peut être utilisé lorsque le capteur est solidaire d’un dispositif ayant une fréquence de résonance mécanique connue. La vibration naturelle du système à cette fréquence génère des signaux sur les photodiodes qui peuvent être extraits avec ce démodulateur. Il présente l’avantage de ne nécessiter aucun capteur supplémentaire, et sa réalisation est simple.

Deux sinus de fréquence f_a en quadrature sont générés par le calculateur pour être multipliés par le signal de chaque photodiode. Une technique classique de démodulation asynchrone utilise une boucle à verrouillage de phase (PLL, analogique ou numérique), permettant d’effectuer cette démodulation avec un seul signal sinusoïdal généré, en phase avec la vibration propre du système. Cette technique n’a pas été utilisée, car la réalisation d’une PLL numérique reste plus complexe que la solution proposée ici. Le démodulateur présenté sur la figure 2.60a approxime une démodulation. La démodulation d’amplitude d’un signal $s(t)$ (sinus de fréquence f_a) nécessite le calcul de $\sqrt{(s(t) * \cos(2\pi f_a t))^2 + (s(t) * \sin(2\pi f_a t))^2}$. Le démodulateur présenté ici calcule seulement $|s(t) * \cos(2\pi f_a t)| + |s(t) * \sin(2\pi f_a t)|$. Cette approximation donne le même résultat à un facteur variant de 1 à $\frac{1}{\sqrt{2}}$ près. Ce facteur dépend du déphasage entre le signal à démoduler $s(t)$ et la fonction sinus de démodulation. Les signaux des deux photodiodes sont en phase (ou en opposition de phase dans le cas d’une barre). L’erreur de gain créée par la démodulation approximée est donc identique sur les deux voies. Le rapport de la différence sur la somme des deux signaux est insensible à la multiplication de ces deux signaux par un même gain.

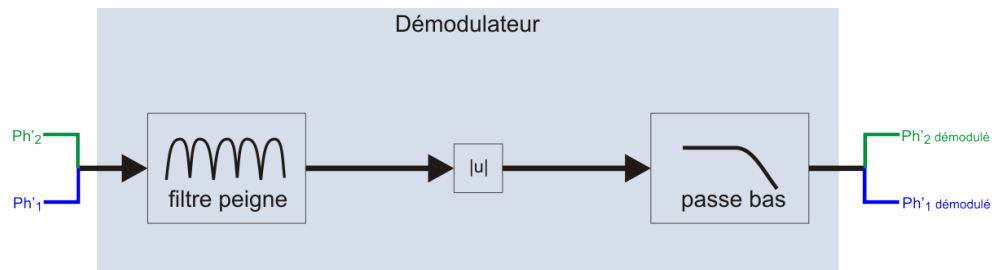
Le démodulateur synchrone nécessite la connaissance du signal de modulation Ψ'_{mod} , mais cette modulation peut être quelconque. Le calcul effectué est plus simple que celui exigé par la démodulation asynchrone. C’est la démodulation la plus efficace lorsque le signal modulant (Ψ_{mod} ou Ψ'_{mod}) est connu. Ce signal modulant pourrait provenir de la commande de l’actionneur faisant vibrer les deux capteurs optiques ou d’un capteur



(a) Démodulateur *asynchrone*. On connaît la fréquence du signal de modulation (Ψ_{mod}) mais on ne connaît pas sa phase.



(b) Démodulateur *synchrone*. On dispose du signal modulant (Ψ'_{mod}) (le calculateur génère lui même le signal de commande de la vibration des axes optiques ou un capteur accessoire permet de la mesurer). Ce signal, typiquement une fonction sinusoïdale, peut avoir n'importe quelle forme, y compris apériodique.



(c) Démodulateur générique calculant l'énergie du signal. Ce démodulateur ne nécessite aucune connaissance sur le signal Ψ_{mod} . Tout mouvement du dispositif optique va créer une variation du signal des photodiodes (Ph'_1 et Ph'_2). Un filtre en peigne élimine toutes les fréquences (50,100,150,200,250 Hz) provenant de l'éclairage artificiel et de ses harmoniques (y compris réplés) susceptibles de perturber le système. Ce démodulateur estime l'énergie de Ph'_1 et Ph'_2 .

Fig. 2.60: 3 différentes fonctions de démodulation possibles en place du démodulateur présenté sur la figure 2.59 (p.122). Les deux premiers démodulateurs sont plus performants lorsque la vibration des axes optiques est connue (via la loi de commande ou via un capteur). Le troisième démodulateur est utilisé lorsque l'on n'a aucune possibilité de connaître la vibration du système optique (par exemple, lorsqu'on utilise la vibration propre de l'appareil supportant le capteur VODKA). Ce dernier démodulateur est générique, car il peut fonctionner avec une vibration Ψ_{mod} quelconque.

mesurant la vibration elle-même (capteur inertiel de type accéléromètre ou gyromètre). Le résultat est optimal lorsque les signaux provenant des photodiodes Ph'_1 et Ph'_2 sont en phase. Cette mise en phase peut se faire en retardant temporellement le signal Ψ'_{mod} . Les expériences 2.61 et 2.62 utilisent ce démodulateur *synchrone*. Le filtre sélectif, calé sur la fréquence de modulation $f_a = 40Hz$, présente un délai de groupe pour cette fréquence tel qu'il met en phase les signaux des photodiodes Ph'_1 et Ph'_2 avec le signal de consigne Ψ_{mod} de la vibration. La démodulation utilise le signal sinusoïdal Ψ_{mod} directement, sans effectuer de calcul de dérivée ou de retard, du fait des propriétés intrinsèques de la fonction sinus.

L'utilisation d'un filtre sélectif calé sur la fréquence de modulation f_a permet d'éliminer tout le bruit présent sur le spectre autour de f_a . Ce filtre est donc très efficace. Cependant, le délai de groupe d'un filtre sélectif est maximal précisément à la fréquence sélectionnée. Il peut être préférable sur le plan de la latence du capteur, d'utiliser plusieurs filtres réjecteurs pour rejeter les bruits identifiés (100Hz, 200Hz...).

Le détecteur d'enveloppe est le moins contraignant des trois démodulateurs présentés, mais il donne les résultats les plus bruités. Le grand avantage du détecteur d'enveloppe par rapport aux deux démodulateurs précédents est qu'il permet d'extraire l'information nécessaire à l'estimation de la position d'un objet contrasté **sans aucune connaissance à priori sur la vibration de la plateforme** supportant le capteur optique. Cette caractéristique permet la réalisation d'un capteur de position précis en fixant simplement sur la plateforme un capteur *exempt d'actionneur spécifique*. Quelles que soient les vibrations de cette plateforme, le détecteur d'enveloppe utilise l'information issue de la vibration. La réalisation d'un détecteur d'enveloppe est aussi simple qu'efficace. Le démodulateur présenté sur la figure 2.60c peut être utilisé dans des conditions d'éclairage artificiel. Le filtre en peigne supprime toutes les fréquences multiples de 50Hz. Le fondamental et les 3 premières harmoniques de l'éclairage artificiel sont alors supprimés en totalité : la fréquence d'échantillonnage de 500Hz a pour effet de replier l'harmonique à 300Hz sur 50Hz. De même pour l'harmonique à 400Hz qui se replie sur 150Hz. Le filtre est suivi d'un opérateur de *valeur absolue*. Cet opérateur, suivi du filtre passe-bas, permet d'extraire l'enveloppe du signal. Le choix de la fréquence de coupure du filtre passe-bas résulte d'un compromis entre le bruit acceptable sur la mesure finale et la dynamique d'évolution de la mesure. Dans les expériences décrites en 2.69 & 2.70 (p.143), qui seront détaillées plus tard, cette fréquence de coupure est fixée à 10Hz.

2.5.7 Résultats expérimentaux

Propriétés remarquables du capteur

Le capteur VODKA présente une dizaine de propriétés intéressantes et étonnantes :

1. Une caractéristique statique *impaire* (symétrique), *monotone*, *quasi-linéaire* dans sa partie centrale, avec une assez *large plage de mesure* relativement à l'angle interrécpteur
2. Une *hyperacuité*, caractérisée ici par la faculté de pouvoir localiser la position angulaire d'un contraste avec une finesse bien meilleur que l'angle interrécpteur $\Delta\varphi$
3. Une *insensibilité au contraste m*
4. Une *insensibilité à la luminance* moyenne de l'environnement
5. Une *insensibilité au papillotement* introduit par l'éclairage artificiel
6. Une *insensibilité à la polarité d'un bord contrasté* : clair suivi de sombre ("off") ou sombre suivi de clair ("on")
7. Une *insensibilité à la polarité d'une barre contrastée* : barre claire sur fond sombre ou sombre sur fond clair
8. Une *mesure rafraîchie de façon continue*
9. Un *faible retard sur la mesure*
10. Une *grande simplicité* (sa réalisation n'exigeant que 3.3% d'un microcontrôleur dsPIC 30f4013 cadencé à 20 Millions d'Instructions Par Seconde (MIPS))

Nous détaillons ci-dessous ces propriétés remarquables.

Un capteur de caractéristique statique impaire et monotone

La caractéristique statique du capteur VODKA pour un bord contrasté (fig.2.65 p.135) ou pour une barre (fig.2.66 p.137) est impaire et symétrique, comme le prévoyait l'étude théorique (eq 2.54 & eq 2.55). Cette réponse impaire et monotone du capteur permet de déterminer, sans aucune ambiguïté, la position réelle du bord contrasté ou de la barre, à partir de la mesure relevée.

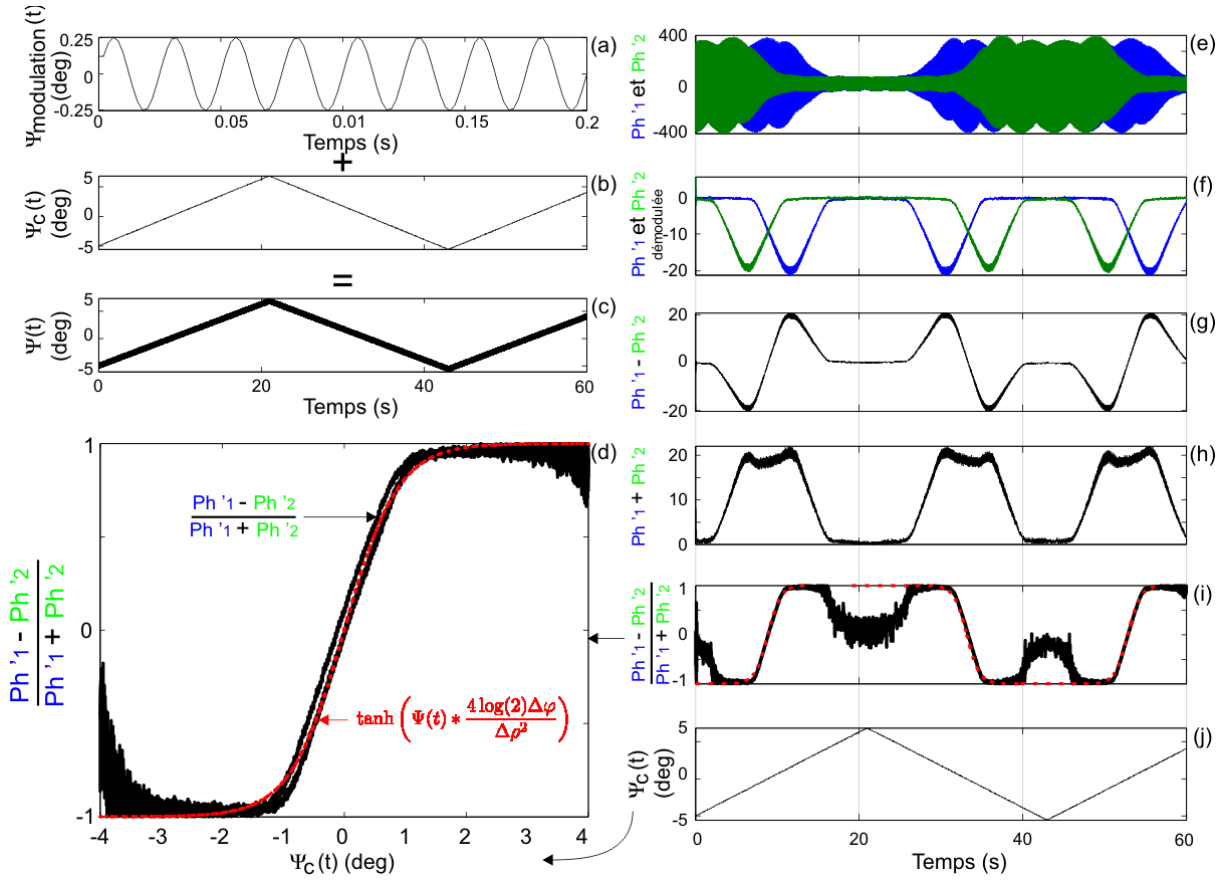


Fig. 2.61: Simulation basée sur des données réelles avec utilisation d'une *détection synchrone*. Les axes optiques sont translatés sinusoidalement selon la fonction de modulation $\Psi_{mod}(t)$ montrée en (a) ($40Hz$, faible amplitude : 0.25°). Comme sur les figures 2.58 et 2.57, la courbe (b) montre la position relative du contraste par rapport à la bissectrice des axes optiques *au repos*. La courbe (c) montre la même position relative du contraste par rapport à la bissectrice des axes optiques, lorsque la vibration (courbe a) *est active*. Les signaux analogiques issus des photodiodes sont filtrés par le pseudo dérivateur analogique décrit à la section 2.2.2, avant d'être numérisés. Les courbes (e) montrent le résultat de la numérisation de $Ph'_1(t)$ et $Ph'_2(t)$. Une démodulation et un filtrage numérique sont effectués sur ces signaux. Les courbes (f) montrent le résultat de cette démodulation. On récupère l'amplitude du signal modulé sur $Ph'_1(t)$ et $Ph'_2(t)$. Les courbes (g) (h) et (j) montrent respectivement la différence des amplitudes, leur somme et le rapport de la différence sur la somme. Ce même rapport est encore tracé sur la courbe (d) en fonction de la position relative du bord contrasté Ψ_c . La courbe rouge est le résultat théorique. *Paramètres identifiés de l'optique* : $\Delta\rho = 3^\circ$, $\Delta\varphi = 2.87^\circ$, échantillonnage à $500Hz$, fonction de modulation : sinus à $40Hz$, amplitude 0.25° , éclairage ambient : (lampes néon classiques).

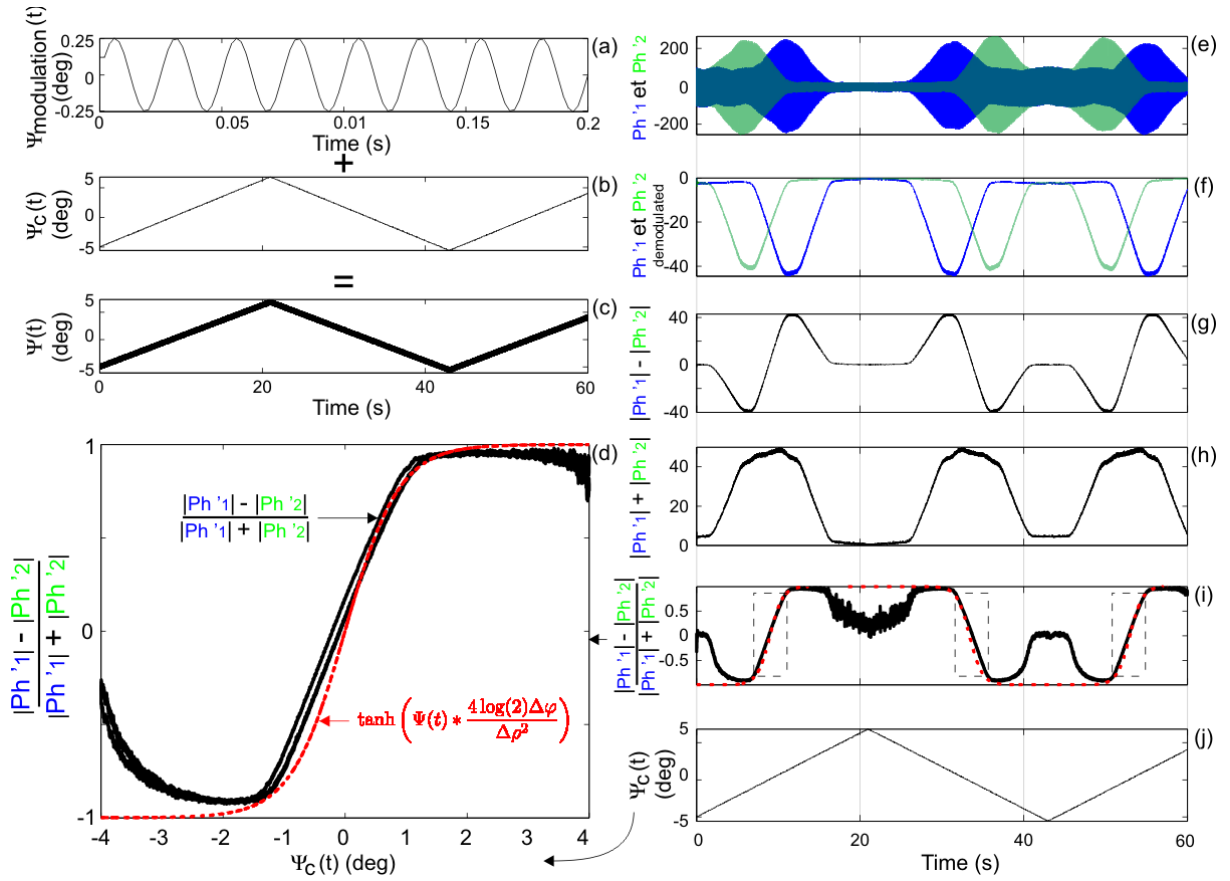


Fig. 2.62: Simulation basée sur des données réelles avec utilisation d'une *détection synchrone*. Identique à la figure 2.61 mais avec, ici, un éclairage DC au lieu de l'éclairage artificiel au néon. Paramètres optiques identifiés sur le dispositif : $\Delta\rho = 3^\circ$; $\Delta\varphi = 2.87^\circ$.

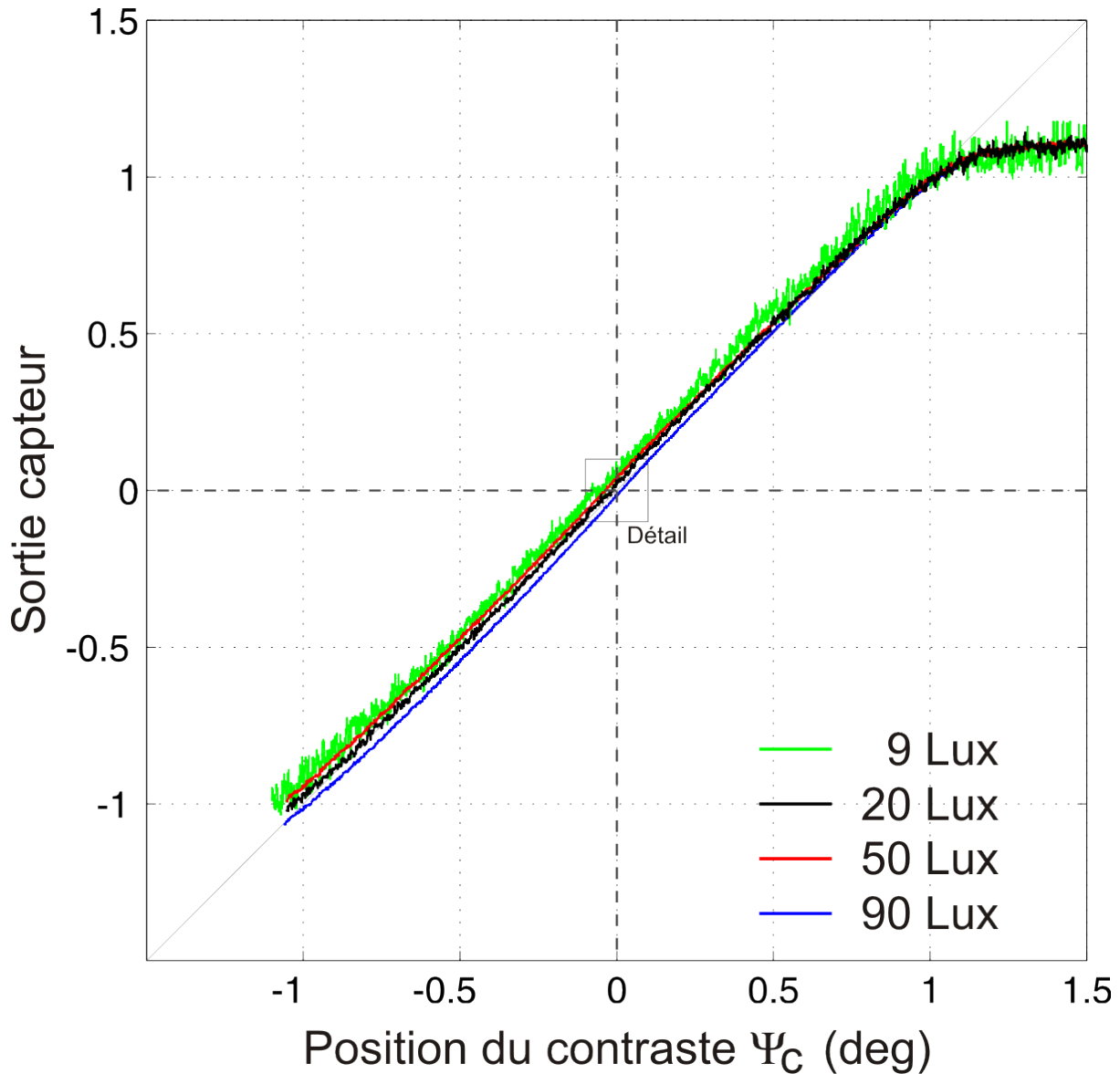


Fig. 2.63: Caractéristique statique *réelle* du capteur optique de position angulaire VODKA (réalisé avec un microcontrôleur dsPIC30f4013), pour quatre éclairagements ambiants (9, 20, 50 et 90 Lux). Le graphe trace la sortie du capteur en fonction de la position Ψ_c du bord contrasté dans son champ visuel. La caractéristique statique a été obtenue en translatant pas à pas le bord contrasté horizontalement devant le capteur. La caractéristique statique obtenue est monotone et quasi-linéaire. Une étude additionnelle a montré que la valeur finale se maintient jusqu'à $\pm 3^\circ$ lorsque le contraste sort du champ de mesure. On constate que le capteur est peu sensible à l'éclairage ambiant (qui varie ici d'une décade). La réponse obtenue à l'intérieur du carré central est magnifiée à la fig. 2.64 (intervalle $[-0.1^\circ \ 0.1^\circ]$). Paramètres optiques identifiés sur le dispositif : $\Delta\rho = 3^\circ$; $\Delta\varphi = 2.87^\circ$.

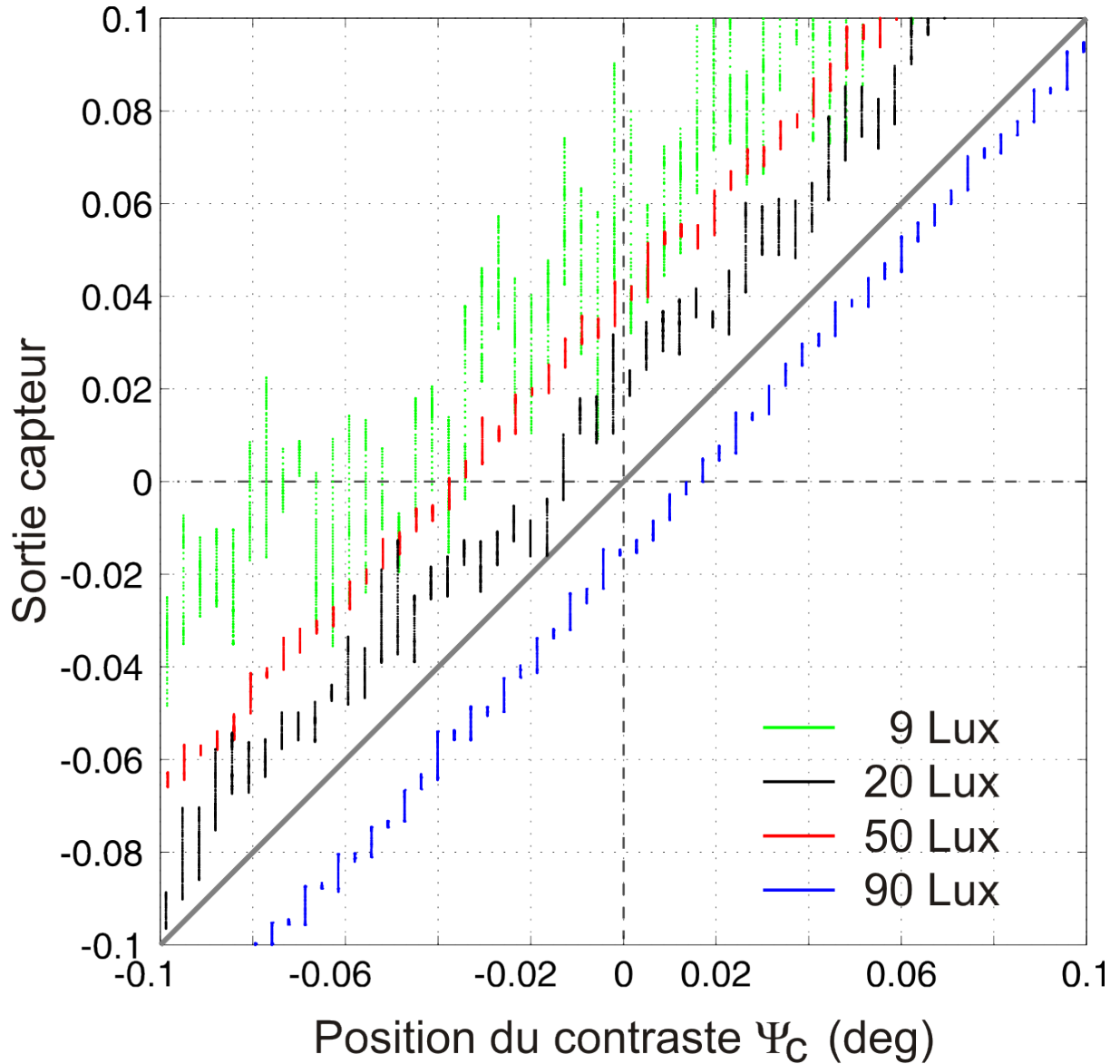


Fig. 2.64: Détail de la caractéristique statique du capteur **VODKA** dans un intervalle limité à $[-0.1 \ 0.1]^\circ$ (correspondant à la partie centrale de la figure 2.63), pour quatre éclairagements ambiants (9, 20, 50 et 90 Lux). Les sauts horizontaux correspondent aux micro-pas de déplacement du bord contrasté (déplacé de $62\mu\text{m}$ à chaque pas, ce qui, à une distance de 1m, correspond à un déplacement angulaire de 0.0036°). Les traits verticaux sont constitués des valeurs mesurées à chaque pas. On voit qu'à 90 Lux, les mesures effectuées permettent de dissocier sans ambiguïté deux positions du bord contrasté séparées de seulement 3 micro-pas, équivalents à $3 * 0.0036^\circ = 0.0108^\circ$. Le capteur conduit donc à une amélioration de la résolution par un facteur 265 par rapport à sa résolution statique ($\Delta\varphi = 2.87^\circ$). A 9 lux par contre, il faut au moins 12 micropas (soit 0.043° pour que le capteur puisse dissocier sans ambiguïtés deux positions distinctes du bord contrasté, ce qui limite le facteur d'hyperacuité à : $\frac{2.87}{0.043} = 66$). Paramètres optiques du dispositif : $\Delta\rho = 3^\circ$; $\Delta\varphi = 2.87^\circ$.

Hyperacuité (métrologie fine avec un actionneur)

Les figures 2.63 (p.130) et 2.64 (p.131) présentent la caractéristique statique du capteur obtenue en plaçant un bord contrasté en maints endroits du champ visuel (en fait, on déplace très lentement le bord contrasté par micro-pas). Le capteur est immobile et son actionneur (ici, une lame piézo-électrique) fait vibrer ses deux axes optiques sinusoidalement à $40Hz$, à très faible amplitude (0.2° crête-à-crête).

luminance	écart moyen inter-groupe en milli-degrés	écart type σ en milli-degrés	écart moyen en milli-degrés	Etendue en milli-degrés
9 Lux	3.43 [-84.25 67.93]	11.73 [1.79 49.66]	1.15 [0.18 4.87]	38.7 [7.51 137.0]
20 Lux	3.55 [-29.12 25.45]	3.87 [0.77 16.95]	0.38 [0.076 1.67]	12.64 [3.20 49.20]
50 Lux	3.45 [-6.39 11.64]	1.88 [0.23 7.33]	0.18 [0.023 0.72]	6.00 [1.04 19.40]
90 Lux	3.56 [-4.21 9.79]	1.59 [0.15 5.37]	0.16 [0.014 0.53]	4.93 [0.61 14.30]

Tab. 2.4: Récapitulatif des performances du capteur de position **VODKA**. Le tableau présente les caractéristiques des mesures présentées sur les figures 2.63 et 2.64 (p.130 & 131). Le bord contrasté est déplacé très lentement par pas de 0.0036° . 104 mesures de la sortie du capteur de position (fonctionnant dans le dsPIC 30f4013) sont enregistrées via l'**UART** à chaque micro-pas de ce bord contrasté. On ne prend en compte ici que les échantillons correspondant à une position du bord contrasté $\Psi_c \in [-1^\circ 1^\circ]$. Cet intervalle est représenté par 559 positions distinctes du bord contrasté. On appelle x_i^n les échantillons (indexés par $n \in [0 103]$), mesurés pour la position $i \in [0 558]$ du bord contrasté. L'écart moyen inter-position est : $(\bar{x}_{i+1} - \bar{x}_i)$. L'écart type σ est calculé pour chaque position i comme : $\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_n (x_i^n - \bar{x}_i)^2}$. L'écart moyen est calculé pour chaque position i comme : $\frac{1}{n} \sum_n |x_i^n - \bar{x}_i|$. L'étendue est la plage de sortie correspondant à chaque position i : $(\max_n(x_i^n) - \min_n(x_i^n))$. Moyenne, valeur min et valeur max, calculées sur les caractéristiques pour chaque position i , sont reportées dans le tableau. Le premier nombre est la moyenne, suivi entre crochets de la valeur max et la valeur minimum : *Moyenne* [*Val_{Min}* *Val_{Max}*]. Toutes les valeurs sont reportés en milli-degrés.

Sur le tableau 2.4, l'écart moyen inter-groupe varie très légèrement (quelques dixièmes de millième de degrés) en fonction de la luminance. Cette variation s'explique par la très légère variation de la plage de mesures du capteur. On voit sur la figure 2.63 que à l'indice

-1° , les quatre caractéristiques présentent un très léger décalage alors qu'à l'indice 1° , ce décalage est presque nul.

Insensibilité à la valeur m du contraste du bord contrasté :

La figure 2.65 présente les résultats expérimentaux obtenus pour deux valeurs de contraste $m = 0.085$ et $m = 0.0045$. Rappelons que le contraste m est défini comme le rapport de la différence sur la somme des luminances I_1 et I_2 mesurées sur chacune des deux surfaces délimitant le bord contrasté.

$$m = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \quad (2.56)$$

Ici, nous avons pris soin de mesurer les luminances I_1 et I_2 avec la même photodiode (boîtier Ic-Haus sur la fig.2.4b p.21) que celles utilisées par le capteur VODKA lui-même, afin de déterminer le contraste vrai dans la bande spectrale utilisée par le capteur (le contraste m pouvant varier selon la zone spectrale dans lequel la mesure est effectuée).

La courbe en gris clair de la figure 2.65 montre la caractéristique statique du capteur pour un bord de très faible contraste ($m = 0.0045$), tout à fait invisible à l'œil nu. On constate qu'en dépit du faible contraste de l'objet, ce dernier est détecté, et sa position est encore repérée avec précision dans un champ de $[-1^\circ +1^\circ]$. La caractéristique du capteur à ce faible contraste reste très proche de la caractéristique obtenue pour un bord de contraste élevé ($m = 0.85$). On observe cependant des défauts aux abscisses négatives sur la caractéristique correspondant au contraste de 0.045. Ces défauts s'expliquent vraisemblablement par le fait qu'une plage de luminance légèrement inhomogène a pénétré dans le champ visuel de l'une des deux photodiodes. A de si faibles niveaux de contraste (0.045), la moindre inhomogénéité de luminance sur l'une des surfaces délimitant le bord contrasté (tel un reflet à peine perceptible à l'œil) peut être détectée et perturber la mesure.

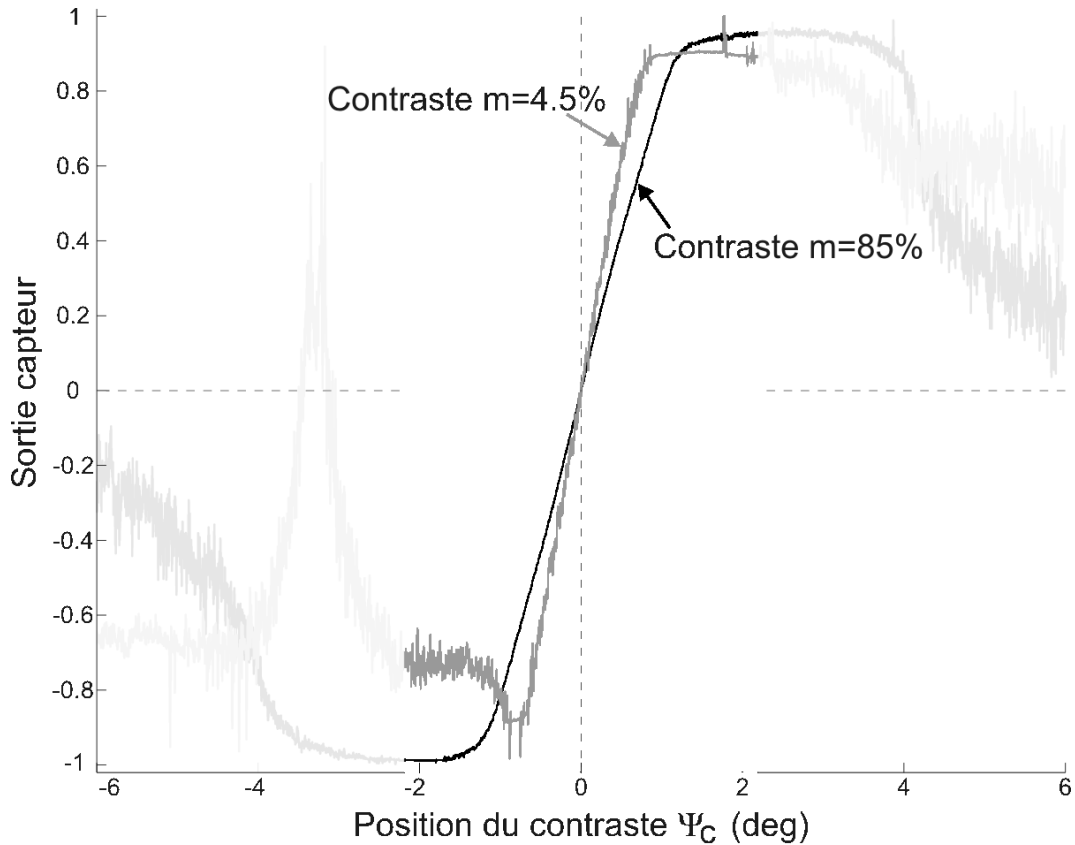


Fig. 2.65: Résultats expérimentaux montrant la robustesse du capteur au contraste m du bord contrasté. La caractéristique statique est mesurée pour deux bords contrastés très différents (contraste $m = 0.85$: courbe noire ; contraste $m = 0.0045$: courbe grise). La mesure du contraste a été effectuée avec la même photodiode (fig.2.4b) que celles du capteur VODKA, assurant ainsi un contraste vrai dans le spectre même utilisé par le capteur. La caractéristique statique théorique du capteur face à un bord contrasté (fig.2.71) est ici vérifiée par les mesures. Cette caractéristique statique du capteur ne varie presque pas, malgré le changement important du contraste. La caractéristique du capteur relative au contraste $m = 0.0045$ semble entachée d'erreurs (voir partie gauche). Elles proviennent vraisemblablement du fait que de faibles variations de luminances (dues à des contrastes invisibles à l'œil mais visibles par le capteur) sont entrées malencontreusement à la périphérie du champ visuel. Pour mémoire, le capteur OSCAR (voir 2.4 p.76) avait été testé pour des bords contrastés et des barres dont le contraste m ne descendait pas en dessous de 0.12 [Viollet 01].

Insensibilité à la luminance

Le bruit généré par les photodiodes dépend de la luminance. Bien qu'une faible partie de ce bruit se retrouve à la sortie S_{VODKA} du capteur, on constate que la position angulaire mesurée est assez insensible aux variations de luminance. La figure 2.64 (p.131) présente le résultat expérimental de la localisation d'un bord contrasté à des niveaux de luminance s'étendant sur une décade. Ces résultats sont détaillés et quantifiés dans le tableau 2.4 (p.132).

Ces deux propriétés d'invariance de la mesure à l'*éclairage* et au *contraste* (m) sont intrinsèques au principe du capteur VODKA. Le corollaire en est que le système ne nécessite aucun circuit de Contrôle Automatique de Gain.

Insensibilité à la polarité du contraste de la barre par rapport au fond

Le capteur est insensible à la polarité du contraste de la barre (barre noir sur fond clair ou blanche sur fond noir). Deux bords contrastés de polarités opposées (“on” ou “off”) sont localisés de façon identique, sans que le capteur ait besoin de détecter la véritable polarité du contraste. De même, la caractéristique du capteur pour une fine barre verticale

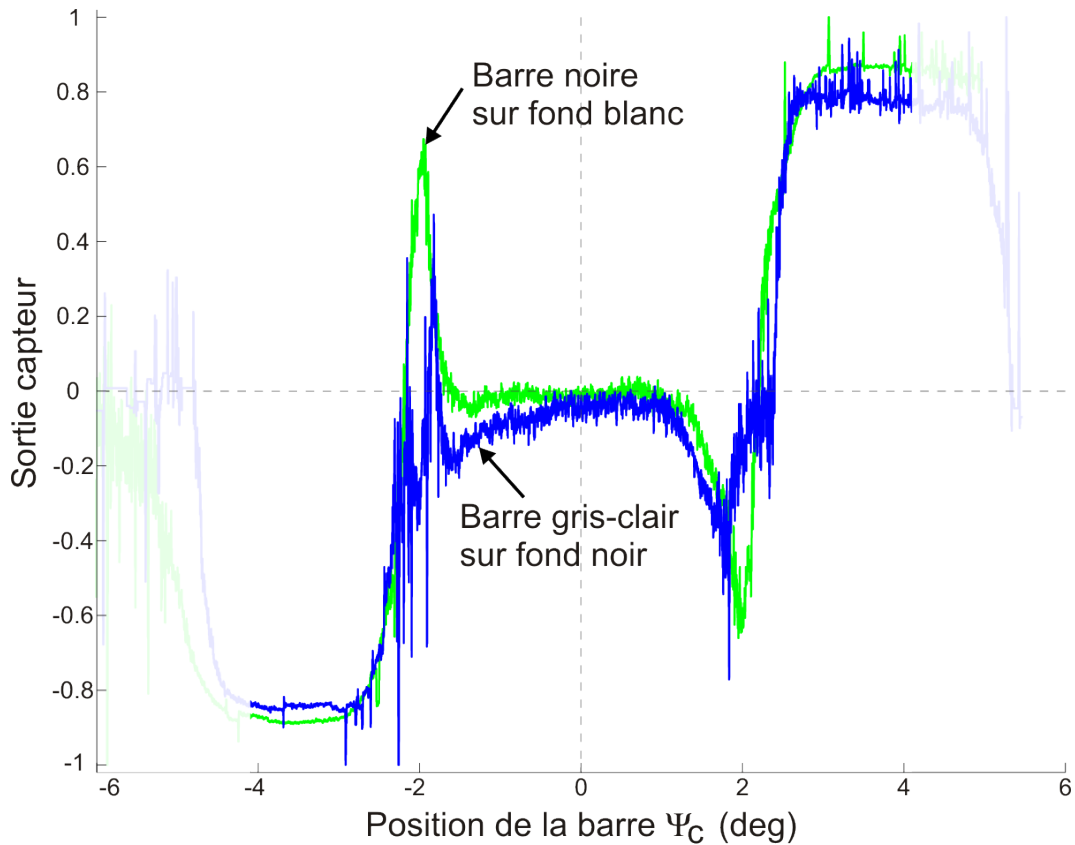


Fig. 2.66: Deux caractéristiques statiques mesurées pour deux barres dont les contrastes sont inversés. La caractéristique bleue est la sortie du capteur (calculée par le microcontrôleur) lorsqu’une barre claire sur fond noir (largeur 0.5mm , distance 1m , angle sous-tendu 0.26°) est tradatée devant le dispositif (éclairage ambiant : 100Lux). La courbe verte est la sortie du capteur lorsqu’une barre noire sur fond clair (de même largeur) est tradatée devant le dispositif (éclairage ambiant plus faible : 50Lux , pour éviter que le fond clair ne sature les photodiodes). On constate que malgré l’inversion de polarité du contraste, les deux caractéristiques se superposent largement, illustrant l’insensibilité du capteur à la polarité du contraste. La caractéristique théorique (fig.2.71 p.148) est sensiblement identique.

2.5 DES CAPTEURS VISUELS MINIMALISTES

ne fait aucune distinction entre une barre claire sur fond sombre et une barre sombre sur fond clair. La figure 2.66 présente la caractéristique du capteur pour une barre sombre sur fond clair (courbe vert clair) et pour une barre claire sur fond sombre (courbe bleue).

Rafraîchissement et retard de la mesure

La figure 2.67 présente la caractéristique statique simulée du capteur *VODKA* placé face à un bord contrasté. Les signaux visuels issus des deux photodiodes sont simulés à partir de l'équation (eq. 2.10 p.28). Le filtre analogique décrit au paragraphe 2.2.2 (p.40) est simulé dans le domaine continu. La simulation considère un bord contrasté que l'on

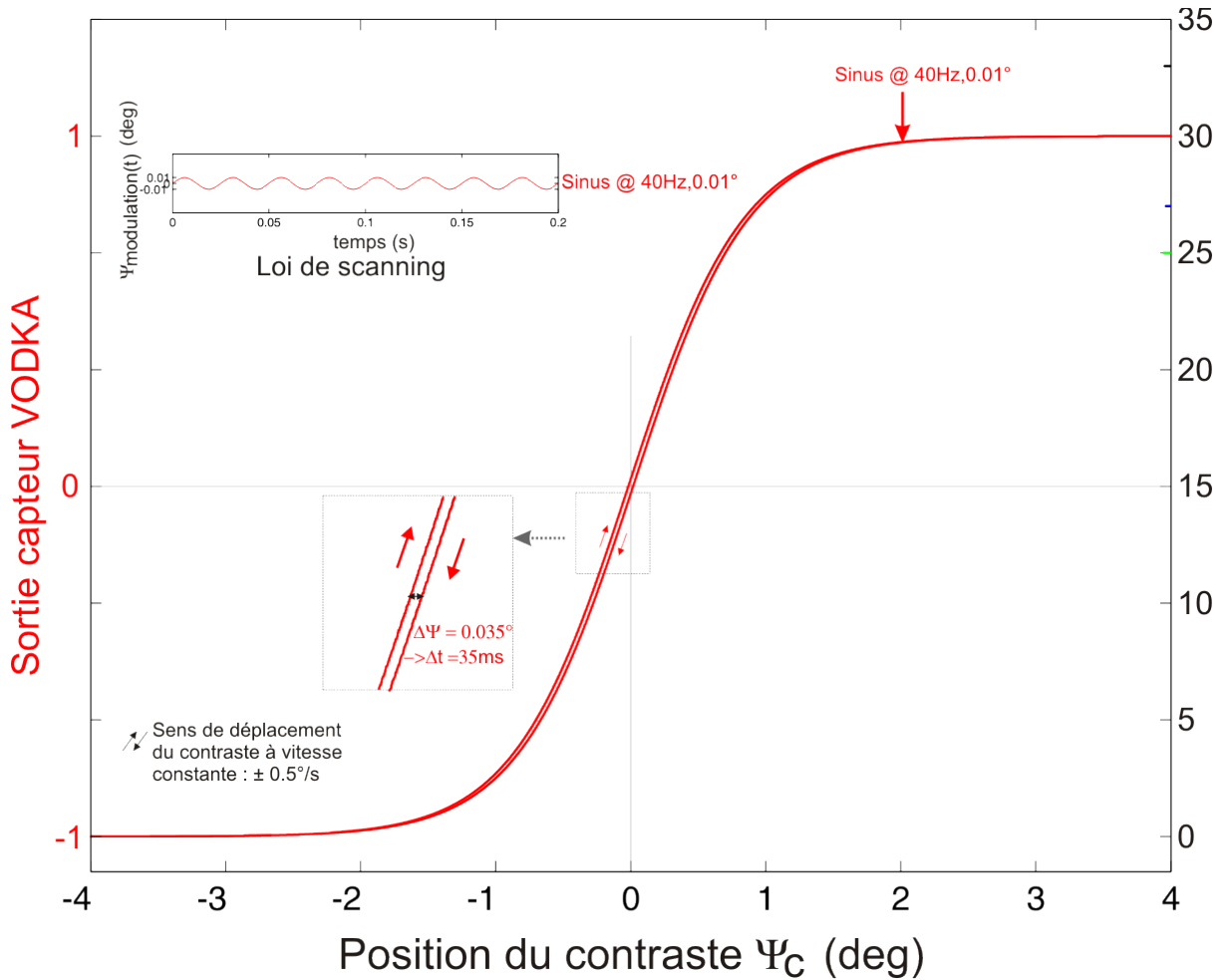


Fig. 2.67: Caractéristique statique *simulée* du capteur *VODKA*. Un bord contrasté est translaté devant le dispositif à vitesse angulaire lente et constante ($v_{contraste} = \pm 0.5^\circ/s$), dans un sens puis dans l'autre. Les deux petites flèches au long de la courbe indiquent le sens de déplacement du contraste lors de la mesure. Le décalage observé entre les mesures effectuées dans un sens et dans l'autre est dû au retard introduit par la mesure elle-même. Ce retard s'obtient par : $\frac{\Delta\psi}{2*|v_{contraste}|}$. Le retard de mesure est ici de 35ms. Paramètres du capteur simulée : $\Delta\rho = 2.6^\circ$, $\Delta\varphi = 2.87^\circ$.

translate dans un sens à vitesse constante puis dans le sens opposé à la même vitesse. On constate que la caractéristique du capteur présente une légère hystérésis. Cette hystérésis est imputable au retard pur de la mesure du capteur [VODKA](#) et elle permet ici de déterminer avec précision ce retard. Graphiquement, on peut lire indirectement un retard qui n'est que de $35ms$ pour ce capteur (la distance séparant les deux courbes est de 0.035° . Cette distance correspond à deux fois la distance parcourue à vitesse $v_{contrast} = 0.5^\circ.s^{-1}$ pendant le retard pur de la mesure).

2.5.8 Guidage visuel d'un robot aérien sans actionnement spécifique

Le capteur optique de position **VODKA** décrit ci-dessus présente l'énorme avantage de pouvoir fonctionner en exploitant la *microvibration aléatoire* de son support. Il est donc possible d'utiliser, par exemple, les vibrations propres de la plateforme mobile sur laquelle il est monté, plutôt que d'utiliser un actionneur dédié ayant pour charge de faire vibrer les deux axes optiques. Le robot OSCAR II que nous avons construit et sur lequel nous reviendrons plus en détail au chapitre suivant, est présenté sur la figure

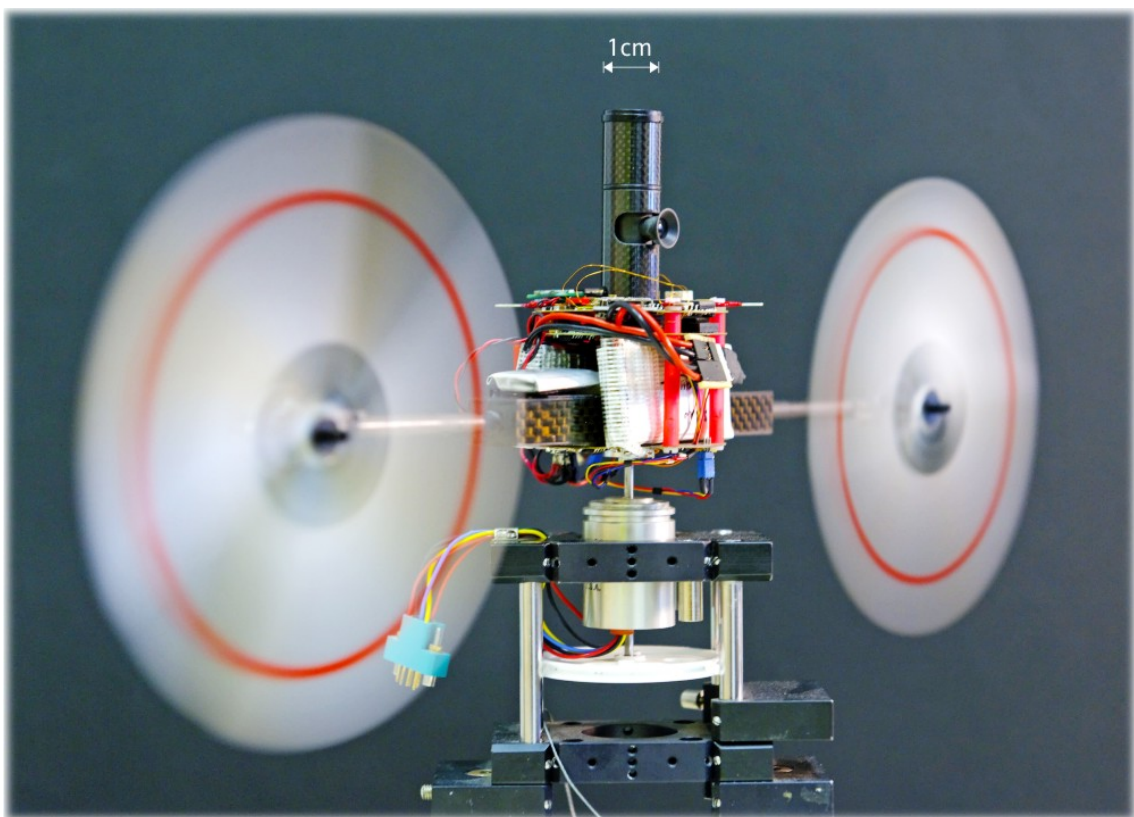


Fig. 2.68: Photo du robot OSCAR II qui s'oriente en lacet à partir de ce qu'il voit (fig.2.69 et fig.2.70 p.143), en commandant ses hélices de manière différentielle. Le robot est monté sur un *resolver* à très faible friction, qui le rend libre de tourner sur son axe de lacet. Le resolver permet de mesurer à haute résolution (0.022°) l'orientation angulaire du robot. L'actionneur piézo-électrique supportant les deux photodiodes est ici totalement inactif. Le capteur **VODKA** se contente d'exploiter les microvibrations propres (aléatoires) de la plateforme, engendrées par ses hélices et par les turbulences de l'environnement.

2.68. Il s'oriente en appliquant une commande différentielle à ses deux hélices. Le capteur visuel **VODKA**, utilisé sur ce robot, exploite les vibrations propres *engendrées par le robot lui-même*. La figure 2.69 illustre la fixation d'une cible fixe (bord contrasté) durant deux minutes. La figure 2.70 montre que le robot est capable, grâce au capteur **VODKA** exploitant les vibrations propres du robot, de suivre cette même cible lorsqu'on la déplace sinusoïdalement.

La caractéristique statique du capteur utilisant la vibration propre de la plateforme (ici, du robot) ne peut pas être relevée simplement car cela nécessiterait de bloquer mécaniquement l'orientation du robot, ce qui aurait pour effet de supprimer ou de modifier les vibrations bénéfiques qu'il engendre. Le bon fonctionnement du capteur **VODKA**, dans ces conditions, fait appel à une démonstration *comportementale* du robot équipé de ce capteur. On va voir que le robot est capable de maintenir son cap en direction d'un bord contrasté fixe ("Fixation visuelle" fig.2.69), et de suivre ce bord contrasté lorsqu'on le translate horizontalement ("Poursuite fine" fig.2.70).

Fixation visuelle. La planche 2.69 présente les résultats d'une expérience de fixation visuelle avec le capteur **VODKA** équipant la plateforme aérienne OSCAR II. Monté sur l'axe d'un *resolver* à très faible friction et à haute résolution (0.02°), le robot est libre de tourner autour de son axe de lacet. Il s'oriente en commandant de manière différentielle la vitesse de ses deux hélices, à partir de ce que lui dicte sa vision. Un bord contrasté fixe est placé devant lui. L'éclairage artificiel (néon) génère une modulation parasite de l'intensité lumineuse à 100Hz , bien décelable sur les signaux dérivés Ph'_1 et Ph'_2 des deux photodiodes (fig.2.69a p.143 ; l'amplitude de cette modulation est plus élevée sur Ph'_2 car l'axe optique de cette photodiode est situé du côté clair du bord contrasté). Cette modulation à 100Hz , ainsi que ses harmoniques : 200Hz , puis 300Hz replié dans 50Hz , puis 400Hz replié dans 150Hz , sont visibles sur le spectrogramme de la photodiode Ph'_1 (fig 2.69b). Toutes ces fréquences perturbent la mesure de position du contraste et sont supprimées par le filtre en peigne (voir fig.2.60c). Le seul signal restant sur Ph'_1 et Ph'_2 est celui généré par la vibration propre du robot. Cette vibration angulaire est mesurée par un micro-gyromètre dont le spectrogramme de sortie est présenté en (c) (Notons que ce gyromètre n'est utilisé que pour visualiser la vibration du robot et n'intervient aucunement dans le capteur **VODKA**). Le spectrogramme des deux photodiodes filtrées (non montré ici) est *identique* au spectrogramme du gyromètre, à *un gain près*. Ce gain, différent pour chacune des deux photodiodes, dépend de la position relative du contraste par rapport à l'axe optique de chaque photodiode (eq 2.42). Le démodulateur présenté sur la figure 2.60c, placé dans le schéma global du capteur de la figure 2.59, approxime le

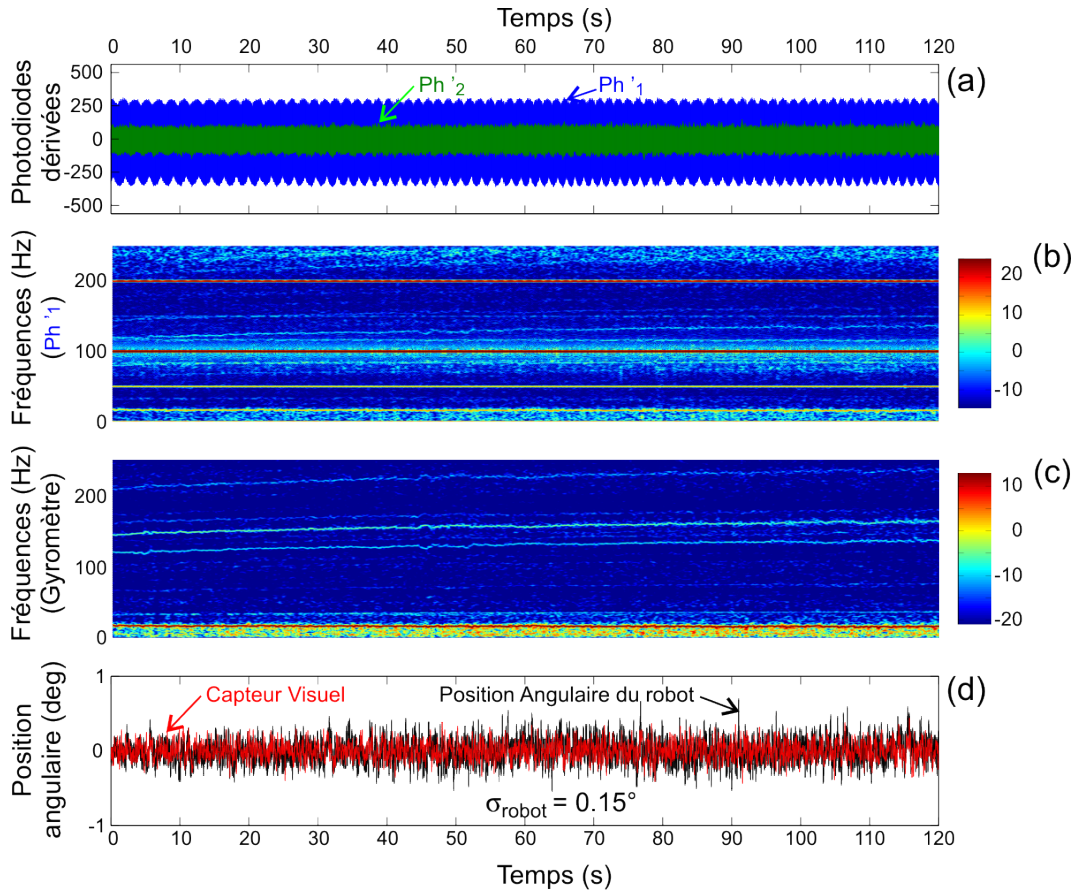


Fig. 2.69: “Fixation visuelle” d’une cible *fixe* (bord contrasté) par le robot OSCAR II équipé du capteur VODKA. Ce capteur exploite ici les vibrations naturelles aléatoires (Ψ'_{mod} est pareillement aléatoire) engendrées par les hélices du robot. L’éclairage est mixte : stores ouverts, et néons allumés. (a) est une représentation temporelle de Ph'_1 et Ph'_2 . (b) est le spectrogramme du signal Ph'_1 . On note la présence de la raie principale à $100Hz$ due à l’éclairage artificiel et à ses harmoniques. (c) est le spectrogramme d’un micro-gyromètre solidaire du robot et mesurant sa vitesse Ψ' ainsi que ses vibrations angulaires (Ψ'_{mod}). La bande passante à $3dB$ est de $40Hz$. Le trait horizontal rouge atteste de la présence d’une vibration importante du robot à $16Hz$. D’autres vibrations sont présentes, qui évoluent au cours de l’enregistrement : de 145 à $155Hz$, de 120 à $130Hz$, de 210 à $235Hz$. Ces vibrations angulaires sont visibles sur le spectrogramme de Ph'_1 (b). (d) présente en noir l’orientation azimutale du robot mesurée avec le resolver. La variance σ de la position angulaire du robot n’est que de 0.15° . La courbe rouge est la sortie du capteur VODKA mesurant la position relative du bord contrasté. Ce bord étant fixe, cette mesure visuelle représente la position angulaire du robot.

rapport de la différence sur la somme des amplitudes des signaux des deux photodiodes filtrées (rapport défini ici comme la racine carrée de l'énergie). Le résultat est l'approximation de l'angle du bord contrasté Ψ_c relativement au robot présenté sur la courbe rouge (2.69d). Le bord contrasté est fixe. L'erreur de position angulaire relative au bord contrasté estimé visuellement correspond ici à l'erreur d'orientation du robot. Ce signal d'erreur de position est utilisé par l'asservissement en cap du robot, qui permet à celui-ci de se maintenir orienté en direction du bord contrasté. La courbe noire présente l'erreur réelle de position du robot mesurée avec le resolver. Pendant cette expérience de 2 minutes, le robot a pu être perturbé par les courants d'air ambiants (climatisation, courants d'air divers). La très faible déviation de cap du robot ($\sigma = 0.15^\circ$) par rapport au bord contrasté atteste de la précision de fixation obtenue par l'asservissement visuo-moteur, dans lequel le capteur visuel **VODKA** joue le rôle essentiel.

Poursuite fine. L'expérience présentée sur la figure 2.70 montre l'utilisation du capteur visuel exploitant encore les vibrations propres de la plateforme aérienne, dans une tâche de *poursuite fine* d'un bord contrasté. Cette expérience montre la robustesse du capteur, sa précision et son insensibilité aux variations de l'éclairement.

Le robot se maintient face au bord contrasté en mouvement en contrôlant son azimuth avec ses deux hélices. Les enregistrements s'étalent sur 120 secondes. Une lampe halogène alimentée en courant continu crée une lumière artificielle d'intensité contrôlée. Cette intensité est diminuée par paliers successifs, passant successivement de 118 Lux à 50 Lux, 26 Lux et 6 Lux. Cette *diminution d'éclairement par un facteur 20* (de 118 Lux à 6 Lux) est mesurée par une photodiode (fig.2.70a). La robustesse au type d'éclairement (naturel ou artificiel) est également testée. Les tubes néon de la pièce sont allumés à l'instant 98s. Le 100Hz créé par les néons est visible à la fois sur les signaux temporels issus des photodiodes Ph'_1 et Ph'_2 (b) et sur le spectrogramme de Ph'_1 (c) (l'éclairement en Lux des néons est donné à titre indicatif, mais n'est pas comparable à celui de la lampe DC du fait de la différence spectrale entre ces deux sources d'éclairage). La courbe rouge (f) montre bien la robustesse de la mesure visuelle aux variations d'éclairement. Les micro-vibrations, créées par la propulsion à hélice du robot, sont mesurées par le gyromètre et présentées sur le spectrogramme en (d). On décèle en particulier une fréquence de vibration importante vers 16Hz, visible sur le bas du spectrogramme (ligne rouge). Ces signaux délivrés par le gyromètre ne sont aucunement utilisés par le capteur visuel **VODKA**. Les micro-vibrations du robot créent sur chaque photodiode un signal visuel qui est dérivé (Ph'_1 et Ph'_2). On voit que les fréquences visibles sur le spectrogramme du gyromètre (d) se retrouvent sur le spectrogramme de Ph'_1 (c). Les courbes (e) et (f) présentent les résultats de la poursuite.

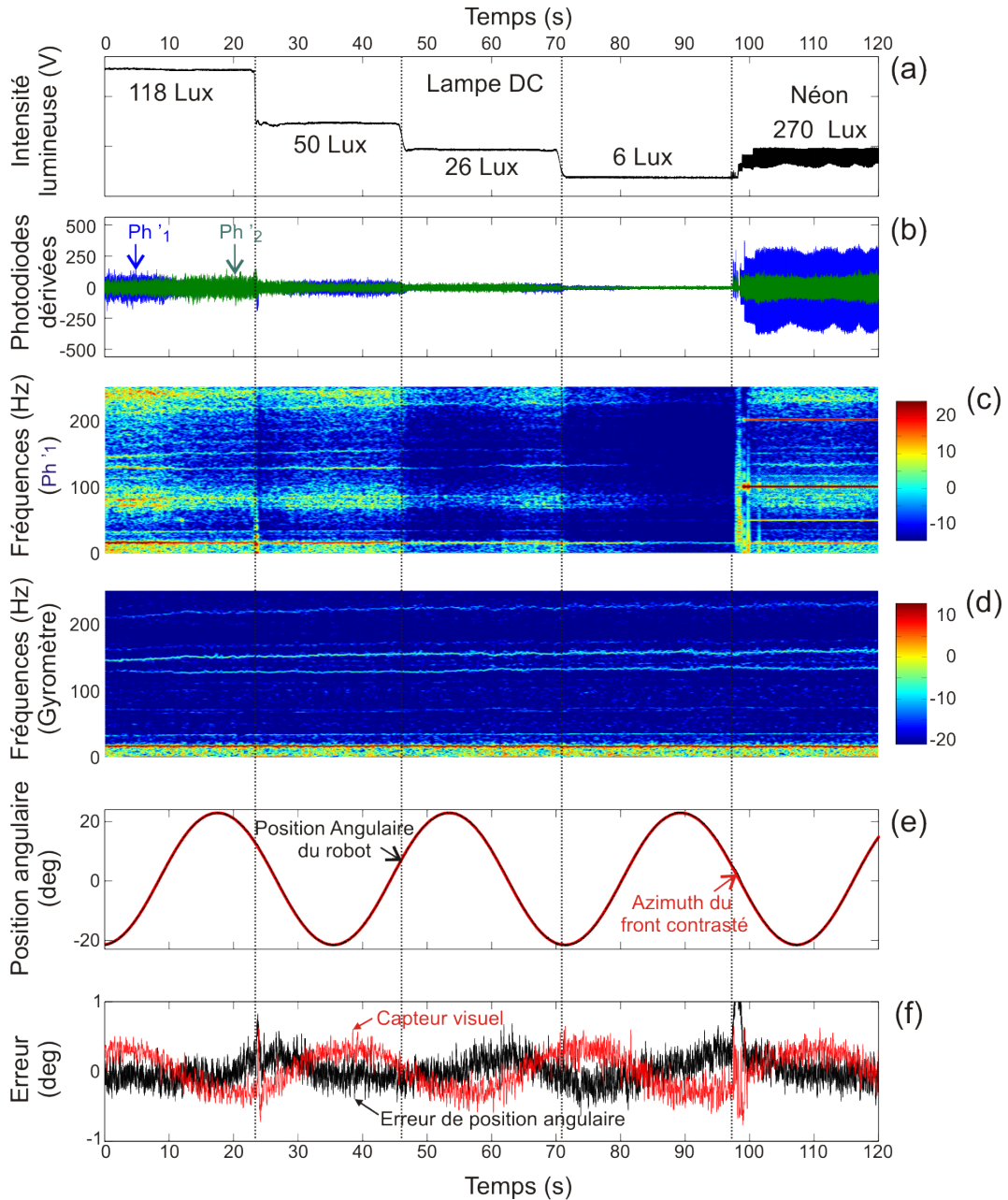


Fig. 2.70: Poursuite fine d'une cible *mobile* (bord contrasté, $m = 0.85$) par le robot OSCAR II équipé du capteur VODKA. Le dispositif expérimental est identique à celui utilisé à la fig.2.69 (p.143). Le capteur visuel exploite uniquement les vibrations engendrées par les hélices de l'appareil. Les conditions d'éclairage ont été modifiées à quatre reprises (a), passant successivement d'un éclairage continu (DC : 115 Lux, 50 Lux, 26 Lux et 6 Lux) à un éclairage artificiel (néon) de 270 Lux. (b) montre le signal des deux photodiodes dérivées (Ph'_1 et Ph'_2). (c) et (d) sont les spectrogrammes de Ph'_1 et du gyromètre. (e) présente en rouge la position angulaire absolue du bord contrasté et en noir l'orientation du robot, mesurée avec le resolver. (f) présente en rouge la mesure visuelle de la position angulaire du bord contrasté et en noir l'écart angulaire entre le robot et la cible (différence des courbes (e)). La mesure visuelle induit une poursuite précise de la cible.

(e) montre en rouge l'orientation réelle absolue du bord contrasté, et en noir l'orientation angulaire absolue du robot, mesurée avec le *resolver*. La très bonne performance de cette poursuite fine est vérifiée par la superposition de ces deux courbes (e). Les courbes (f) montre l'erreur relative, définie comme la différence entre la position angulaire du robot (mesurée avec le *resolver*) et la position angulaire réelle du bord contrasté (déterminée indirectement via la commande du moteur pas à pas). La variance de l'erreur de position est très faible ($\sigma = 0.21^\circ$). Elle correspond à l'erreur rétinienne mesurée par le capteur visuel présenté par la courbe rouge. L'erreur visuelle mesurée est en retard sur l'erreur réelle à cause de l'accélération sinusoïdale du bord contrasté. C'est ce signal d'erreur visuelle que le robot utilise pour se maintenir face au bord contrasté.

2.5.9 Variations paramétriques

Dans les paragraphes précédents, nous avons montré que le capteur de position VODKA était relativement insensible aux paramètres suivants :

- éclairement (fig.2.63 p.130 & fig.2.70(courbes a) b) et f)) p.145),
- contraste (fig.2.65 p.135),
- polarité du contraste (noir-blanc ou blanc-noir) (fig.2.66 p.137).

Les caractéristiques du capteur dépendent cependant de facteurs externes tels que :

- **la largeur de la barre** à localiser

et de paramètres intrinsèques au capteur comme

- **l'optique** dont le principal paramètre est le rapport $\frac{\Delta\rho}{\Delta\varphi}$,
- **l'amplitude** A du balayage Ψ_{mod} .

Nous allons maintenant décrire les effets de ces trois paramètres.

Effet de la largeur de la barre

La figure 2.71 présente une *étude paramétrique* sur l'effet de la largeur de la barre. Les tracés sont les caractéristiques théoriques du capteur pour une barre (eq 2.55 p.114), dont l'angle sous-tendu varie ici de 0.01° (rouge) à 10° (violet). Sur une barre "large" (par exemple 10°), le capteur mesure indépendamment les deux fronts de contraste définissant la barre, l'un positif, l'autre négatif. Pour une barre d'angle sous-tendu 10° , la fonction tanh (eq 2.54) apparaît pour chacun des deux fronts ($\pm 5^\circ$). Les caractéristiques statiques individuelles correspondant à ces deux fronts de contraste sont reliées par une autre fonction dans l'intervalle $\pm 1.435^\circ$. Cet intervalle correspond à $\pm \frac{\Delta\varphi}{2}$. La caractéristique dans l'intervalle $\pm \frac{\Delta\varphi}{2}$ est strictement décroissante lorsque l'angle sous-tendu par la barre est supérieur à 3° . Une portion de cette caractéristique devient croissante pour des angles sous-tendus inférieurs à 3° . L'étude paramétrique du paramètre $\Delta\rho$ sur la caractéristique du capteur face à une barre fine (fig.2.74 p.153) montre la possibilité d'obtenir une caractéristique presque monotone, avec deux discontinuités à $\pm \frac{\Delta\varphi}{2}$.

La figure 2.72 présente les *relevés expérimentaux* des caractéristiques du capteur pour trois *barres* de largeurs différentes (angle sous-tendu de 0.26° :noir , 0.52° :jaune et 1.56° :vert ; la courbe gris clair montre pour comparaison, la caractéristique statique type pour un bord contrasté). On voit que les caractéristiques prédites par la théorie (eq 2.55 tracée sur la figure 2.71) se vérifient. En particulier, la partie de la caractéristique située entre $\pm \frac{\Delta\varphi}{2}$ est monotone décroissante pour la barre la plus large (angle sous-tendu ici $\geq 1.56^\circ$) mais

qu'elle se renverse pour devenir non monotone lorsque l'angle sous-tendu par la barre diminue.

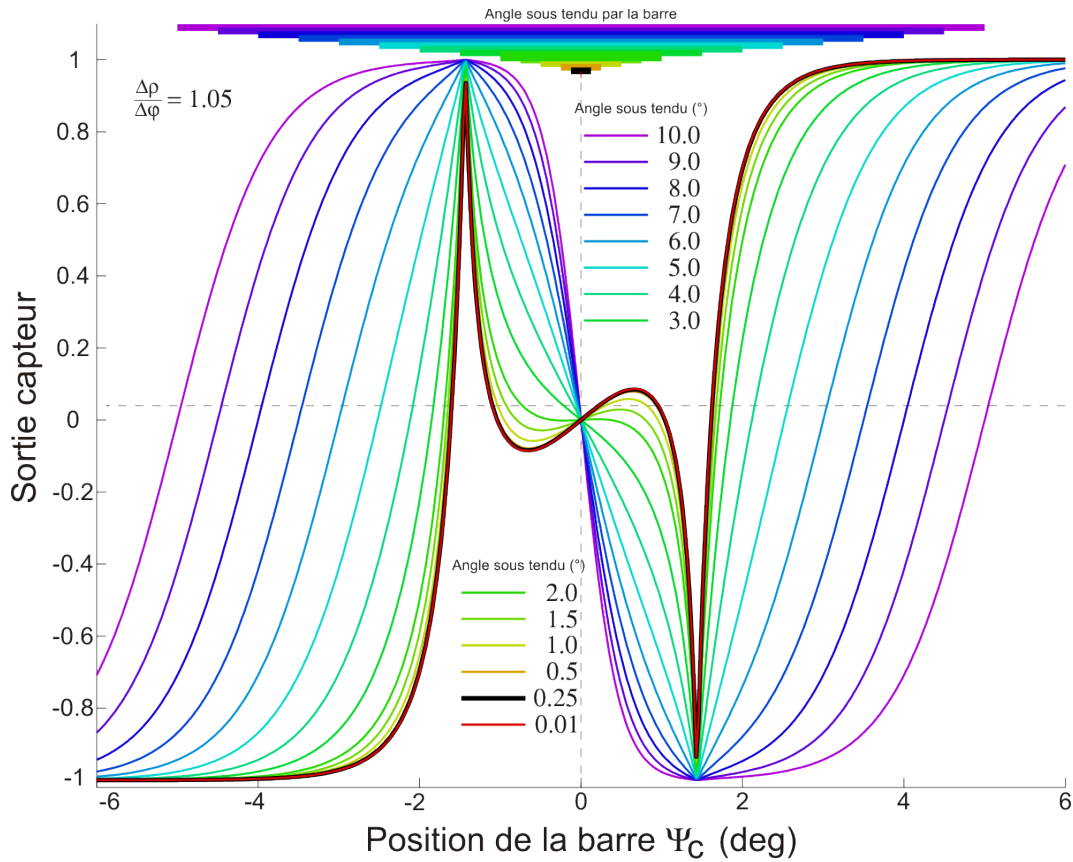


Fig. 2.71: Caractéristiques statiques *théoriques* du capteur **VODKA** face à une *barre* de largeur L . L'angle sous-tendu par la barre est fonction de sa largeur L et de sa distance au capteur. Il varie ici de 0.01° à 10° . Les courbes sont le résultat du rapport de la soustraction sur la somme des signaux dérivés des deux photodiodes (2.43). Les paramètres utilisés ici sont $\Delta\varphi = 2.87^\circ$ et $\Delta\rho = 3^\circ$. Pour de grandes largeurs de barres ($> 8^\circ$), on commence à reconnaître la caractéristique correspondant à un bord. Dans le cas d'une barre de 10° on reconnaît la fonction \tanh (eq 2.54), centrée en -5 et 5 . L'évolution de la caractéristique, à mesure que l'angle sous-tendu par la barre diminue, montre qu'il est impossible d'obtenir une caractéristique strictement monotone, par suite des deux pics latéraux naissant de la présence de deux fronts de contrastes de sens opposées, si rapprochés soient-ils. Lorsque l'angle sous-tendu diminue, la caractéristique converge, et toutes les caractéristiques correspondant à des angles sous-tendus inférieurs à 0.5° sont confondues.

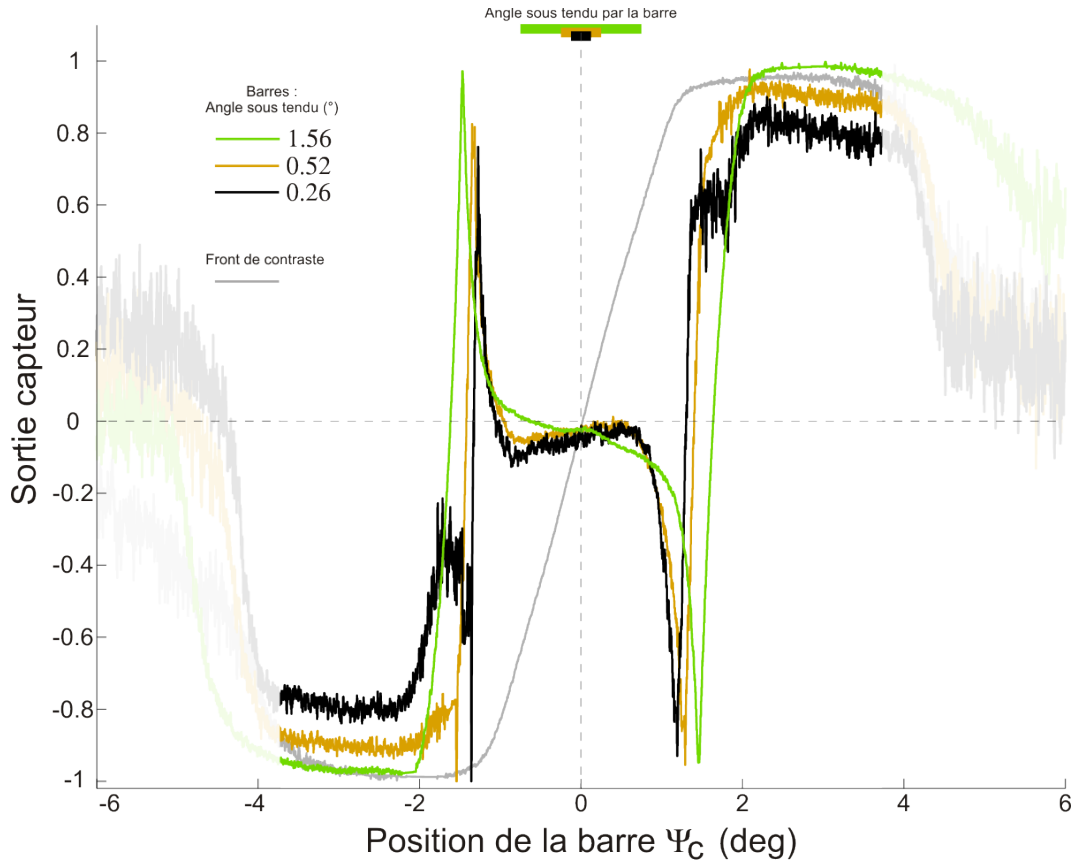


Fig. 2.72: Caractéristique statique *mesurées* du capteur VODKA pour des barres de trois largeurs différentes. Un chariot supportant un carton de couleur claire et uniforme, au milieu duquel figure une barre verticale sombre, est translaté par micro-pas devant le capteur visuel VODKA (voir fig.3.9 p.187). Les paramètres du système optique sont ceux identifiés au paragraphe 2.1.3 : $\Delta\rho = 3^\circ$ et $\Delta\varphi = 2.87^\circ$. Le capteur est distant de $1,10m$ de la cible. Trois barres de même couleur ont été successivement localisées lors des trois mesures effectuées. La largeur des barres était respectivement de $0.25cm$, $0.5cm$ et $3cm$ (les angles sous-tendus sont respectivement de 0.26° , 0.52° et 1.56°). On retrouve la forme des caractéristiques statiques théoriques qui ont été présentées sur la figure 2.71 pour les angles 0.25° , 0.5° et 1.5° . On voit notamment que les caractéristiques des barres sous-tendant un angle de 0.26° et de 0.52° sont presque confondues. La quatrième mesure (en gris clair) est celle d'un bord contrasté, effectuée dans les mêmes conditions d'éclairage, pour permettre de comparer les caractéristiques statiques relatives aux *barres* et aux *bords*.

Effet du paramètre optique $\frac{\Delta\rho}{\Delta\varphi}$

Rappelons que le paramètre $\Delta\rho$ est ajustable par défocalisation du système optique (distance capteur-lentille). Quant au paramètre $\Delta\varphi$, il dépend de l'espacement des capteurs optiques (pitch) et aussi de la distance capteur-lentille. Le capteur optique utilisé (fig.2.4b p.21) est un boîtier contenant plusieurs photodiodes, dont l'espacement n'est évidemment pas ajustable. La distance capteur-lentille est donc l'unique variable d'ajustement pour les deux paramètres $\Delta\rho$ et $\Delta\varphi$. Les éléments de l'optique (écart inter-récepteur et distance focale) définissent l'espace des $\Delta\rho$ et $\Delta\varphi$ atteignables. Le paragraphe 2.1.3 p.23 a expliqué la méthode d'identification des paramètres $\Delta\rho$ et $\Delta\varphi$ permettant de les régler par essais successifs.

Les relevés expérimentaux que nous avons présentés dans ce chapitre ont tous été réalisés avec le même capteur optique décrit au paragraphe 2.1.3 (p.23). Le robot aérien OSCAR II, dont la construction s'est avérée délicate, ne permet pas de modifier simplement les paramètres optiques ($\Delta\rho$ et $\Delta\varphi$). Ces paramètres optiques ont été fixés (voir paragraphe 2.1.3 p.25) une fois pour toutes et il n'était pas question d'effectuer des relevés expérimentaux avec d'autres paramètres optiques. Comme il existe une très bonne adéquation entre les caractéristiques statiques mesurées et les caractéristiques statiques théoriques utilisant les paramètres optiques identifiés (Planches 2.61 et 2.62; fig.2.55 p.112 et 2.65 p.135; fig.2.56 p.115 et 2.66 p.137), nous nous appuyerons désormais en partie sur les résultats théoriques pour déterminer le fonctionnement d'un capteur dont les paramètres optiques seraient différents.

La figure 2.73 présente la caractéristique statique théorique du capteur VODKA face à un *bord contrasté* lorsque $\frac{\Delta\rho}{\Delta\varphi}$ varie dans l'intervalle [0.5 2]. On constate que la caractéristique s'aplatit nettement lorsque $\frac{\Delta\rho}{\Delta\varphi}$ augmente. Un rapport $\frac{\Delta\rho}{\Delta\varphi}$ élevé conduit donc à une large gamme de mesure, avec un gain faible dans la zone centrale. À l'inverse, un rapport $\frac{\Delta\rho}{\Delta\varphi}$ petit conduit à une gamme de mesure réduite, avec un gain très important dans la zone centrale, c'est-à-dire au voisinage de l'axe optique moyen du capteur.

La figure 2.74 présente la caractéristique statique du capteur face à une *barre fine* (angle sous-tendu de 0.01°). On constate ici que le paramètre $\frac{\Delta\rho}{\Delta\varphi}$ influe encore plus sur la mesure de position d'une barre fine que sur la mesure de position d'un bord contrasté, comme le montre la comparaison des figures 2.73 (bord contrasté) et 2.74 (barre). Dans l'intervalle $\pm\frac{1}{2}\Delta\varphi$, la caractéristique statique s'inverse dans le cas d'une barre. Avec $\Delta\rho =$

3° ($\frac{\Delta\rho}{\Delta\varphi} = 1.05$; courbe noire), on retrouve la caractéristique expérimentale présentée sur les figures 2.72 p.149 (courbe noire). La pente modérée au centre de la caractéristique statique, obtenue pour $\frac{\Delta\rho}{\Delta\varphi} = 1.05$ ne permet pas de mesurer avec acuité la position de la barre. Au contraire, les caractéristiques obtenues avec des rapports $\frac{\Delta\rho}{\Delta\varphi}$ plus faibles sont plus intéressantes, car elles tendent vers une fonction presque monotone. Les deux pics latéraux (situés à $\pm\frac{1}{2}\Delta\varphi$) deviennent de plus en plus fins. De plus, la comparaison des figures 2.73 et 2.74 montre que la réduction de $\frac{\Delta\rho}{\Delta\varphi}$ rend la caractéristique statique du capteur face à une *barre* équivalente à sa caractéristique face à un *bord contrasté*. Les deux caractéristiques face à une barre et face à un bord contrasté sont comparées pour $\frac{\Delta\rho}{\Delta\varphi} = 0.70$ sur les pages 154 et 155. Cette condition inespérée se traduit, certes, par un rétrécissement du champ visuel du capteur, mais par un gain important au voisinage de son axe de visée.

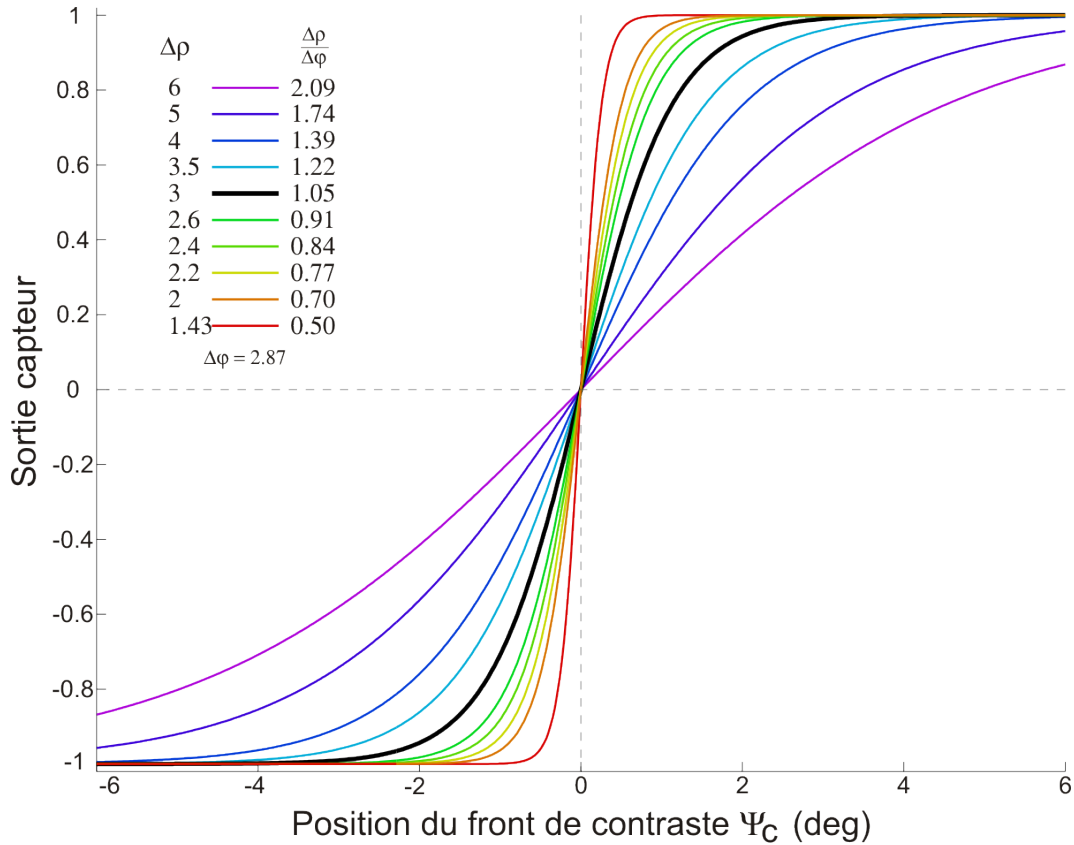


Fig. 2.73: Effet théorique du rapport $\frac{\Delta\rho}{\Delta\varphi}$ (voir fig.2.53 p.105) sur la localisation d'un *bord contrasté* (on-off, ou off-on). Les courbes sont le résultat du rapport de la soustraction sur la somme des signaux *dérivés* des deux photodiodes (eq 2.43 p.109), dont le résultat est la fonction \tanh (eq 2.54 p.113). Pour tous les tracés, on a $\Delta\varphi = 2.87^\circ$, et l'on fait varier $\Delta\rho$ de telle sorte que le rapport $\frac{\Delta\rho}{\Delta\varphi}$ varie dans $[0.5 \ 2]$. On constate que la gamme de mesure du capteur augmente avec le rapport $\frac{\Delta\rho}{\Delta\varphi}$. Lorsque la gamme de mesure est faible, le gain du capteur, autour de la position 0° est important. La courbe noire représente la caractéristique statique pour $\Delta\rho = 3^\circ$ et $\frac{\Delta\rho}{\Delta\varphi} = 1.05^\circ$, c'est-à-dire les paramètres de l'optique du robot OSCAR II.

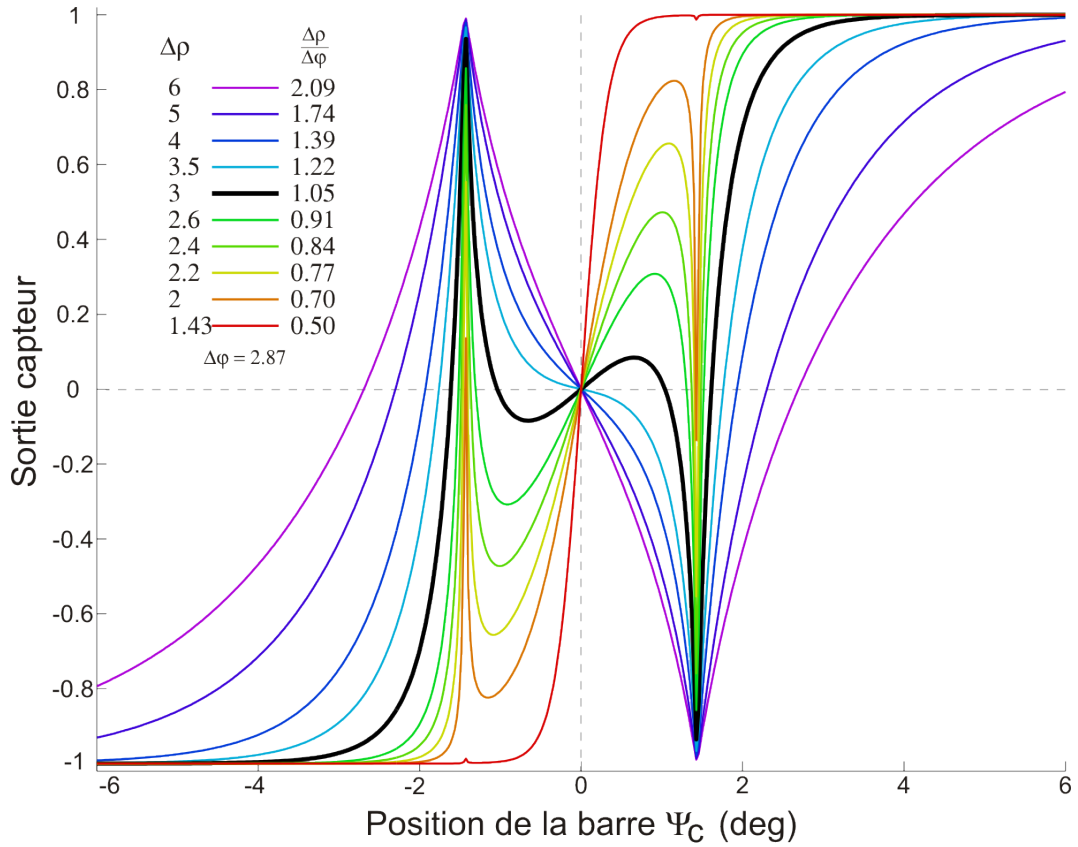


Fig. 2.74: Effet théorique du rapport $\frac{\Delta\rho}{\Delta\varphi}$ (2.1.3) sur la localisation d'une *barre* très fine (angle sous-tendu de 0.01°). Les courbes sont le résultat du rapport de la soustraction sur la somme des signaux *dérivés* des deux photodiodes (eq 2.43 p.109), dont le développement donne la relation (eq 2.55 p.114). Sur tous les tracés $\Delta\varphi = 2.87^\circ$. $\Delta\rho$ est modifié de façon à faire varier le rapport $\frac{\Delta\rho}{\Delta\varphi}$ dans l'intervalle $[0.5 \ 2]$. On voit que le rapport $\frac{\Delta\rho}{\Delta\varphi}$ a une grande influence sur la mesure effectuée. Deux pics situés à $\pm\frac{\Delta\varphi}{2}$ sont présents sur toutes ces caractéristiques. Il existe cependant un rapport $\frac{\Delta\rho}{\Delta\varphi}$ pour lequel la caractéristique face à une barre et face à un bord contrasté se ressemblent fortement. (Comparer les courbes rouges sur les fig.2.73 et 2.74).

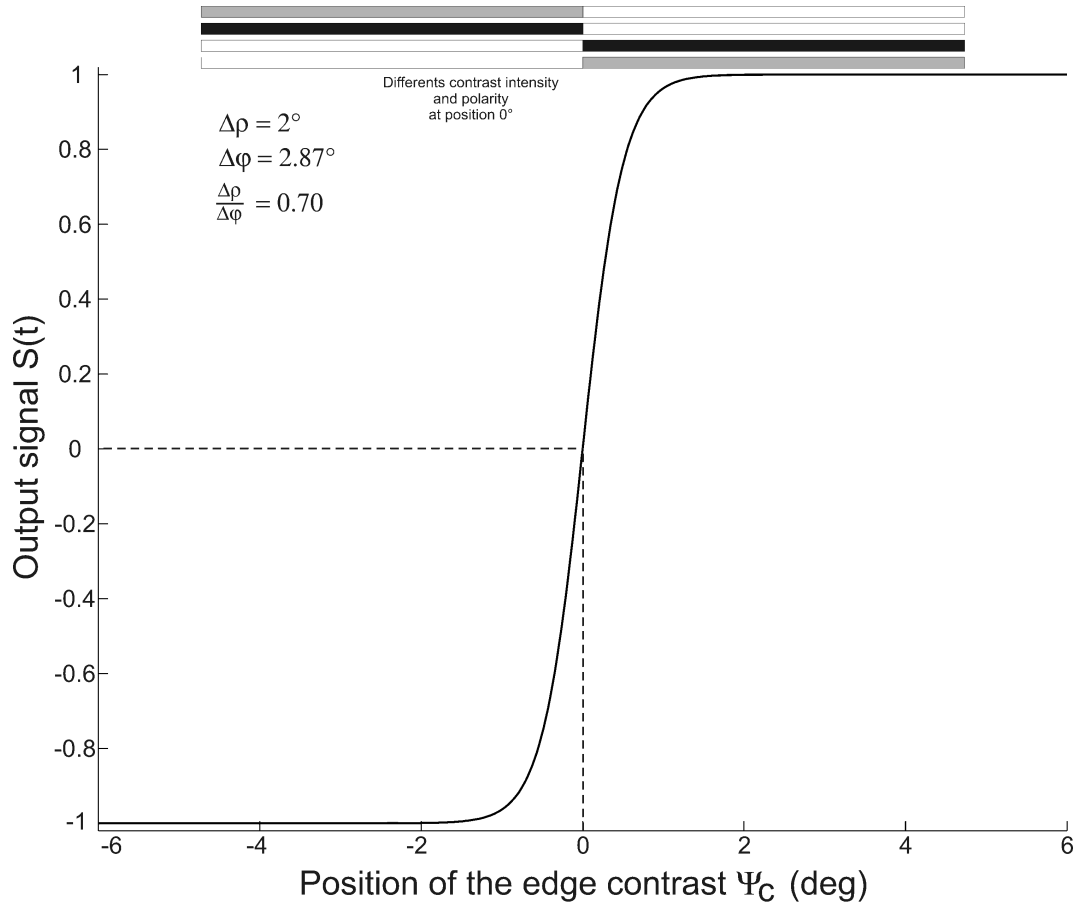


Fig. 2.75: Caractéristique statique *théorique* du capteur **VODKA** face à un *bord contrasté*. Cette caractéristique statique est la fonction tangente hyperbolique (eq 2.54). Elle est le résultat du quotient de la différence sur la somme des signaux dérivés des deux photodiodes (eq 2.43). Pour ce tracé, on a $\Delta\varphi = 2.87^\circ$ et $\Delta\rho = 2^\circ$. Le rapport $\frac{\Delta\rho}{\Delta\varphi}$ est de 0.7.

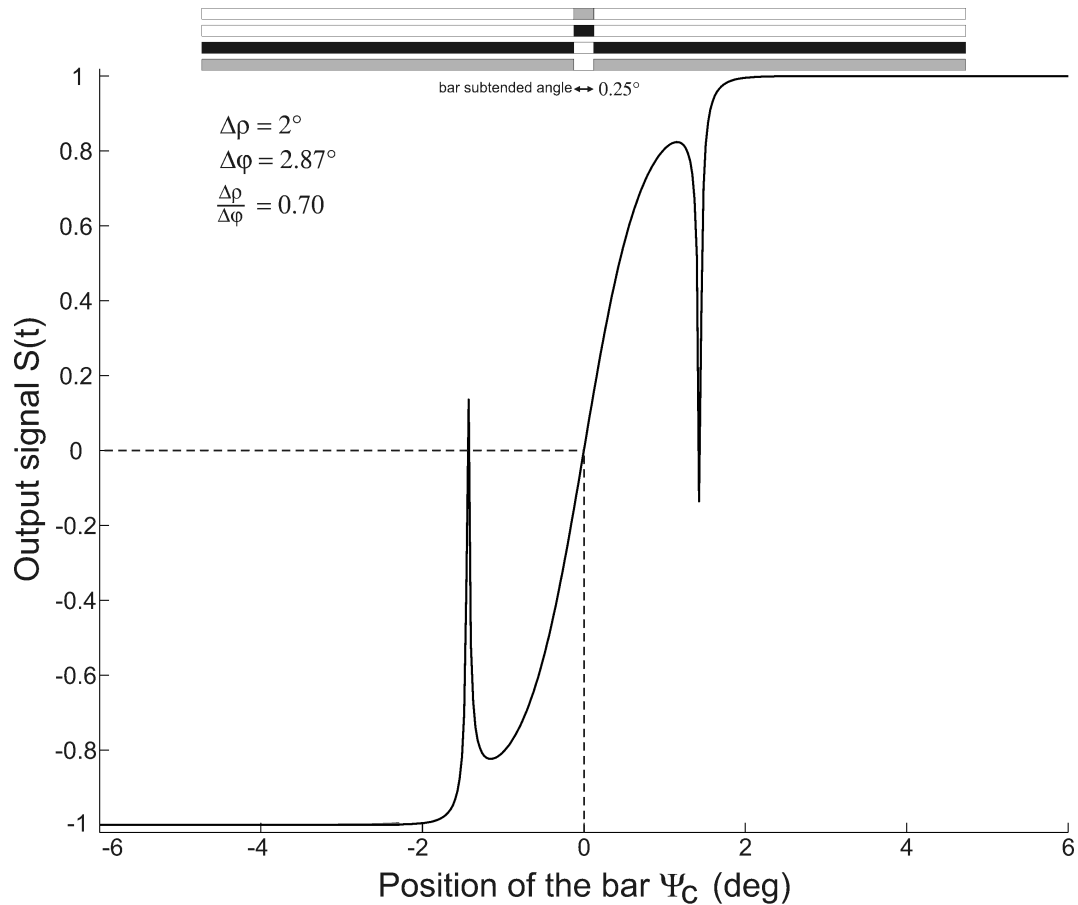


Fig. 2.76: Caractéristique statique *théorique* du capteur face à une *barre fine*, dont la largeur sous-tend un angle de 0.01° . Cette caractéristique est le résultat du quotient de la différence sur la somme des signaux *dérivés* issus des deux photodiodes (2.43). Le résultat en est la fonction donnée par l'équation (eq 2.55). Pour ce tracé, on a $\Delta\varphi = 2.87^\circ$ et $\Delta\rho = 2^\circ$. Le rapport $\frac{\Delta\rho}{\Delta\varphi}$ est de 0.7.

Effet de l'amplitude A du balayage Ψ_{mod}

Le paragraphe 2.5.3 p.109 explique le principe de fonctionnement du capteur VODKA avec l'équation (2.54). Cette modélisation supposait l'amplitude de la modulation Ψ_{mod} très faible. Les résultats de ce modèle rendent assez bien compte des mesures expérimentales obtenues. Toutefois, la caractéristique statique expérimentale de la figure 2.62 (p.129, simulation basée sur des données réelles) apparaît plus linéaire, dans l'intervalle $[-1, 1]$, que la fonction \tanh du modèle. Nous allons voir qu'un nouveau modèle prenant en compte aussi l'amplitude du balayage permet d'expliquer cette différence.

La mesure du capteur est rafraîchie à chaque période d'échantillonnage (ici $2ms$). Cette mesure est décrite par l'équation (2.54) où $\Psi(t)$ est la somme de Ψ_c et Ψ_{mod} . Sur le schéma global de fonctionnement (fig.2.59 p.122), la sortie du capteur est filtrée passe-bas (fréquence de coupure à $10Hz$). Ce filtre, situé en amont de la dernière étape de calcul, a pour effet de moyennner la sortie exprimée par (2.54). Une bonne approximation de la sortie est la moyenne temporelle de cette expression (2.54) sur une période T_Ψ du signal de modulation Ψ_{mod} (voir eq 2.44 p.109)

Le modèle proposé ici prend en compte l'amplitude du balayage A de la fonction Ψ_{mod} . On considère un balayage composé de deux phases de déplacement linéaire (balayage triangulaire) pendant lesquelles les axes optiques sont déplacés à vitesse angulaire constante. A est l'amplitude du balayage. L'amplitude crête à crête est $A_{cc} = 2A$.

La moyenne temporelle de l'expression (2.54) sur une période de Ψ_{mod} , notée T_Ψ , s'écrit :

$$\begin{aligned} \frac{Ph'_1(\Psi(t)) - Ph'_2(\Psi(t))}{Ph'_1(\Psi(t)) + Ph'_2(\Psi(t))} &= \int_0^{T_\Psi} \frac{1}{T_\Psi} \tanh\left(\Psi(t) * \frac{4 \log(2)\Delta\varphi}{\Delta\rho^2}\right) dt \\ &= \frac{1}{2A} \int_{-A}^A \tanh\left(x * \frac{4 \log(2)\Delta\varphi}{\Delta\rho^2}\right) dx \end{aligned} \quad (2.57)$$

Après simplification, (2.57) s'écrit :

$$\frac{\Delta\rho^2}{2A * 4 \log(2)\Delta\varphi} * \left(\ln \frac{\cosh\left(\frac{4 \log(2)\Delta\varphi}{\Delta\rho^2} * (\Psi_c(t) + A)\right)}{\cosh\left(\frac{4 \log(2)\Delta\varphi}{\Delta\rho^2} * (\Psi_c(t) - A)\right)} \right) \quad (2.58)$$

Cette simplification n'est possible que pour un balayage en triangle. Cependant, on suppose ici que l'amplitude du balayage aura un effet sensiblement voisin avec d'autres lois de balayage.

Il est remarquable de constater que cette expression est une version généralisée de l'équation (eq 2.54 p.113) rappelée ici :

$$S_{VODKA}(t) = \tanh \left(\Psi(t) * \frac{4 \log(2) \Delta \varphi}{\Delta \rho^2} \right)$$

On constate en effet que la limite de l'expression (2.58) tend vers (2.54) lorsque l'amplitude A tend vers 0 ($A = 0$ était l'hypothèse utilisée à l'origine, qui a permis d'arriver à l'expression 2.54).

Cette nouvelle expression (2.58) permet de tracer la caractéristique du capteur en fonction de l'amplitude A de balayage (fig.2.77 p.158).

Le paragraphe suivant étudie l'effet de l'amplitude A de la modulation, et du rapport $\frac{\Delta \rho}{\Delta \varphi}$.

Effet de l'amplitude de balayage (paramètre A)

L'amplitude A du balayage Ψ_{mod} influe sur la caractéristique statique du capteur. Le paragraphe 2.5.9 modélise le capteur en prenant en compte l'amplitude A du balayage Ψ_{mod} .

Une lame piézo-électrique impose aux photodiodes une vibration à $40Hz$ d'amplitude très petite (autour de $50\mu m$). Cet actionneur piézo est un élément fragile et son remplacement nécessiterait le démontage complet de la micromécanique du robot aérien OSCAR II. C'est la raison pour laquelle peu de tests ont été faits avec des lois de modulation

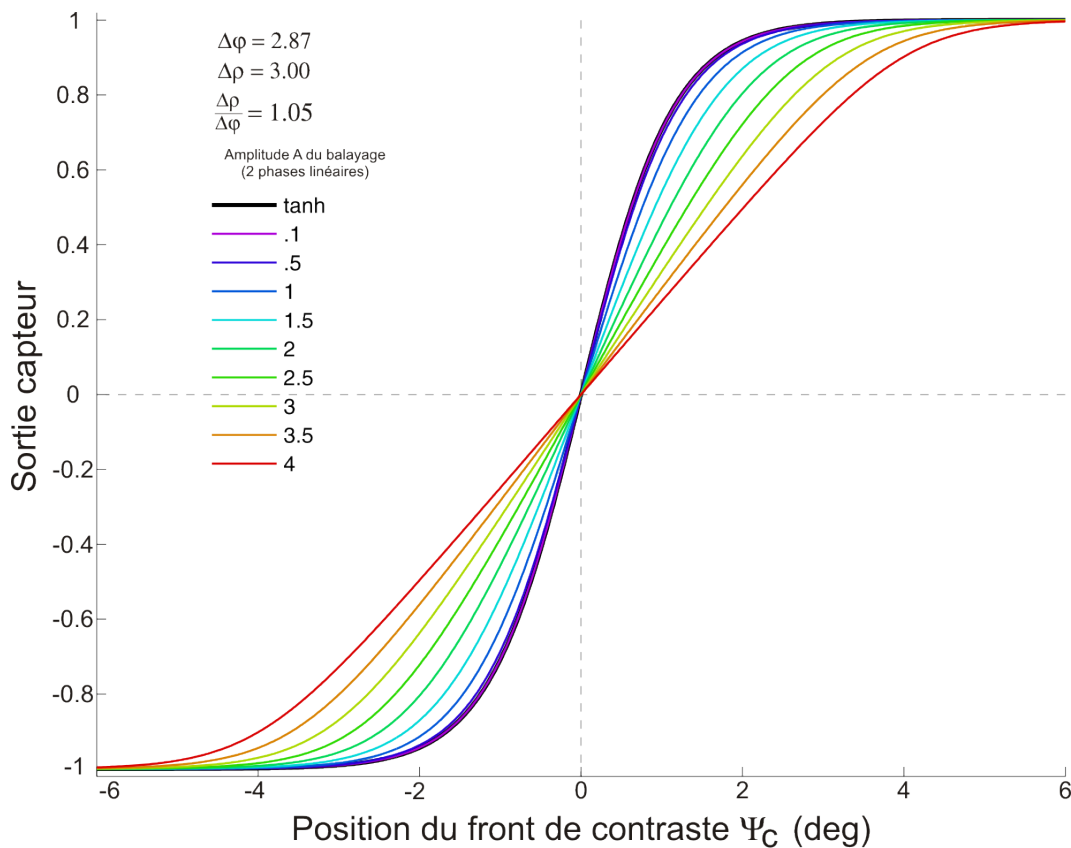


Fig. 2.77: Effet théorique de l'amplitude A du balayage Ψ_{mod} (eq 2.44) sur la caractéristique statique du capteur VODKA face à un *bord contrasté*. Le modèle utilisé est décrit au paragraphe 2.5.9 p.156 par l'équation (2.58). Les paramètres utilisés sont : $\Delta\varphi = 2.87^\circ$ et $\Delta\rho = 3^\circ$. L'amplitude du balayage A varie de 0 (courbe noire) à 4° (8° Crête-à-crête). On constate que l'augmentation de l'amplitude du balayage tend à élargir la gamme de mesure et à linéariser la caractéristique statique du capteur.

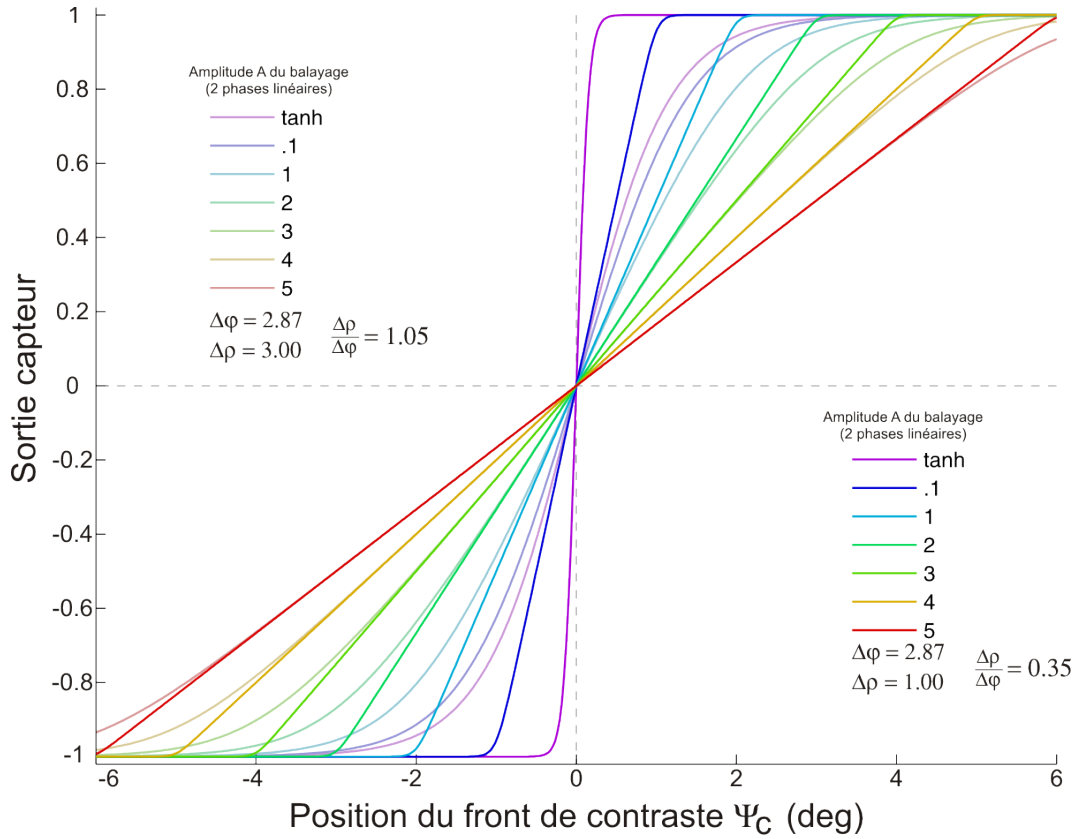


Fig. 2.78: Effet théorique de l'amplitude A du balayage Ψ_{mod} (eq 2.44) et de l'angle d'acceptance $\Delta\rho$ sur la caractéristique statique du capteur VODKA face à un bord contrasté. Les courbes de la figure 2.77, avec $\Delta\rho = 3^\circ$ sont reprises ici en couleurs claires. On leur superpose les courbes correspondant aux mêmes amplitude A de balayage mais avec un $\Delta\rho$ beaucoup plus faible ($\Delta\rho = 1^\circ$) en couleurs vives. Les deux caractéristiques rouge clair et rouge vif (respectivement $\Delta\rho = 3^\circ$ et $\Delta\rho = 1.00^\circ$ se superposent (A grand) alors que les caractéristiques violet clair et violet vif sont différentes (A petit). L'augmentation de l'amplitude de balayage A diminue donc l'influence du paramètre $\Delta\rho$ (ou $\frac{\Delta\rho}{\Delta\varphi}$) sur la caractéristique statique du capteur.

mécaniquement contraignantes, afin de préserver l'intégrité mécanique de la plateforme.

L'augmentation de l'amplitude de balayage à trois effets intéressants sur la caractéristique statique du capteur face à un bord contrasté :

1. il augmente la gamme de mesure (de la même façon que $\Delta\rho$, fig.2.73)
2. il linéarise la mesure
3. il rend la caractéristique statique invariante au paramètre $\Delta\rho$

La linéarisation de la caractéristique statique se vérifie sur les caractéristiques relevées expérimentalement (fig.2.62 p.129, 2.63 p.130 et 2.65 p.135). L'indépendance au paramètre optique $\Delta\rho$ peut rendre le capteur encore plus robuste. Cependant, ces propriétés sont obtenues sous l'hypothèse que le balayage est périodique et constitué de deux phases linéaires. Cette indépendance de la caractéristique statique du capteur à la loi de balayage est perdue lorsque l'amplitude A du balayage $\Psi_{mod}(t)$ est grande (eq 2.54 p.113).

L'indépendance de la mesure à la loi de balayage Ψ_{mod} permet d'utiliser la vibration naturelle d'un engin aérien pour effectuer une mesure de position angulaire, et partant de cette mesure, un guidage visuel précis.

2.5.10 Comparaison des capteurs visuels OSCAR & VODKA

Le capteur OSCAR mis au point au laboratoire il y a une dizaine d'années et le capteurs VODKA présenté ici sont deux capteurs de *position angulaire* dotés d'*hyperacuité*. Tous deux, en effet, permettent de localiser un bord contrasté avec une résolution bien meilleure que ne le laisserait prévoir leur angle interrcepteur élevé ($\Delta\varphi = 2.87^\circ$). La différence de principe fondamentale entre ces deux capteurs est qu'OSCAR mesure un *décalage temporel* entre les signaux issus des deux photodiodes et déduit de cette mesure temporelle la *position angulaire* de la cible. Le capteur VODKA, au contraire, déduit la position angulaire de la cible à partir d'une *différence d'amplitude entre les variations de signal sur ses deux photodiodes*.

Le principe de fonctionnement du capteur VODKA lui confère un double avantage. D'une part, ses contraintes de mise en oeuvre sont réduites et sa réalisation en est d'autant simplifiée. D'autre part, ses performances sont meilleures à maints égards que celles d'OSCAR.

Faibles contraintes de mises en oeuvre

La réalisation matérielle (mécanique-électronique) et logicielle du capteur est peu contraignante. On va voir que les quatres contraintes suivantes sont considérablement relâchées, sinon supprimées :

- loi de balayage,
- conformité du balayage,
- amplitude du balayage,
- vitesse de calcul.

Contrainte sur la loi de balayage : La loi de balayage du capteur peut être :

- une fonction périodique : sinus (fig.2.61 p.128) ; triangle (fig.2.58 p.118),
- une fonction apériodique,
- une fonction connue,
- une fonction inconnue et aléatoire tel qu'un bruit (fig.2.69 p.143),
- un balayage propre (vibration) de l'objet observé lui-même, totalement indépendant du capteur.

Les contraintes sur la loi de balayage sont donc supprimées.

Contrainte sur la conformité du balayage des deux axes optiques : Le capteur de position OSCAR se basait sur le balayage de ses axes optiques à une vitesse prédéfinie. La précision finale du capteur était directement liée à la précision sur la vitesse de balayage effectuée par les deux axes optiques. Cette contrainte forte sur la précision impose l'utilisation d'un actionneur à la fois rapide et précis pour que le mouvement des axes optiques soit parfaitement conforme à la consigne imposée. Dans les dernières réalisations du capteur OSCAR [Viollet 05], l'actionneur utilisé était une lame piézo-électrique assurant une excellente conformité du déplacement à la consigne de balayage. Cet actionneur était cependant volumineux et fragile, nécessitant une alimentation stabilisée haute tension ($\pm 30V$), contraignante à embarquer à bord d'un Micro Véhicule Aérien. Sur le capteur VODKA, *la précision de la mesure angulaire ne dépend pas de la conformité à une forme de vibration particulière, et les contraintes sur l'actionneur utilisé (rapidité, précision, conformité) sont donc supprimées.*

Contrainte sur l'amplitude du balayage des axes optiques : Le principe de fonctionnement du capteur OSCAR mettait en correspondance un même bord contrasté vu successivement par les deux photodiodes. Les deux axes optiques étant séparés de l'angle $\Delta\varphi$, le balayage des axes optiques devait avoir une amplitude au moins égale à $\Delta\varphi$ ($\approx 3^\circ$) pour qu'un même contraste soit vu successivement par chacune des deux photodiodes (dans [Viollet 04], le balayage était de 7.5° pour un $\Delta\varphi$ de 2.8°). Le capteur VODKA permet au contraire d'effectuer une mesure de position angulaire aussi bien avec un balayage de grande amplitude (6° sur la figure 2.77) ou de faible amplitude (micro-balayage de quelques dixièmes de degré seulement sur la figure 2.69). *La contrainte sur l'amplitude de la vibration des axes optiques est donc supprimée.*

Contrainte sur la vitesse du calculateur : La résolution angulaire du capteur OSCAR était limitée par la finesse de mesure du décalage temporel Δt entre les deux signaux visuels. Un capteur de position basé sur ce principe voit sa résolution augmenter avec la résolution temporelle du traitement des signaux donc avec la fréquence d'échantillonnage. Cette *dualité fréquence d'échantillonnage-résolution* liait donc la résolution du capteur OSCAR à la puissance du calculateur. Le principe de mesure présenté ici (VODKA) s'affranchit de cette dualité et permet d'obtenir une excellente résolution en utilisant de faibles ressources calculatoires. Celles utilisées par le capteur VODKA, mises en œuvre sur un dsPIC30f4013 ne sont que de 0.665 MIPS (Avec le démodulateur présenté sur la fig.2.60c), soit 3.3% seulement des ressources calculatoires du microcontrôleur, cadencé à 20 MIPS.

Performances comparées des capteurs visuels OSCAR et VODKA

Les principales performances du capteur OSCAR et du capteur VODKA sont résumées dans le tableau 2.5.

	OSCAR [Viollet 09]	VODKA [Kerhuel 09]
Résolution	0.04°	0.01°
déviante standard	non spécifiée	$\sigma = 0.0016^\circ$
Retard sur la mesure	65ms	35ms
contraste minimum mesurable	$m = 0.1$	$m = 0.045$
Champ de mesure fine	$\pm 2^\circ$	$\pm 1^\circ$
Champ de détection du contraste	$\pm 2^\circ$	$\pm 4^\circ$
Architecture	Analogique	Numérique @ 20MIPS
Fréquence d'échantillonnage	/	500Hz
Actionneur : BP	200Hz	/
Amplitude minimale de balayage (A)	3°	$\approx 0.1^\circ$
Angle Interrécepteur	$\Delta\varphi = 2.8^\circ$	$\Delta\varphi = 2.87^\circ$
Angle d'acceptance	$\Delta\rho = 3^\circ$	$\Delta\rho = 3^\circ$
Fréquence de balayage	10Hz	libre
fréquence de rafraîchissement	10Hz	500Hz

Tab. 2.5: Caractéristiques comparés des deux capteurs de position angulaire OSCAR et VODKA.

La figure 2.79 présente, pour comparaison, les caractéristiques statiques simulées du capteur OSCAR et du capteur VODKA, tous deux placés face à un même bord contrasté, que l'on déplace très lentement ($0.5^\circ/s$) et à vitesse constante dans son champ visuel, dans un sens puis dans l'autre. La simulation est basée sur l'équation (2.10) pour simuler les signaux visuels issus de deux photodiodes. Le filtre analogique décrit au paragraphe 2.2.2 (p.40) est simulé dans le domaine continu. Le traitement du capteur OSCAR est ensuite simulé en mode discret à la fréquence d'échantillonnage de $2kHz$, alors que le capteur VODKA se contente d'une simulation à une fréquence d'échantillonnage de $500Hz$ seulement, ce qui réduit d'autant la charge de calcul. On constate que la caractéristique de chaque capteur présente une hystérésis, imputable dans les deux cas au retard pur de la mesure. Cette hystérésis permet d'estimer avec précision le retard des deux capteurs OSCAR et VODKA simulés. Graphiquement, on lit une distance $\Delta\Psi = 0.035^\circ$ séparant les deux courbes, ce qui, en prenant en considération la vitesse du bord contrasté ($0.5^\circ/s$)

2.5 DES CAPTEURS VISUELS MINIMALISTES

donne un retard de $35ms$.

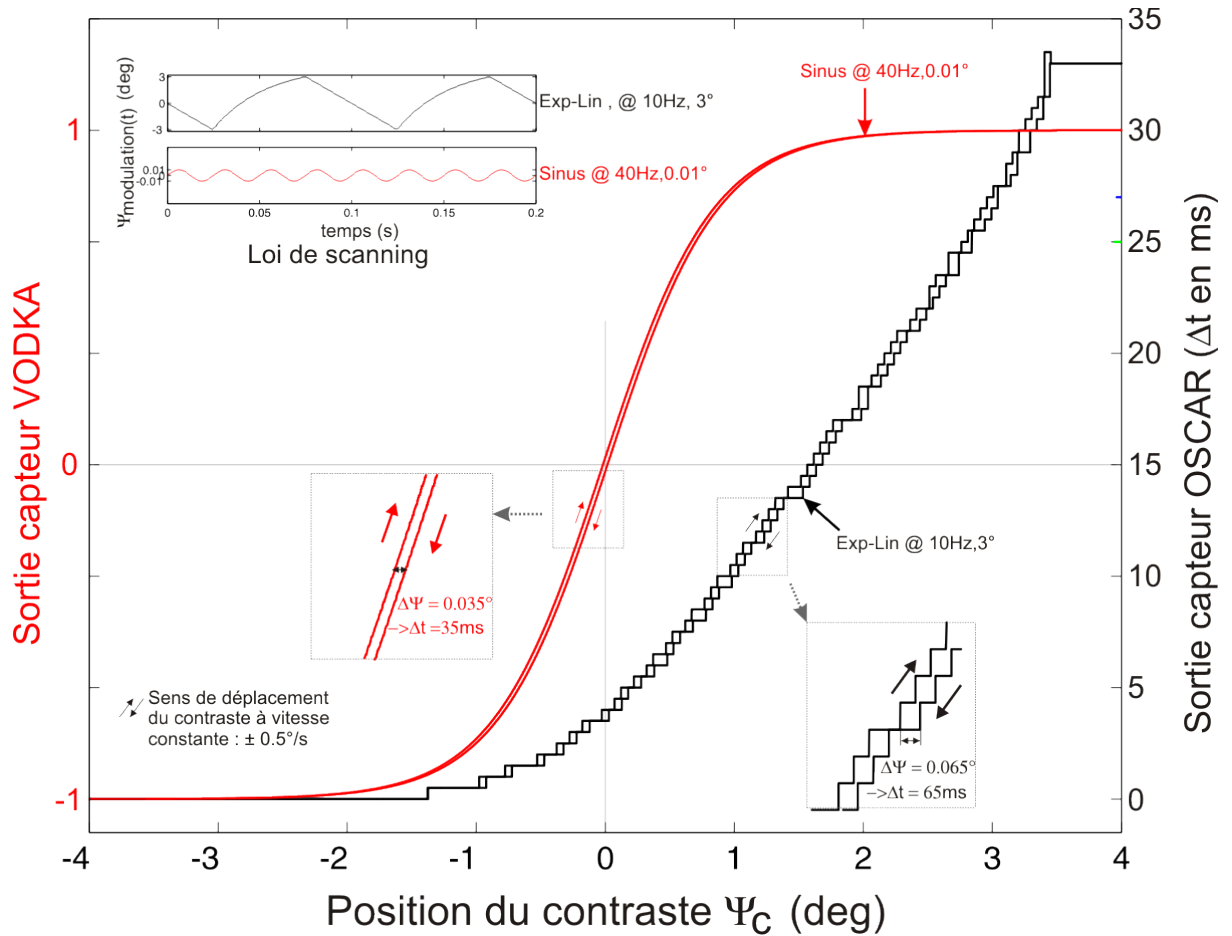


Fig. 2.79: Simulation du capteur **OSCAR** original (courbe noire) et du capteur **VODKA** (courbe rouge). Le capteur **OSCAR** utilise une loi de balayage à 10Hz d'amplitude 3° (6° crête-à-crête). Cette loi se compose d'une phase exponentielle suivie d'une phase linéaire. La mesure Δt du retard (échelle de droite) est effectuée sur la phase exponentielle. Cette mesure reflète la position du bord contrasté dans le champ visuel. Le pas de calcul de l'algorithme numérique du capteur **OSCAR** est de 0.5ms (échantillonnage à 2kHz). Le capteur **VODKA** (courbe rouge) est tracé en utilisant l'échelle de gauche. Ce nouveau capteur utilise un micro-balayage sinusoïdal à 40Hz d'amplitude extrêmement faible (0.01°). La fréquence d'échantillonnage utilisée pour ce nouveau capteur est quatre fois plus faible (500Hz). Pour chaque capteur, la mesure est effectuée pour un même bord contrasté se déplaçant à vitesse très faible et constante ($v_{\text{contrasté}} = \pm 0.5^\circ/\text{s}$), dans un sens puis dans l'autre (les flèches proches des courbes indiquent le sens de déplacement du bord contrasté lors de la mesure). Le décalage entre les mesures est dû au retard de la mesure. Ce retard se calcule par : $\frac{\Delta\psi}{2*|v_{\text{contrasté}}|}$. Pour le capteur **OSCAR**, le retard est de 65ms , et de 35ms seulement pour **VODKA**. Paramètres de l'optique simulée pour les deux capteurs : $\Delta\rho = 2.6^\circ$, $\Delta\varphi = 2.87^\circ$.

2.5.11 Discussion

- 1) La robustesse de la caractéristique statique du nouveau capteur de position angulaire **VODKA**, vis à vis de la fréquence, de l'amplitude et de la forme du balayage, peut permettre d'utiliser l'un de ces paramètres de balayage comme variable d'ajustement. En jouant par exemple sur l'amplitude du balayage, la gamme et le gain de la mesure se trouvent modifiés. Il sera donc possible, en particulier, de changer le gain d'une boucle de contrôle en changeant simplement l'amplitude du balayage. De même, l'augmentation de la fréquence de balayage permet d'améliorer le rapport signal-sur-bruit des signaux dérivés Ph'_1 et Ph'_2 . Ainsi, en présence d'un bord de faible contraste (ou d'un bord de fort contraste mais faiblement éclairé), l'augmentation de la fréquence se traduit par un accroissement de gain (sur Ph'_1 et Ph'_2), qui améliore la précision de localisation angulaire du bord contrasté.

- 2) Un avantage supplémentaire du capteur **VODKA** est que lorsque ses axes optiques sont statiques dans un environnement stationnaire, il sera capable de détecter et de localiser avec précision tout bord contrasté se déplaçant lui-même en vibrant légèrement dans son champ visuel.

- 3) Le principe du capteur a été présenté ici en se basant sur les signaux *dérivés* des photodiodes, Ph'_1 et Ph'_2 . A l'aide d'un développement limité à l'ordre 1, on peut montrer qu'il est possible d'appliquer le même principe aux signaux *non dérivés*, Ph_1 et Ph_2 , sous réserve que leur composante continue ait été supprimée. Ainsi, le démodulateur utilisant un filtre en peigne (qui supprime en particulier la composante continue) (voir fig.2.60c) fonctionne en l'état sur les signaux bruts des photodiodes. Cette propriété permettrait de réaliser, à partir d'imageurs classiques (tels ceux présents dans les appareils photo ou les caméras numériques) un capteur doté de *superrésolution*.

- 4) Le principe du capteur a été présenté ici pour une seule dimension, mais il est possible avec un minimum de 3 photorécepteurs (3 pixels) de réaliser un capteur optique capable de mesurer la position d'un bord contrasté ou d'une barre selon deux dimensions.

- 5) La charge de calcul nécessaire pour obtenir une superrésolution (hyperacuité) sur un champ de (2°) est très faible, car le capteur **VODKA** décrit n'utilise que 3.3% des ressources du microcontrôleur 16 bits à 20 MIPS. Il serait donc possible de mettre en place au moins 30 capteurs du même type sur ce même microcontrôleur, ce qui produirait un

champ visuel global de 60° , avec l'avantage de la superrésolution. Si les paires de photorécepteurs sont adjacentes : n capteurs peuvent être réalisés avec $n + 1$ photorécepteurs (au lieu de $2 * n$) ce qui permet de mutualiser également les démodulateurs et divise ainsi par $\frac{2*n}{n+1} \approx 2$ le nombre de démodulateur nécessaire, réduisant encore la charge de calcul. C'est pourquoi, il est possible d'étendre encore la plage de mesure bien au-delà de 60° sans augmenter la puissance de calcul nécessaire (donc la consommation et la masse du dispositif).

6) La facilité de mise en oeuvre et les performances du capteur VODKA démontrent la possibilité de réaliser avec des moyens minimalistes un capteur optique doté de super résolution. On pense que la mouche, dont le balayage rétinien a été démontré [Franceschini 97], peut mettre à profit un capteur du type OSCAR et peut-être VODKA pour détecter et poursuivre ses proies ou ses congénères, en dépit de la faible résolution statique de son l'œil composé [Franceschini 04a].

7) Le capteur de *position angulaire* VODKA est le parfait complément d'un capteur DEM de *flux optique*, qui ferait appel à la même paire de photorécepteurs. Embarqué à bord d'un micro-aéronef, le capteur VODKA pourrait donc fournir une mesure de *position angulaire* des objets environnants, (permettant par exemple à l'aéronef de se maintenir en vol stationnaire, au dessus ou à côté de repères visibles), tandis que le capteur DEM de vitesse angulaire (flux optique) permettrait à l'aéronef d'éviter les obstacles lorsqu'il serait en déplacement. Rappelons que ces deux capteurs partagent une bonne partie de l'architecture matérielle, tant optique qu'électronique, en particulier le filtrage spatial initial et le filtrage passe-bande temporel des signaux. Une fois l'un des capteurs réalisé, l'autre peut-être réalisé dans le même microcontrôleur par simple mise à jour du traitement d'entrée. Les faibles ressources calculatoires utilisées par ces deux types de capteurs leur permettent de coexister en N exemplaires dans un même microcontrôleur 16 bits.

3. OSCAR II : UN ROBOT DOTÉ DE RÉFLEXES OCULOMOTEURS

3.1 Introduction

Les performances des micro-aéronefs ou autres mini-drones sont aujourd'hui encore très en deçà des performances de leurs modèles vivants : les insectes et les oiseaux. Ces derniers sont capables de naviguer en environnement inconnu sur la base de leur perception visuelle. Les drones utilisent des capteurs avioniques complexes et lourds, comprenant généralement des éléments tels que les Global Positioning System ([GPS](#)), les sonars, les radars ou laser ([FLIR](#)) qui occupent beaucoup de place et consomment d'autant plus qu'ils sont émissifs.

La navigation par [GPS](#) nécessite une connaissance a priori de l'environnement. Le moindre changement de celui-ci, ou un élément mobile inattendu, entraîne une collision. De plus, le signal du [GPS](#) nécessite une vision directe de plusieurs satellites. Aussi, la réception du [GPS](#) est de mauvaise qualité dans les bâtiments et sur les terrains accidentés.

La consommation électrique et la masse excessive des capteurs *émissifs* rend difficile leur mise en oeuvre à bord de véhicules aériens de quelques grammes ou dizaines de grammes.

La plupart des engins aériens miniatures utilisant la vision pour se guider sont encore équipés d'une petite caméra transmettant les images capturées à une station-sol équipée d'un puissant ordinateur capable d'effectuer les calculs nécessaires pour extraire des images l'information utile. Une fois cette information élaborée, une commande est renvoyée à l'aéronef. La liaison radio crée un délai préjudiciable à la boucle de contrôle et toute perte de communication entre l'aéronef et la station-sol peut se solder par la chute de l'aéronef. Trois exceptions notables sont le *MC2* microflyer [[Zufferey 08](#)], une aile volante [[Beyeler 09](#)] et un hélicoptère [[Conroy 09](#)] qui sont capables de calculer à bord

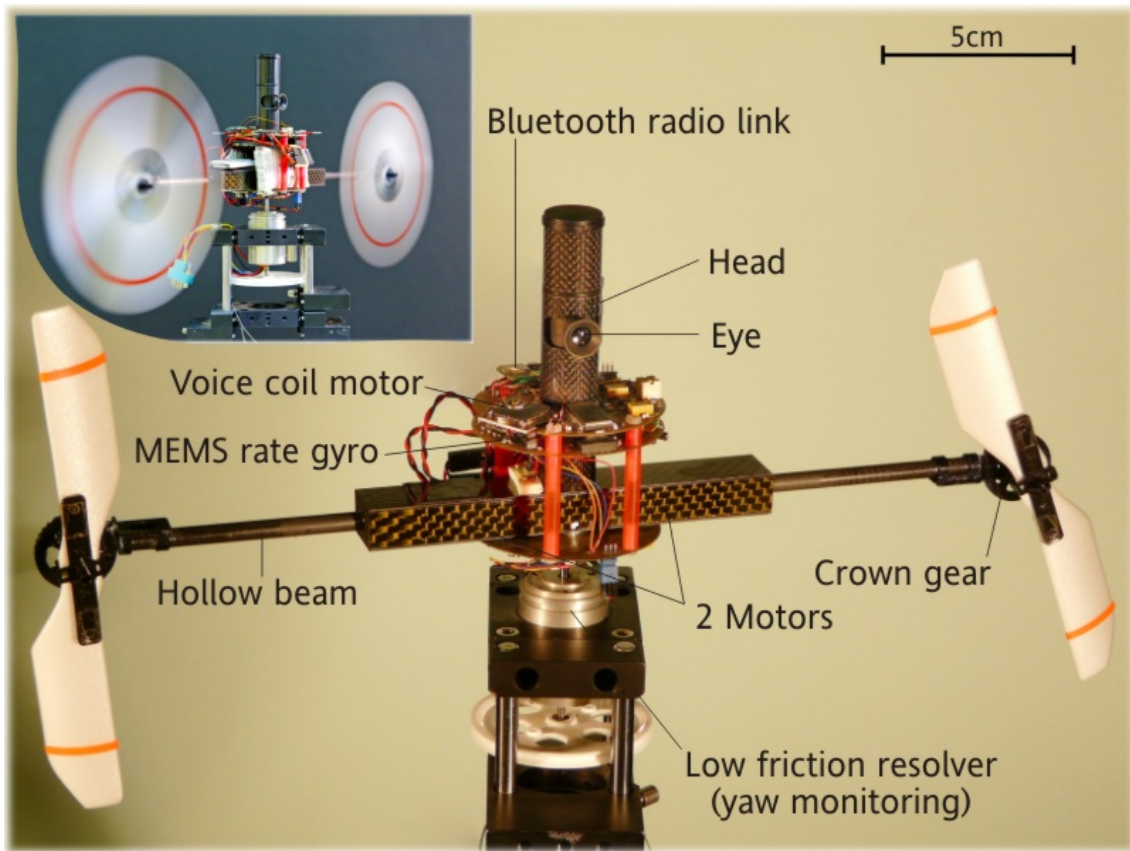


Fig. 3.1: OSCAR II est un robot aérien libre de tourner autour de son axe de lacet et capable de s'orienter en contrôlant le différentiel de vitesse de rotation entre ses deux hélices. L'œil d'OSCAR II est mécaniquement découplé de son corps. Le dispositif visuel du robot lui permet de fixer une cible placée à 1 mètre devant lui. Deux réflexes oculomoteurs (Réflexe Vestibulo-Oculaire (VOR) (RVO) et Réflexe de Fixation Visuelle (RFV)) concourent à maintenir stable la ligne de regard du robot, même lorsque celui-ci est perturbé par des coups de vent ou des claques appliqués sur sa structure. Le contrôle de l'orientation du robot interagit étroitement avec les réflexes oculomoteurs de sorte que le robot ré-orienté toujours son corps dans la direction de son regard. Le robot OSCAR II est monté sur un resolver à très faible friction et faible inertie. Ce *resolver* permet de mesurer l'*orientation* du robot avec grande précision. (Photo en haut à gauche de François Vrignaud).

l'information de flux optique, et de l'utiliser pour naviguer.

Les insectes ailés et les oiseaux sont capables depuis fort longtemps de naviguer en environnement inconnu. Ces animaux ne sont pas équipés d'une liaison radio bidirectionnelle pour transmettre les informations à traiter à une station de base. Le traitement visuel est réalisé à bord, sur la base de leur vision et avec leurs faibles ressources calculatoires. La stabilisation de leur regard semble être une stratégie extrêmement efficace au service d'une simplification du traitement des signaux visuels. Nous verrons dans le paragraphe 3.3 que la stabilisation du regard peut donner naissance à de nouvelles stratégies de pilotage par la vision.

3.1.1 Stabilisation de la vision dans le vivant

La *stabilisation du regard* est un point crucial, car elle permet un traitement efficace de l'information visuelle avec peu de ressources. Le réflexe de *poursuite fine* a aussi un impact important pour le traitement de l'information. Ce dernier réflexe permet de maintenir le regard fixe sur une cible en mouvement. La cible, devenue stationnaire dans le repère de l'œil, pourra alors être analysée avec finesse par d'autres traitements.

Malgré leur faible nombre de neurones (10^5 à 10^6), et leur système visuel doté d'un nombre très réduit de pixels (10^1 à 10^4), les insectes utilisent leur vision dans des tâches vitales telles que la navigation, l'évitement d'obstacles (stationnaires ou non stationnaires), le vol stationnaire [Collett 75, Kern 98], la poursuite de congénères [Boeddeker 03], la recherche d'intrus [Land 74] ou encore l'interception de proies [Olberg 00]. Des études récentes prouvent que la mouche en vol libre maintient son regard fixe dans l'espace par périodes de 100 à 200ms, grâce à des réflexes de stabilisation très rapides [Hateren 99]. Chez la guêpe des sables (*Bembex*), l'orientation de la tête et du regard est maintenue stable malgré les larges rotations du thorax autour de l'axe de roulis [Zeil 08]. Les exigences de réactivité pour la stabilisation de la vision sont directement dictées par les dynamiques de mouvement de rotation du corps, qui sont parmi les plus rapides et les plus précises rencontrées dans le monde animal.

3.1.2 Stabilisation de la vision en robotique

La stabilisation du regard est une tâche devant satisfaire une double contrainte. D'un côté, la stabilisation doit être *rapide* pour permettre de compenser les perturbations efficacement. Ces perturbations peuvent être engendrées par les mouvements propres de

l'agent (locomotion), ou par des événements extérieurs. D'un autre côté, la stabilisation doit être *précise* et n'ajouter aucune vibration parasite, pouvant résulter d'un contrôle nerveux de l'œil. Chez la mouche en vol libre, les mécanismes de stabilisation mis en œuvre permettent de maintenir le flux d'information visuel malgré les perturbations générées par les vibrations du corps [Sandeman 80, Hateren 99, Hengstenberg 88, Hengstenberg 92]. Chez l'homme, la marche génère des perturbations (vibrations mécaniques transmises par le squelette) dont le fondamental se situe autour de 3Hz mais dont quelques harmoniques se situent autour de 20Hz [Grossman 88]. D'une manière générale, ces réflexes naturels de stabilisation visuelle sont nettement plus performants que ce qui a pu être réalisé en robotique à ce jour.

Plusieurs études sur des robots mobiles ont traité de la stabilisation active du regard. Suite aux travaux sur la "Rochester head" [Ballard 89] et la "Harvard head" [Ferrier 93], plusieurs études ont été faites sur la stabilisation du regard, combinant à la fois le sens de la vision et le sens inertiel [Yamaguchi 94], et leurs performances ont été testées qualitativement avec des perturbations lentes (appliquées à la main).

Shibata et Schaal [Shibata 01] ont réalisé un système de contrôle du regard basé sur le modèle oculomoteur des mammifères. Équipé d'un réseau de neurones, ce système est capable, après apprentissage, de réduire par un facteur 4 l'erreur rétinienne pour des perturbations de fréquences modérées (jusqu'à $0.8Hz$).

Un stabilisateur d'image adaptatif a été conçu, pour améliorer les performances d'un robot, et testé pour des fréquences allant jusqu'à $6Hz$ [Panerai 02]. Un autre système adaptatif de stabilisation du regard a été proposé [Lenz 08] et testé sur une plage de fréquence allant de 0.5 à $2Hz$. Trois autres stabilisateurs du regard ont été réalisés (deux pour des robots mobiles [Lewis 97, Viola 89] et un autre pour un rat artificiel [Meyer 05]), mais les performances de ces trois systèmes n'ont pas été mesurées qualitativement. Miyauchi *et al.* [Miyauchi 08] ont montré l'intérêt de la stabilisation d'image sur un système compact de stabilisation monté à bord d'un robot se déplaçant sur un terrain accidenté. Twombly [Twombly 06] a simulé un robot marcheur complet, doté d'un système neuro-vestibulaire de stabilisation du regard. Wagner *et al.* [Wagner 92] ont construit un système oculomoteur dans lequel chaque globe oculaire reposait sur un coussin d'air. L'actionneur utilisé est un galvanomètre permettant d'obtenir une dynamique oculaire extrêmement rapide. Récemment, Maini *et al.* [Maini 08] ont implanté un système oculo-moteur capable de mouvements rapides des yeux, mais sans utiliser de capteur inertiel dans leurs boucles de contrôle. Deux études récentes en rapport avec la robotique humanoïde ont

montré l'intérêt que pouvait apporter un système de stabilisation du regard à bord de robots bipèdes [Takizawa 05, Ushida 06]. Aucune des solutions technologiques proposées à ce jour n'est compatible avec les contraintes de poids et de taille imposées par des engins tels que les microaéronefs. Ici se situe donc un nouveau point de rupture dans ce travail de thèse car, au travers du robot OSCAR II, nous avons dû composer avec les contraintes draconiennes de la micro-robotique aérienne.

3.1.3 Eléments clefs pour la stabilisation visuelle

Chez les animaux ailés, différents réflexes oculomoteurs agissant de concert sont en charge de gérer la stabilisation du système visuel. La stabilisation visuelle nécessite :

- un *découplage mécanique* entre l'œil et le corps (via l'orbite de l'œil et le cou chez les oiseaux, ou via le cou seulement chez les insectes).
- un *actionneur rapide et précis*. Chez la mouche bleue, pas moins de 23 paires de muscles contrôlent l'orientation de la tête relativement au corps [Strausfeld 87].
- un *Réflexe de Fixation Visuelle (RFV)* qui maintient la ligne de regard verrouillée sur une cible contrastée.
- un *Réflexe Vestibulo-Oculaire (VOR) (RVO)*, qui compense, par une mesure inertielle, les rotations intempestives subies par le support de l'œil. Une rotation de l'œil en opposition de phase avec la tête permet de maintenir la ligne de regard fixe dans l'espace. Les diptères (mouches, moustiques...) utilisent ce type de réflexe inertiel basé sur deux balanciers, organes gyrométriques miniatures situés à l'arrière de leur unique paire d'ailes. Les perturbations de lacet [Sandeman 80] de roulis [Hengstenberg 88] et de tangage sont ainsi compensées. Un réflexe similaire (RVO) a été développé par les vertébrés. On le rencontre en particulier chez le singe et l'homme, où il est particulièrement étudié. Le RVO du singe rhésus agit dans la gamme de fréquence 0.5 – 5Hz [Keller 78] et même dans une gamme beaucoup plus élevée 5 – 25Hz [Huterer 02].
- un *capteur proprioceptif* capable de mesurer la position angulaire de l'œil relativement à la tête, ou de la tête relativement au corps. L'existence d'un tel capteur chez le primate est toujours sujette à controverse [Clifford 00, Dancause 07], mais un tel capteur existe assurément chez la mouche. Les *organes prosternaux*, situés à la partie antérieure du thorax [Preuss 92, Paulk 06], donnent en effet une information sur l'angle tête-corps, à la fois sur l'axe de lacet [Liske 77], de roulis [Hengstenberg 88] et de tangage [Hateren 99].
- un *couplage actif* entre l'orientation du robot et l'orientation du regard via les

3.1 OSCAR II : UN ROBOT DOTÉ DE RÉFLEXES OCULOMOTEURS

réflexes oculomoteurs, composés eux-mêmes du Réflexe de Fixation Visuelle (RFV) et du Réflexe Vestibulo-Oculaire (VOR) (RVO).

Notre travail sur le nouveau robot OSCAR II que nous avons construit s'inspire des insectes, mais l'objectif est avant tout de réaliser un système performant, et non de copier directement un modèle biologique existant, pour lequel nombre de données font encore défaut.

3.2 Le robot aérien OSCAR II

3.2.1 La plateforme aérienne

Comme son prédécesseur OSCAR I [Viollet 99c], le robot OSCAR II [Kerhuel 10] que nous avons réalisé (voir figure 3.1) est une plateforme aérienne miniature équipée de deux moteurs à hélice et d'un système visuo-inertiel d'autostabilisation autour de l'axe vertical (axe de lacet). La particularité du robot OSCAR II est qu'il est équipé d'un système oculomoteur lui donnant la possibilité d'orienter activement son regard en déplaçant l'angle de visée de son œil dans les limites de $\pm 35^\circ$. Ce degré de liberté additionnel reproduit qualitativement le découplage tête-corps de maints êtres vivants.

Chacun des deux micromoteurs DC du robot est contrôlé par un régulateur sans capteur, de seulement 1 gramme, [Viollet 08], qui estime la vitesse de rotation du moteur en mesurant la force contre-électromotrice générée par la rotation de ce dernier. L'utilisation de ce contrôleur permet non seulement d'asservir la vitesse du moteur à une valeur donnée, mais aussi de compenser la lente diminution de tension d'alimentation due à la décharge progressive de la batterie embarquée.

La structure du robot est constituée d'une poutre creuse horizontale en carbone contenant les deux micromoteurs reliés aux hélices (voir les figures 3.1 et 3.2). Ces deux moteurs sont placés à proximité de l'axe de rotation en lacet du robot pour minimiser le moment d'inertie en rotation. La liaison entre chaque moteur et son hélice respective (diamètre 13cm) se fait via un arbre en carbone de diamètre 1mm. Un réducteur de 1/5 est utilisé pour le renvoi d'angle de l'entraînement de l'hélice.

Le robot OSCAR II pèse 65g sans les batteries. Cette masse inclut les deux moteurs et leur contrôleur dédié, les hélices, l'œil avec son actionneur (de type Voice Coil Motor (VCM)) et son système d'asservissement en position, le gyromètre (Analog Device ADIS 16100), l'actionneur piézo, l'électronique complète du robot réalisée avec des composants en montage surface (CMS) et l'émetteur *bluetooth* permettant de transmettre les données à la station-sol (monitoring).

Deux batteries distinctes alimentent le robot en énergie. Une petite batterie (3.6V-100mAh, 3g) alimente l'électronique du robot et une batterie un peu plus conséquente (7.2V-620mAh, 34g) alimente les actionneurs, qui demandent plus d'énergie (hélices et VCM).

La “tête” du robot est constituée d’un large tube de carbone de 15mm de diamètre, fixé sur la poutre horizontale contenant les deux moteurs (voir fig.3.2). Ce tube contient à l’intérieur un tube de plus faible diamètre constituant “l’œil”. Ce tube oculaire est monté sur un pivot inférieur, tandis que son axe supérieur, monté sur un microroulement conique traversant, permet à l’œil de tourner librement et sans frottement à l’intérieur de la “tête” du robot. Un petit aimant (1mm^3), solidaire du tube oculaire (l’œil), est situé à l’extrémité supérieure de l’axe. Placé devant un capteur à effet hall solidaire du tube externe (fixe), cet aimant permet de mesurer la position angulaire θ_{er} de l’œil dans la tête (voir fig.3.3). Le système visuel complet, incluant le capteur OSCAR (voir p.76) et le mécanisme d’actionnement de l’œil (VCM) ne pèse que 22.5g .

3.2.2 Le système visuel du robot

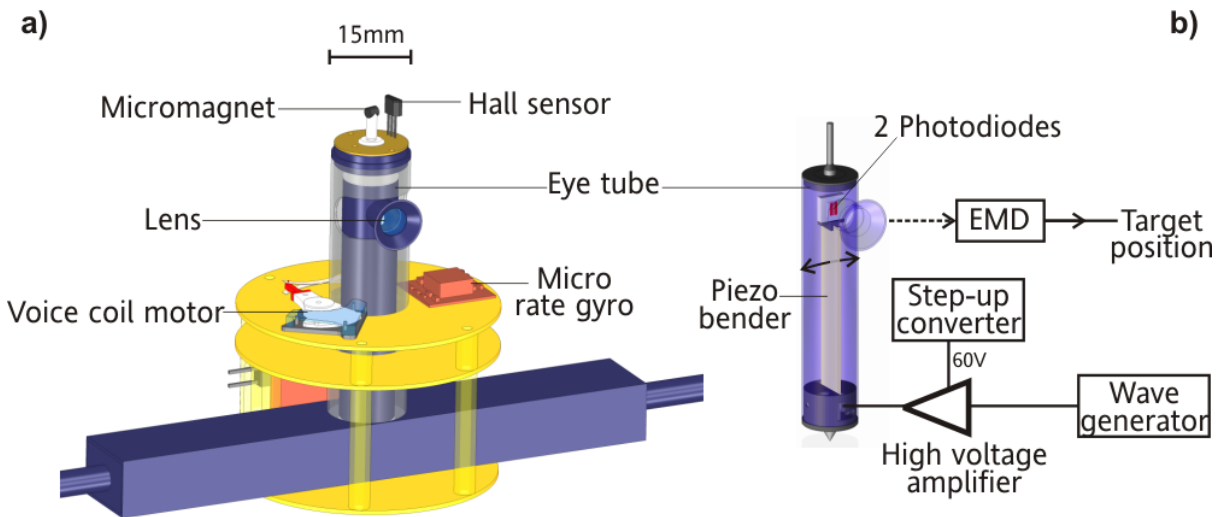


Fig. 3.2: (a) CAO du robot OSCAR II; (b) diagramme montrant le tube oculaire, son mécanisme de vibration rétinienne et le traitement effectué. Un générateur de fonction impose à une lame piézo-électrique une vibration qui translate horizontalement les deux photodiodes (cf. double-flèche) placées derrière la lentille, perpendiculairement à son axe.

L’œil du robot est constitué d’une lentille miniature (diamètre 5mm) derrière laquelle une “rétine ” élémentaire composée de deux photodiodes peut se translater horizontalement. L’actionneur piézo-électrique de type “bender” (Physik Instrumente) est contrôlé

via le microcontrôleur central, qui impose la loi de balayage. Un amplificateur opérationnel “haute tension” permet de contrôler directement la lame piézo-électrique sous $\pm 30V$. Les détails de l’alimentation et de l’amplificateur sont décrites dans [Viollet 05]. Différents traitements visuels proposés précédemment (voir le capteur OSCAR p.76 et le nouveau capteur VODKA p.102) permettent au robot de localiser un bord contrasté vertical avec une super-résolution.

3.3 Contrôle du robot par son regard

Le principe du contrôle de l’orientation du robot OSCAR II autour de l’axe de lacet (cap) est basé sur l’orientation de son regard. Celui-ci est maintenu verrouillé sur une cible, stationnaire ou en mouvement. Les réflexes oculomoteurs reproduits à bord du robot sont capables de rejeter les perturbations, de telle sorte que la ligne de regard reste toujours verrouillée sur la cible. L’orientation du robot est véritablement “pilotée par la ligne du regard”, ce qui signifie que le robot s’efforce à chaque instant de se réaligner dans la direction de son regard.

Deux schémas de contrôle interdépendants sont mis en œuvre dans le système de pilotage du robot. Le premier contrôle l’orientation du regard. Le second contrôle l’orientation du robot lui-même. La dynamique de rotation de l’œil est rapide par rapport à la dynamique du robot. La stratégie mise en place ici tend à minimiser d’une part l’erreur de position rétinienne, d’autre part l’erreur sur l’orientation du robot, sans qu’il soit besoin de connaître ni la position angulaire absolue du robot ni celle de la cible. Le contrôle de l’orientation du robot se décompose en une boucle inertielle rapide et une boucle visuelle plus lente, basée sur la vision. La boucle visuelle permet d’assurer une erreur statique nulle, qui dépend seulement du capteur visuel. On décrit dans les paragraphes suivants la boucle de contrôle de l’œil et la boucle de contrôle du robot en expliquant l’interaction entre ces deux boucles.

3.3.1 Stratégie de contrôle de l’œil

La figure 3.3 présente une vue de dessus du robot permettant de définir les différents angles.

La figure 3.4 présente les deux boucles imbriquées contrôlant l’œil du robot. La boucle de contrôle est présentée à la partie inférieure de la figure 3.4. C’est un *régulateur visuel* dont le but est de maintenir l’erreur rétinienne ε_r à zéro en ajustant l’orientation θ_{er} de

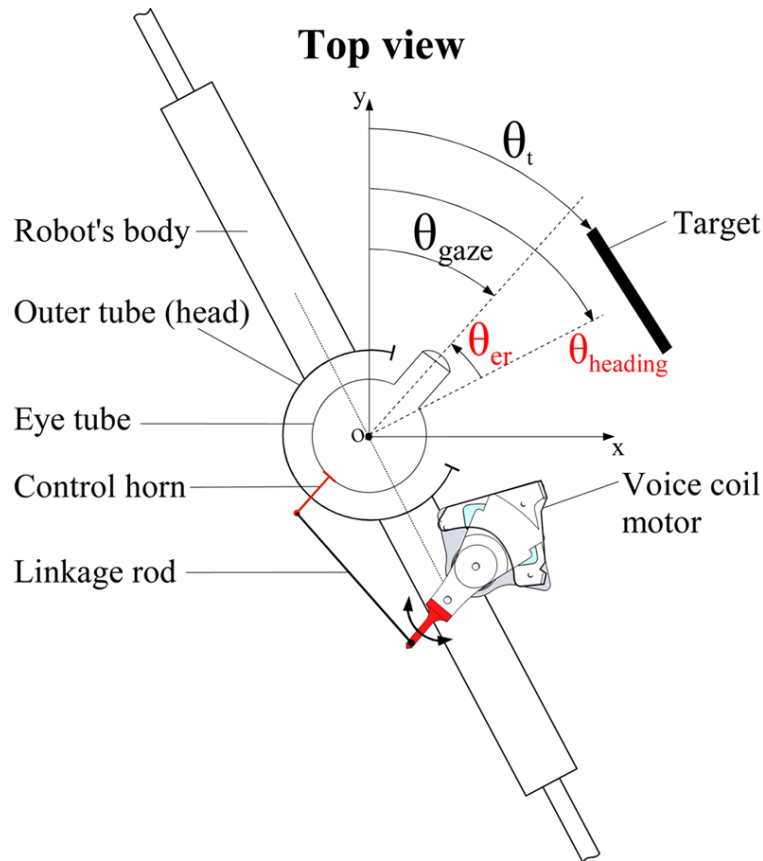


Fig. 3.3: Système oculomoteur du robot OSCAR II (vue de dessus). Le tube central “l’œil” comporte une lentille et sa rétine composée de deux photorécepteurs montés sur un actionneur piezo (voir fig.3.2b). Ce tube oculaire est inséré à l’intérieur d’un tube plus large, appelé la “tête”, solidaire du corps du robot. L’œil est ainsi mécaniquement découplé de la tête et dispose d’un degré de liberté autour de l’axe de lacet. L’angle θ_{er} est l’angle entre la direction du regard et l’orientation du robot. L’orientation de l’œil dans la tête, notée θ_{er} , est contrôlée avec précision par un actionneur électromagnétique de type *Voice Coil Motor*, que l’on a extrait d’un micro-disque dur (voir fig.3.1).

l’œil dans le robot. Le régulateur visuel assure que l’angle θ_{gaze} poursuit les déplacements relatifs de la cible (θ_{target}). En présence d’une cible statique, le Réflexe Vestibulo-Oculaire (VOR) va permettre de compenser n’importe quelle perturbation appliquée au corps du robot, de sorte que le regard va se maintenir figé sur la cible, quels que soient les mouvements propres du robot. En présence d’une cible en mouvement, le Réflexe de Fixation Visuelle (RFV) qui fonctionne en complément du Réflexe Vestibulo-Oculaire (VOR) (RVO) ajustera automatiquement l’orientation du regard θ_{gaze} , de façon à ce que

l'orientation du regard du robot poursuive la cible de manière robuste, quelles que soient les perturbations appliquées à la structure du robot.

Le contrôleur inertiel en action feedforward (Réflexe Vestibulo-Oculaire (VOR) (RVO))

A l'instar des canaux semi-circulaires de l'oreille interne, qui estiment la vitesse angulaire de la tête [Carpenter 88], le gyromètre mesure la vitesse angulaire du robot ($\Omega_{heading}$) autour de son axe de lacet. Cette mesure est alors intégrée par le pseudo-intégrateur ($C_{vor}(s)$), qui estime l'orientation du robot $\hat{\theta}_{heading}$ (voir figure. 3.4).

La fréquence de coupure choisit pour le filtre passe-haut $C_{vor}(s)$ est de $0.05Hz$. Cette faible fréquence de coupure permet de supprimer la composante statique du gyromètre, qui ne peut être supprimée par une soustraction du fait de la dérive inhérente à ce type de Micro Electro-Mechanical System (MEMS).

Le Réflexe Vestibulo-Oculaire (VOR) (RVO) permet ici de compenser toute modification de l'orientation du robot ($\theta_{heading}$), en appliquant sur l'œil (θ_{er}) une contre-rotation identique aux changements de $\hat{\theta}_{heading}$ mais de signe opposé. La figure 3.6 montre qu'en réponse à un brusque changement d'orientation ($\theta_{heading}$) du robot, l'orientation du regard (θ_{gaze}), obtenue en additionnant θ_{er} et $\hat{\theta}_{heading}$, est remarquablement stable, excepté durant un temps très limité ($45ms$), durant lequel une déviation maximale de 2.63° est enregistrée (voir la courbe noire de la figure 3.6).

La fonction de transfert reliant l'angle de l'œil θ_{er} à l'orientation du robot $-\theta_{heading}$ doit avoir idéalement un gain de $0dB$ et un déphasage de 0° sur une gamme de fréquence la plus large possible :

$$\frac{\theta_{er}}{\theta_{heading}} = -(H_{gyro}(s) \cdot C_{VOR}(s)) \cdot H_{eye}(s) = -1 \quad (3.1)$$

Jusqu'à présent, les performances des quelques systèmes oculomoteurs artificiels mettant en oeuvre un RVO n'ont pas été quantifiées au-delà de $2Hz$. Nous montrons ici que la réponse fréquentielle du RVO du robot OSCAR II s'étale sur une plage de fréquence beaucoup plus élevée, jusqu'à $7Hz$. Nous avons utilisé comme signal de commande un signal sinusoïdal vobulé. La stimulation sinusoïdale a été réalisée via une commande différentielle de rotation des deux hélices. Une sinusoïde de fréquence croissante (*chirp*) a été appliquée sur ce différentiel. L'orientation du robot a alors oscillé à fréquence croissante (voir l'angle $\theta_{heading}$ sur la figure 3.7a). La compensation de l'œil, due au RVO

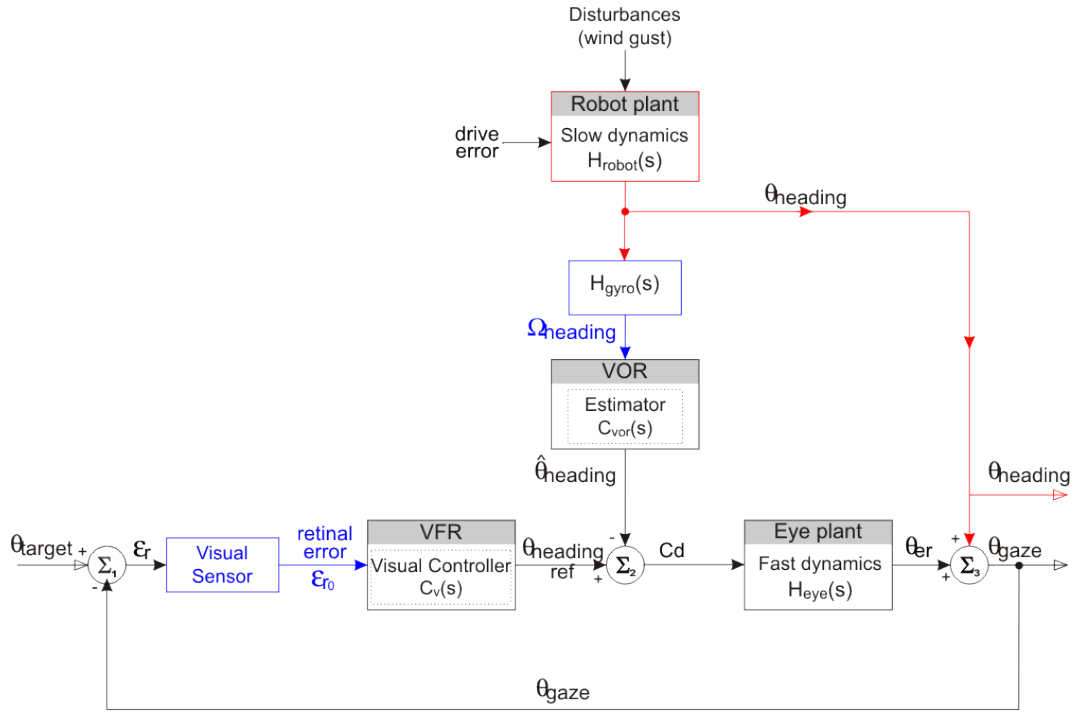


Fig. 3.4: Schéma de contrôle des réflexes oculomoteurs. La boucle visuelle située dans la partie inférieure (implantant le **RFV**) est une boucle d’asservissement en position qui tend à minimiser l’erreur rétinienne mesurée $\epsilon_r = \theta_{target} - \theta_{gaze}$ et à maintenir ainsi l’œil verrouillé sur le bord contrasté. Le contrôleur en feed-forward (**VOR**) compense tout changement de l’orientation du robot ($\theta_{heading}$). Σ_3 additionne l’orientation du robot et l’angle entre l’œil et le robot θ_{er} . Σ_2 retranche la variation d’orientation estimée du robot $\hat{\theta}_{heading}$ de la position visuellement estimée du bord contrasté $\theta_{heading\ ref}$. Le contrôle de l’orientation du robot est réalisé à partir de deux mesures relatives : $\Omega_{heading}$ et ϵ_r . Ces deux variables mesurent en effet une information de position dans le repère même du robot. Aucune information n’est utilisée sur la position angulaire *absolue* du robot dans l’espace et la position *absolue* de la cible dans l’espace.

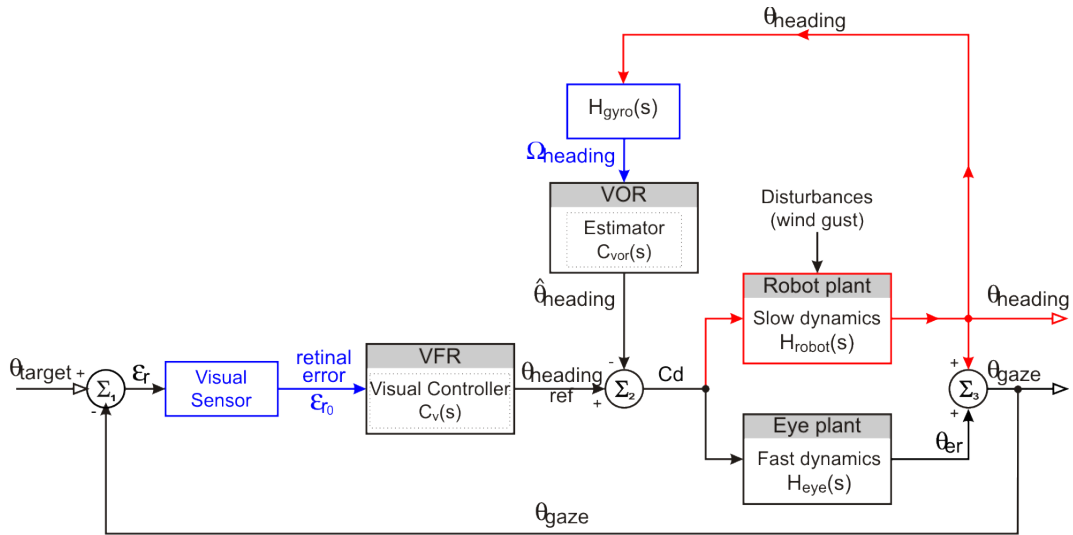


Fig. 3.5: Schéma général de contrôle de l'orientation du robot par le regard. Deux boucles de contrôle interagissent. La partie inférieure présente la boucle *visuelle*, la partie supérieure la boucle *inertielle*. Le système annule l'erreur rétinienne ε_r en agissant à la fois sur le cap du robot $\theta_{heading}$ et sur l'orientation de l'œil θ_{er} . Les trois signaux θ_{er} , $\Omega_{heading}$ et l'erreur rétinienne ε_r (en bleu) sont mesurés dans le repère *relatif au robot*, et aucun angle *absolu* n'est utilisé par le contrôleur. Le système peut être décrit par une boucle de Vernier [Lurie 00] dans laquelle le signal commun (C_d) est à la fois un signal d'erreur pour la boucle (lente) de contrôle de cap, et une consigne pour le contrôle (rapide) de la position angulaire de l'œil θ_{er} . Cette stratégie de contrôle atteint deux objectifs : d'une part, elle permet au robot de maintenir le contact visuel avec la cible, en dépit des perturbations aérodynamiques affectant le robot (coup de vent, effet de sol...). D'autre part, elle permet de réaligner automatiquement l'orientation du robot ($\theta_{heading}$) dans la direction même de son regard, donc finalement vers la cible visuelle.

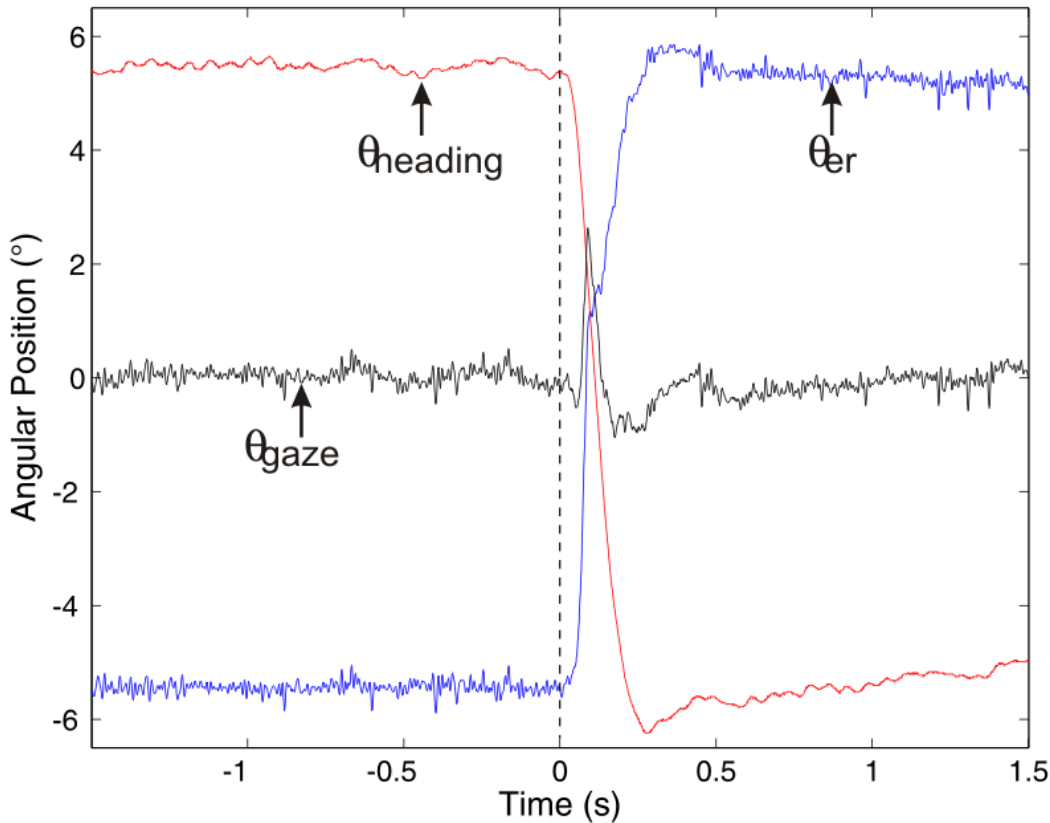


Fig. 3.6: Stabilisation du regard lors d'un changement brusque de l'orientation ($\theta_{heading}$) du robot. L'œil fixe ici un bord contrasté vertical lorsqu'un biais de 11° est brusquement ajouté dans la boucle de contrôle de cap du robot (voir figure 3.5). La rotation du robot, mesurée par le gyromètre, entraîne une contre-rotation immédiate de l'œil grâce au Réflexe Vestibulo-Oculaire (VOR) (RVO). Le changement de cap du robot ($\theta_{heading}$) est effectué en $200ms$. On voit que la ligne de regard (θ_{gaze}) obtenue en additionnant l'orientation du corps du robot et l'angle de l'œil dans le robot $\theta_{heading} + \theta_{er}$ est maintenue verrouillée sur la position initiale 0° , grâce à la réponse précise et rapide du RVO. L'orientation du regard ne quitte en effet l'intervalle $\pm 1^\circ$ que pendant $45ms$, avec un écart angulaire maximal de 2.63° . Le RVO, basé sur la mesure inertielle du gyromètre, stabilise efficacement la ligne de regard, quel que soit le type de perturbation (saccade du corps comme ici, ou perturbation extérieure telle qu'un coup de vent).

a été mesurée (3.7b). Le Réflexe Vestibulo-Oculaire (VOR) est alors caractérisé par le rapport des transformées de Fourier discrètes entre la sortie du système (ici l'angle de l'œil dans la tête $-\theta_{er}$), et l'entrée du système (ici le cap du robot $\theta_{heading}$) [Franklin 98].

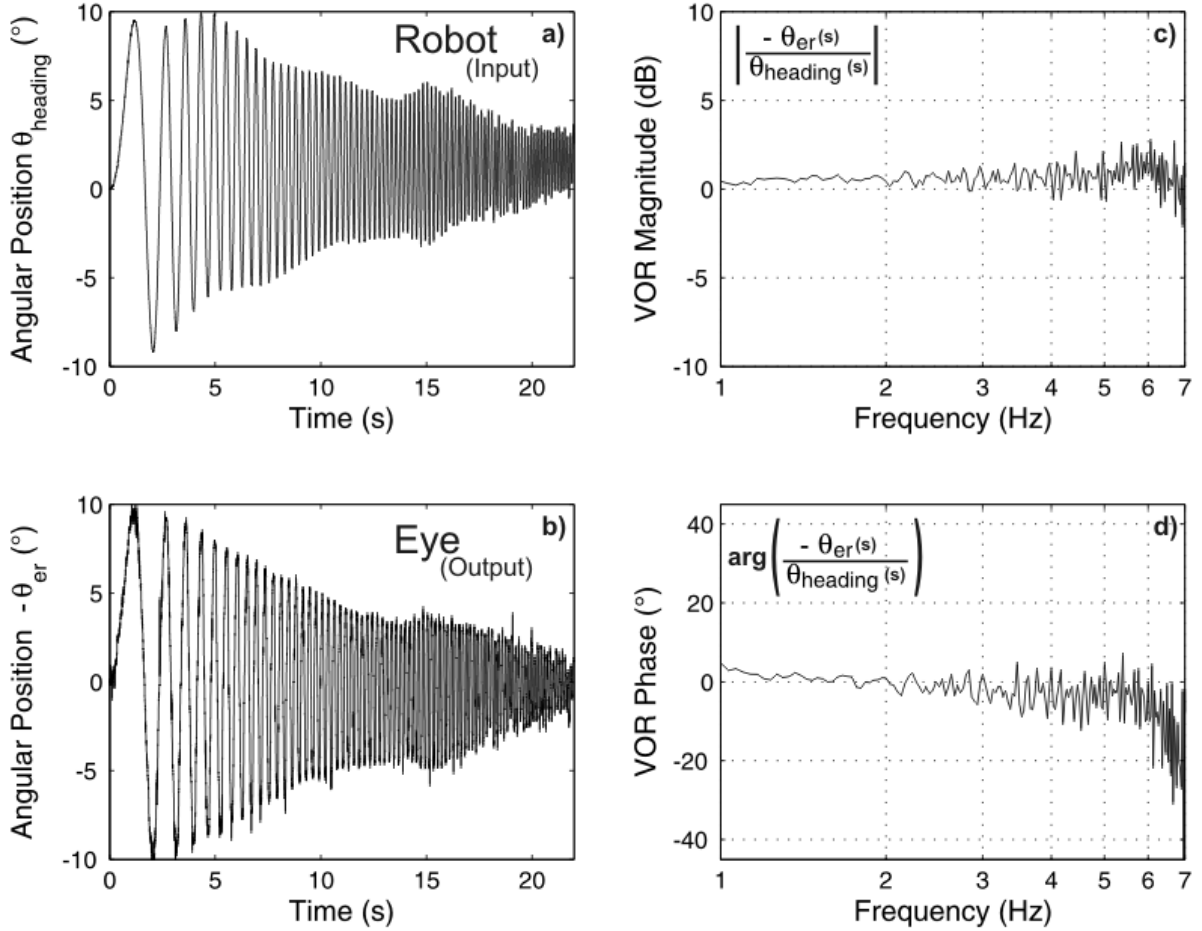


Fig. 3.7: Analyse fréquentielle du Réflexe Vestibulo-Oculaire (VOR) montrant les performances obtenues pour stabiliser le regard en fonction de la fréquence des perturbations d'orientation du corps. Les quatre courbes présentées ici sont obtenues lors d'une même expérience. Le robot est monté sur l'axe d'un resolver à très faible friction, qui permet de relever l'orientation du robot autour son axe de lacet (θ_{heading}). (a) Position angulaire θ_{heading} du robot. Le robot est commandé via le différentiel de ses hélices selon une loi en sinus de fréquence croissante (*chirp*). (b) Orientation de l'œil dans le robot (l'opposé est ici tracé : $-\theta_{er}$). On voit que l'œil compense, grâce au RVO, les perturbations appliquées au corps du robot. (c) et (d) quantifie la gain et la phase de cette compensation. La fonction de transfert $-\frac{\theta_{er}(s)}{\theta_{\text{heading}}(s)} \approx H_{\text{gyro}}(s).C_{\text{VOR}}(s).H_{\text{eye}}(s)$ est ici calculée directement à partir des données de (a) et (b), sans passer par l'identification d'un modèle. Les caractéristiques en gain et en phase montrent que la dynamique rapide du RVO permettent de rejeter avec une bonne précision les perturbations du robot sur une large gamme de fréquence (1 – 7Hz).

Les figures 3.7c et 3.7d présentent respectivement l'amplitude et la phase de la fonction de transfert obtenue pour le RVO. Sur cette fonction de transfert mesurée $\frac{-\theta_{er}(s)}{\theta_{heading}(s)}$, on peut voir que le gain et la phase sont nuls sur tout l'intervalle $[1 - 7]Hz$, ce qui donne à ce RVO des performances proches de celles du Réflexe Vestibulo-Oculaire (VOR) (RVO) humain [Gauthier 84].

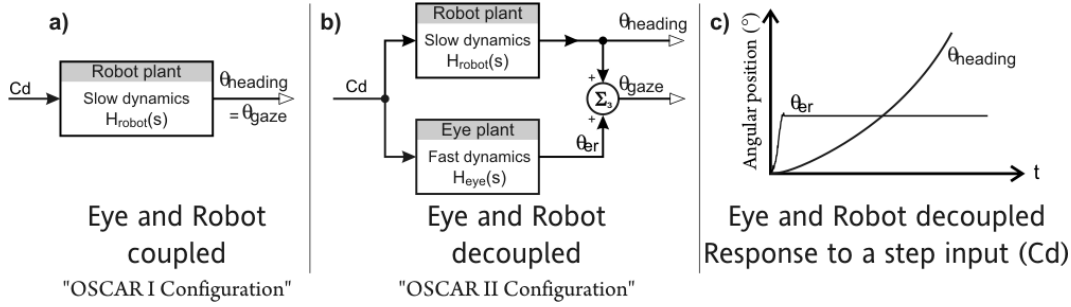


Fig. 3.8: a) Configuration classique (OSCAR I) : l'œil est mécaniquement solidaire du corps du robot. b) Nouvelle configuration (OSCAR II) : L'œil est mécaniquement découplé du corps. Dans la stratégie de contrôle par le regard, un signal commun C_d contrôle à la fois l'œil et le robot. Ce signal commun est à la fois une *consigne de position angulaire* pour l'œil (θ_{er}) et un *signal d'erreur* pour la boucle de contrôle de cap du robot ($\theta_{heading}$). c) Réponse de l'œil θ_{er} et du robot $\theta_{heading}$ lorsqu'un échelon est envoyé sur le signal commun C_d . Agissant comme un signal d'erreur pour le contrôle de cap du robot, cet échelon sur C_d fait tourner le robot jusqu'à ce que ce signal d'erreur soit nul (ici, comme il est maintenu constant, le robot s'emballe). L'échelon sur C_d agissant comme une consigne de position angulaire pour l'œil (θ_{er}), l'œil du robot tourne jusqu'à ce que la position appropriée soit atteinte. Cette figure illustre les différences de dynamique entre l'œil et la tête. En effet, l'œil a atteint sa position finale alors que la tête n'a pas même encore commencé à tourner.

La boucle de contrôle visuel

Comme illustré par la figure 3.5, le réflexe RVO est fusionné avec une boucle visuelle assurant les fonctions de fixation et de poursuite fine d'une cible contrastée. La boucle de contrôle visuel tend à maintenir nulle l'erreur rétinienne ε_r qui a pour effet de maintenir la ligne de regard sur la cible. Le capteur visuel embarqué mesure l'erreur rétinienne ε_r dans le repère du robot. ε_r est une fonction linéaire de l'erreur : $\varepsilon_r = \theta_{target} - \theta_{gaze}$ (cf. figure 3.3). La boucle visuelle permet alors de :

- fixer une cible stationnaire,
- poursuivre une cible mobile, et
- compenser la dérive lente du **RVO** créée par la dérive du capteur inertiel (gyromètre).

3.3.2 Stratégie de contrôle du cap

Le contrôle du cap est une extension du contrôle de l'œil présenté sur la figure 3.4. Le schéma de contrôle général de la figure 3.5 montre que le cap du robot et le contrôle de l'œil dépendent d'un unique signal C_d . Le contrôle du regard et le contrôle du cap sont donc *interdépendants*. C_d commande à la fois l'œil avec sa dynamique rapide, et le robot avec sa dynamique lente. Une modification intempestive du cap du robot agit comme une perturbation dans la boucle de contrôle du regard. Le signal commun C_d est la différence (Σ_2 sur la figure 3.5) entre le **RFV** et le **RVO**. Le signal commun C_d représente une entrée de consigne pour l'orientation de l'œil (θ_{er}) et en même temps un signal d'erreur pour l'orientation du robot $\theta_{heading}$ (voir fig.3.8). En régime stationnaire, C_d est nul mais dès que ce signal d'erreur est non nul, le robot va tourner jusqu'à se réaligner dans la direction de son regard (où l'on aura de nouveau $C_d = 0$). Le guidage viso-moteur réalisé ici agit de manière à toujours maintenir à 0 l'erreur rétinienne ε_r , qui reflète l'angle entre le regard et la cible (voir 3.3) et à toujours ramener le cap du robot ($\theta_{heading}$) aligné avec son regard θ_{gaze} , donc avec la cible θ_{target} . L'avantage est que le robot ne perd jamais la cible de vue lorsque le corps du robot subit une perturbation.

3.4 Performances du robot OSCAR II

Trois expériences nous ont permis de tester les performances du robot OSCAR II. La première permet de quantifier la précision et l'endurance du robot équipé de son système oculomoteur et de son contrôle automatique de cap. Dans la seconde expérience, la fixation visuelle du robot est comparée avec et sans découplage tête corps. Enfin, la troisième expérience montre la capacité du robot à poursuivre visuellement une cible en mouvement, alors même que l'on fait subir au robot des perturbations aérodynamiques importantes (forts coups de vent aléatoires).

3.4.1 Dispositif expérimental

Le robot est ici encore monté sur l'axe d'un resolver miniature, qui lui permet de tourner librement et sans frottement autour de son axe de lacet. Le resolver permet de mesurer l'angle de lacet à haute résolution (14 bits - 0.022°). Sa sortie analogique est numérisée avec une carte dSPACE. La précision de la boucle d'asservissement visuel est mesurée en plaçant, à 1m devant le robot, un *bord contrasté* vertical (noir-vert clair) que l'on translate horizontalement via un rail motorisé (voir fig.3.9). Une liaison sans fil Bluetooth, émulant une liaison UART full duplex, permet à l'opérateur d'envoyer au robot des commandes élémentaires (marche, arrêt...) et de visualiser en retour l'évolution des variables en temps réel. La vitesse de transmission à 115.2-Kbauds permet de mesurer jusqu'à 6 variables à diverses fréquences d'échantillonnage ($C_d, \varepsilon_r, \theta_{er}, \theta_{headingref}, \Omega_{heading}, \hat{\theta}_{heading}$). Une interface graphique sous matlab permet de visualiser en temps réel les données tout en les enregistrant [Kerhuel 08].

3.4.2 Fixation visuelle

La figure 3.10 illustre la précision et la robustesse remarquables de la fixation visuelle d'un *bord contrasté* stationnaire par le robot OSCAR II. La figure 3.10b présente l'histogramme de la position du robot au cours des 30 premières minutes de l'expérience (qui a duré 37 minutes). Cet histogramme montre une distribution gaussienne avec un écart type de seulement $\sigma = 0.14^\circ$. Le cap du robot ne s'est jamais écarté de plus de $\pm 0.4^\circ$ de la cible, ce qui est bien inférieur à la largeur du champ de vision du robot ($\pm 1.8^\circ$). Dans cette expérience, le robot a maintenu son regard (et partant, son cap) verrouillé sur la cible pendant une durée totale de 37 minutes (jusqu'à ce que les accus soient complètement déchargés) et ce, en dépit des perturbations aériennes causées par les hélices et les courants d'air ambiants. La figure 3.10a) montre un détail de la position angulaire du

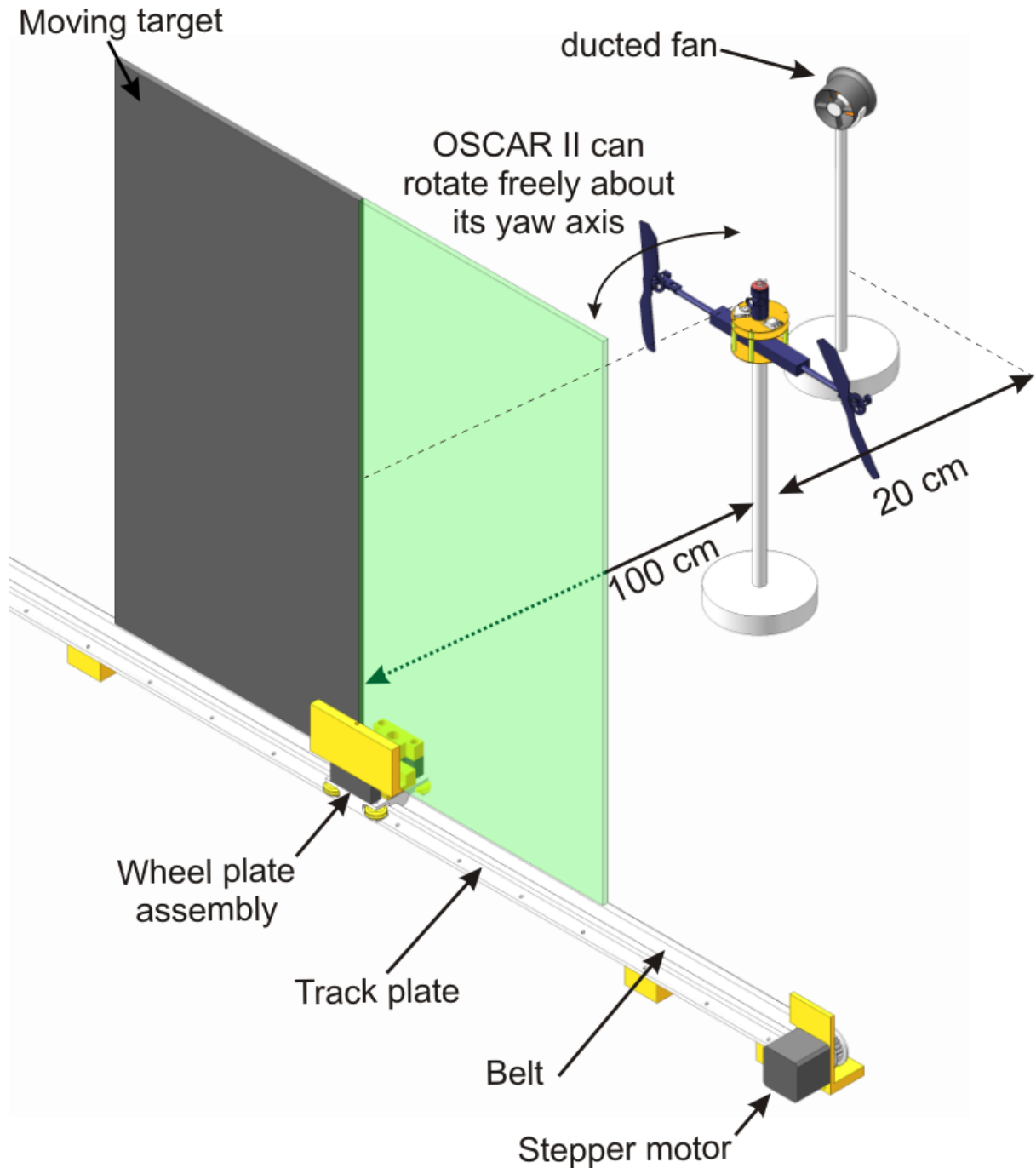


Fig. 3.9: Dispositif expérimental permettant de quantifier les performances du robot OSCAR II. Le robot (voir figure 3.1) est libre de tourner sans frottement autour de son axe de lacet. Il contrôle son cap en modifiant le différentiel de vitesse entre ses deux hélices. Le regard du robot va rester verrouillé sur la cible (ici, un *bord contrasté*), même lorsqu'on la translate horizontalement. Lors de l'expérience de poursuite, des perturbations aérodynamiques violentes sont appliquées à l'aide de la turbine, placée 20 cm en retrait de l'axe des deux hélices.

robot pendant 17 secondes (1000s à 1017s après le début de l'expérience). La position angulaire 0° correspond à un alignement parfait du robot avec la cible.

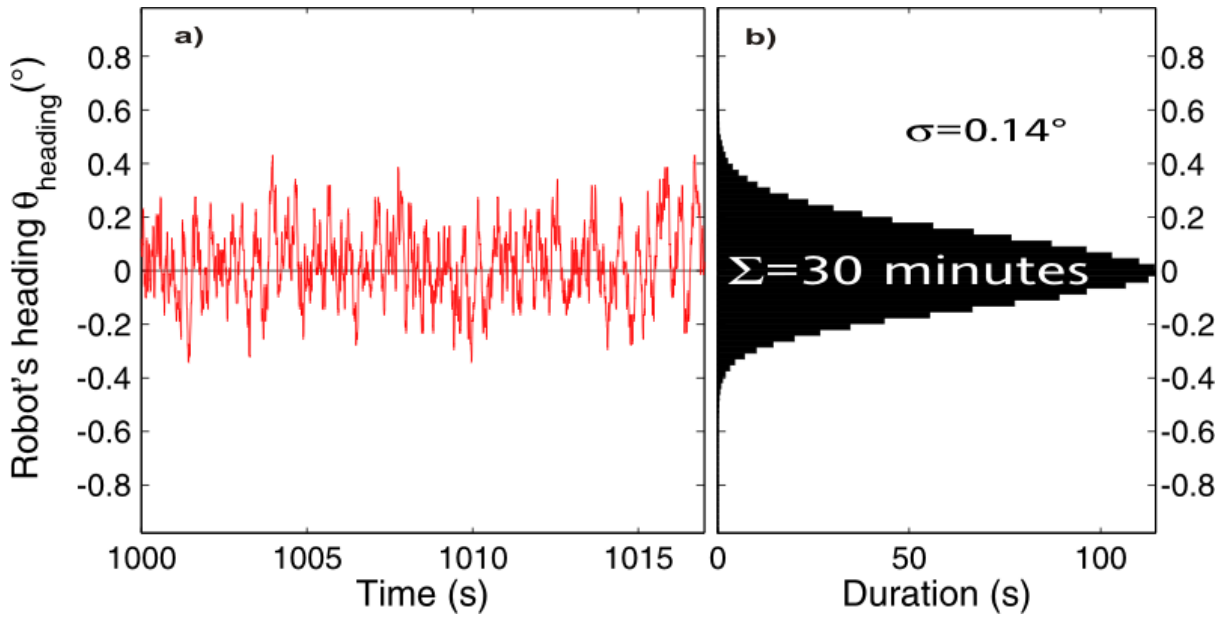


Fig. 3.10: Verrouillage du cap du robot sur une cible fixe (bord contrasté placé à la position $\theta_{\text{target}} = 0$) pendant une longue durée. Le robot OSCAR II est monté sur l'axe d'un resolver miniature sans frottement capable de mesurer sa position angulaire avec précision. Le robot, qui est libre de tourner autour de son axe de lacet, maintient son regard (et son orientation angulaire) verrouillés sur la cible fixe (voir fig.3.9) pendant une longue durée (37 minutes). (a) un échantillon de 17 secondes montrant le cap du robot lors de cette fixation de cible. (b) Distribution de la position angulaire du robot θ_{heading} calculée au cours des 30 premières minutes de l'expérience. On voit qu'en dépit des perturbations aérodynamiques naturelles, l'écart type de l'orientation du robot n'est que de $0,14^\circ$ ($\sigma = 0,14^\circ$).

La figure 3.11 souligne l'importance de la vision dans une tâche de fixation. Ainsi, une fois la lumière éteinte (au temps $t = 180s$), l'orientation du robot n'est plus basé que sur le micro-gyromètre dont la dérive est inéluctable : 10 secondes après l'extinction de la lumière, cette dérive a déjà atteint 2° . Participe à cette dérive le filtre passe-haut du pseudo-intégrateur, qui supprime par ailleurs la dérive lente du gyromètre. Sans estimer la dérive du gyromètre (avec un filtrage complémentaire par exemple), il est impossible d'extraire du gyromètre l'information sur la rotation lente du robot, car cette information est noyée dans la dérive propre du gyromètre. Sans référence visuelle externe, et avec ce

filtre passe-haut, la rotation du robot va varier lentement, mais peut atteindre des vitesses élevées.

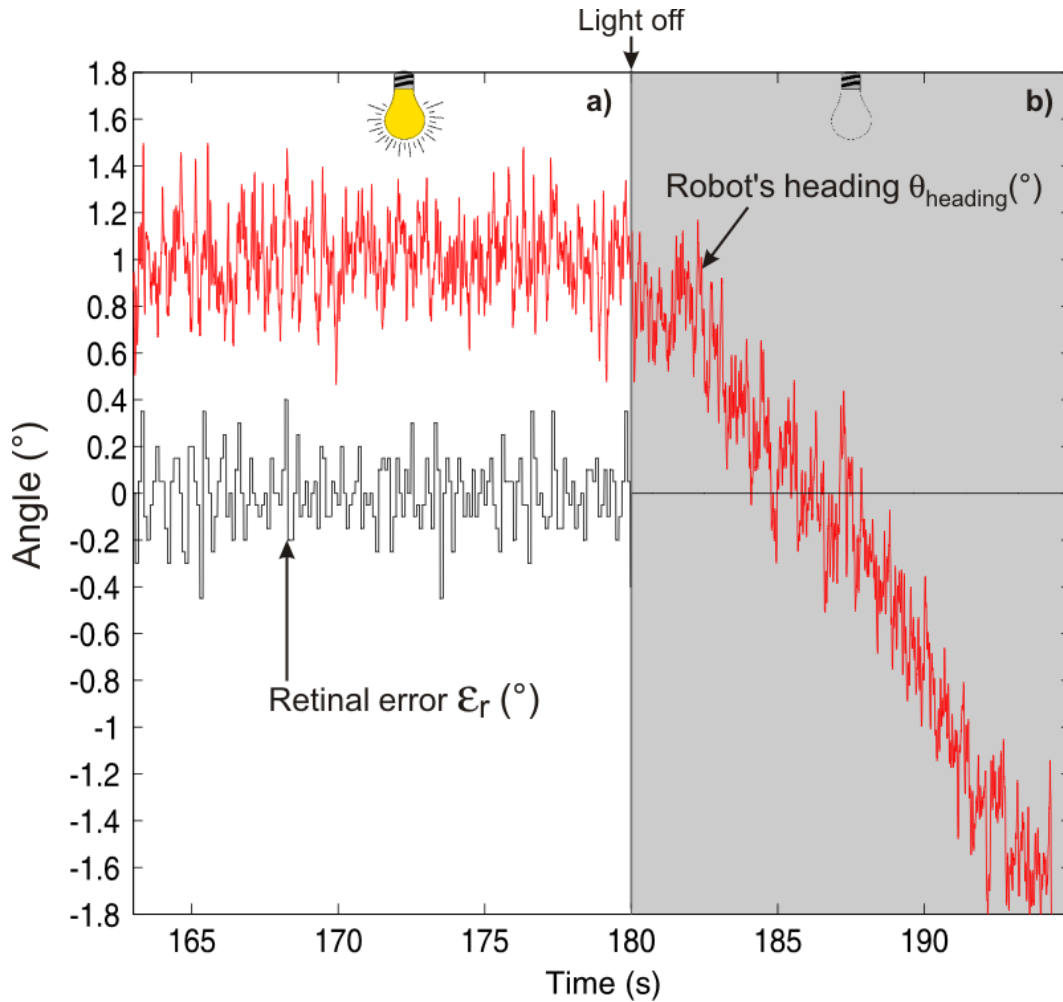


Fig. 3.11: Dérive de cap en l'absence de référence visuelle. (a) Lorsque la lumière de la pièce est allumée, le robot maintient son regard et son cap verrouillés sur le bord contrasté (voir 3.5). (b) Lorsque la lumière est éteinte (180s après le début de l'expérience), la boucle d'asservissement visuel devient inefficace (voir fig.3.5). L'erreur rétinienne ε_r est nulle (voir la courbe noire) et le robot est alors contrôlé uniquement par sa boucle de contrôle inertiel. Il n'est alors plus en mesure de maintenir son orientation constante, en raison de la dérive inhérente au gyromètre. On assiste donc ici à la dérive lente et inexorable du cap du robot dans l'obscurité.

3.4.3 Réjection des perturbations aérodynamiques

La version précédente du robot OSCAR (OSCAR I) avait son œil mécaniquement couplé au corps, ce qui le rendait particulièrement sensible aux perturbations telles que des rafales de vent. Le nouveau robot (OSCAR II) est une amélioration majeure, puisque la direction du regard est découplée de celle de son corps. Nous avons comparé les performances du robot OSCAR II avec et sans ses réflexes oculomoteurs (RFV et VOR). Le robot OSCAR II sans ses réflexes oculomoteurs est équivalent au robot OSCAR I, dont l'œil est solidaire du corps.

Dans une expérience préliminaire [Kerhuel 07] nous avons frappé le robot avec une “machine à claques” développée à cet effet. Cette machine est composée d'un moteur à courant continu et d'un embrayage électromagnétique qui embraye brusquement un bâton venant frapper le robot violemment sur un côté. Dans l'expérience actuelle [Kerhuel 10], nous utilisons une perturbation plus naturelle (aérodynamique). Le dispositif expérimental utilisé à cet effet est le même que celui décrit dans la section 3.4.1, sauf qu'une turbine a été placée à 40cm derrière l'hélice droite (voir figure 3.9). Cette turbine génère un flux d'air de vitesse variable pouvant aller jusqu'à $5.2m.s^{-1}$. Le régime de la turbine générant le flux d'air est commandé par un signal PWM généré par une carte dSPACE. Pour étalonner la vitesse de l'air créé par la turbine, des commandes de divers rapports cycliques, PWM ont été appliquées pendant 10 secondes et la vitesse de l'air a été mesurée à hauteur du robot, et moyennée sur cette période. Pour comparer les performances du robot dans les configurations OSCAR I et OSCAR II, nous avons mesuré les positions angulaires du robot ($\theta_{heading}$) et de l'œil (θ_{er}), et reconstruit l'orientation du regard (θ_{gaze}) en appliquant :

$$\theta_{gaze} = \theta_{heading} + \theta_{er} \quad (3.2)$$

La figure 3.12 présente en gros plan la réponse de l'œil et du robot, dans sa configuration OSCAR I, à un brusque coup de vent (fig.3.12a : Réflexes Oculomoteurs OFF) et OSCAR II (fig 3.12b : Réflexes oculomoteurs ON). Lors de ces deux expériences, le temps mis par le vent pour parcourir les 40cm séparant la turbine du robot était de 240ms. Malgré le contrôleur inertiel du robot (voir fig.3.5), la courte rafale de vent crée une erreur de ($\theta_{heading}$) de 5° . A la fin de la perturbation, l'intégrateur du contrôleur inertiel compense ce déséquilibre en faisant tourner plus rapidement l'hélice contralatérale. Ainsi, lorsque la perturbation de vent s'arrête (aussi brusquement qu'elle a commencée), l'écart de vitesse de rotation des deux hélices entraîne le robot dans la direction opposée, créant de nouveau une erreur de -3° . La réaction du cap du robot est identique dans les

deux configurations du robot (OSCAR I et OSCAR II). Dans la configuration OSCAR I (œil couplé au corps), l'orientation du regard (θ_{gaze}) se confond avec l'orientation en cap du robot. La cible, située à la position angulaire 0° sort du champ de vision du robot ($\pm 1.8^\circ$) pendant une longue durée (400ms). En revanche, on voit que dans la configuration OSCAR II, la ligne du regard (découplée de l'orientation du corps) se maintient toujours à moins de 1.8° de la cible. La cible est donc toujours présente dans le champ visuel du robot, malgré l'importante perturbation appliquée.

3.4.4 Poursuite fine d'une cible

Pour mieux évaluer la robustesse du robot OSCAR II et sa capacité à rejeter des perturbations aérodynamiques, un *bord contrasté* vertical est translaté de façon sinusoïdale (voir figure 3.9). La poursuite visuelle est alors testée en présence de fortes rafales de vent générées par la turbine. La cible est déplacée par un moteur pas à pas en mode micro-pas, assurant une résolution de translation très fine (0.125mm), contrôlé à l'aide d'une carte dSPACE couplée au logiciel Simulink. Le déplacement sinusoïdal se fait lentement (période de 36s) sur une grande amplitude (78cm crête-à-crête, équivalent à une excursion angulaire, vue du robot, de 42.4°). Une série de perturbations aérodynamiques aléatoires est appliquée. La figure 3.13 montre que le robot est capable de poursuivre finement la cible et ce, malgré les perturbations aérodynamiques. On voit en effet que le cap du robot (ligne continue rouge sur la figure 3.13a) est maintenu à chaque instant sur le bord contrasté (courbe pointillée noire). Les perturbations aérodynamiques subies par la structure du robot entraînent de nombreuses micro-perturbations de cap ($\theta_{heading}$) mais on voit que malgré ces perturbations (visible par exemple entre les instants 0s et 40s), le robot ne perd pas la cible et continue à la suivre.

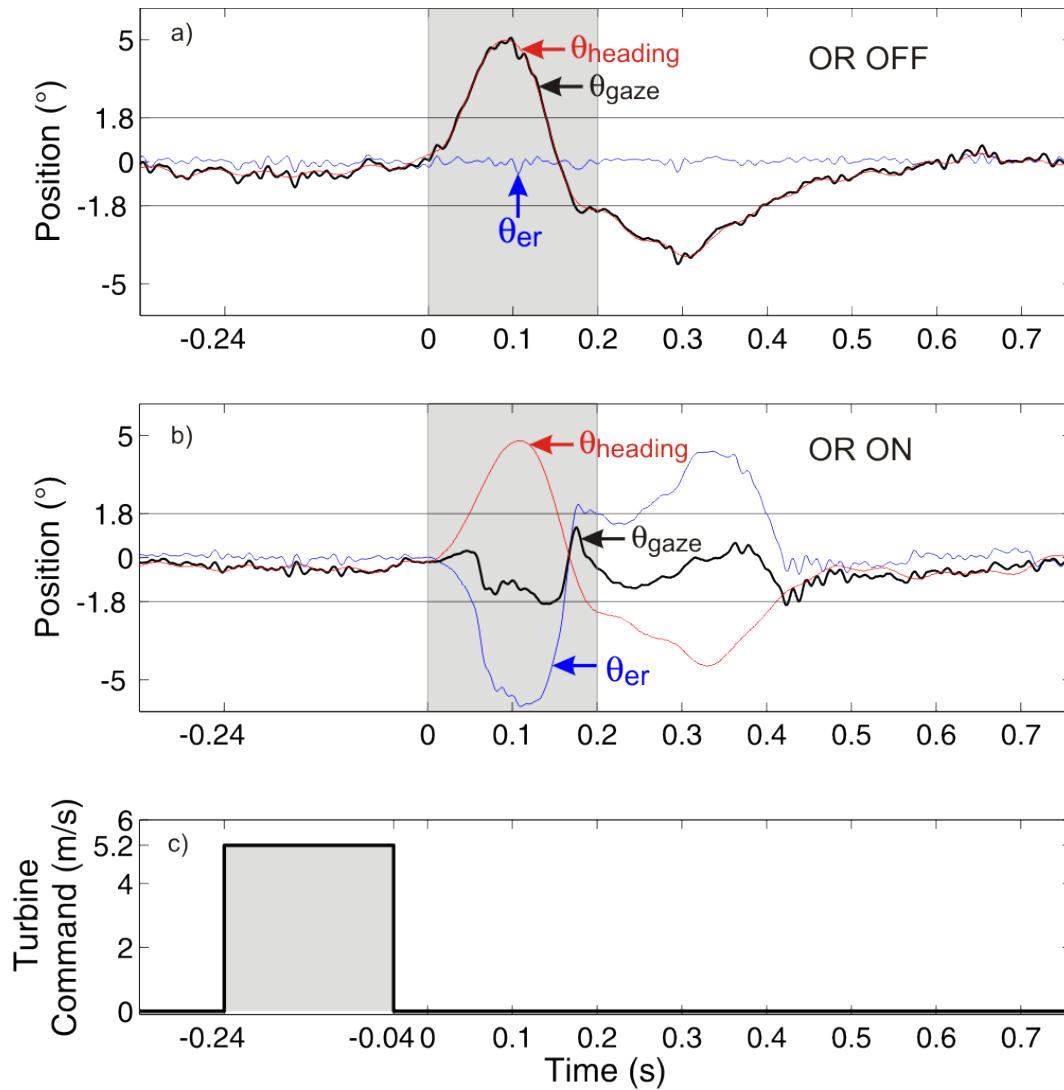


Fig. 3.12: (a) et (b) Fixation visuelle d'un bord contrasté en présence de perturbations aérodynamiques de type "impulsion de vent", d'une durée de 200ms. L'expérience a été répétée avec deux configurations du robot. Dans la première configuration (a), les réflexes oculaires sont *inactifs* (le robot est alors similaire à OSCAR I) et le regard est solidaire du corps. Dans la seconde configuration (OSCAR II), l'œil est découplé du corps et les réflexes oculaires sont *actifs*. Lors de ces deux expériences, la cible est statique, à la position 0° . Les encarts (a) et (b) montrent que la même perturbation aérodynamique entraîne les mêmes effets sur le cap (dans les deux cas, le cap du robot s'écarte jusqu'à 5° de la cible puis de 3° dans l'autre sens). Lorsque l'œil est couplé au robot (a), la cible sort largement du champ visuel ($\pm 1.8^\circ$), et ce, pendant une durée assez longue (400ms, de 0.03s à 0.4s). Par contre, lorsque l'œil est découplé du robot (b), la cible reste à l'intérieur du champ visuel ($-1.8^\circ < \theta_{\text{gaze}} < +1.8^\circ$). Le robot est donc tout à fait capable de maintenir son contact visuel avec la cible, en dépit des perturbations aérodynamiques importantes qu'on impose à son corps.

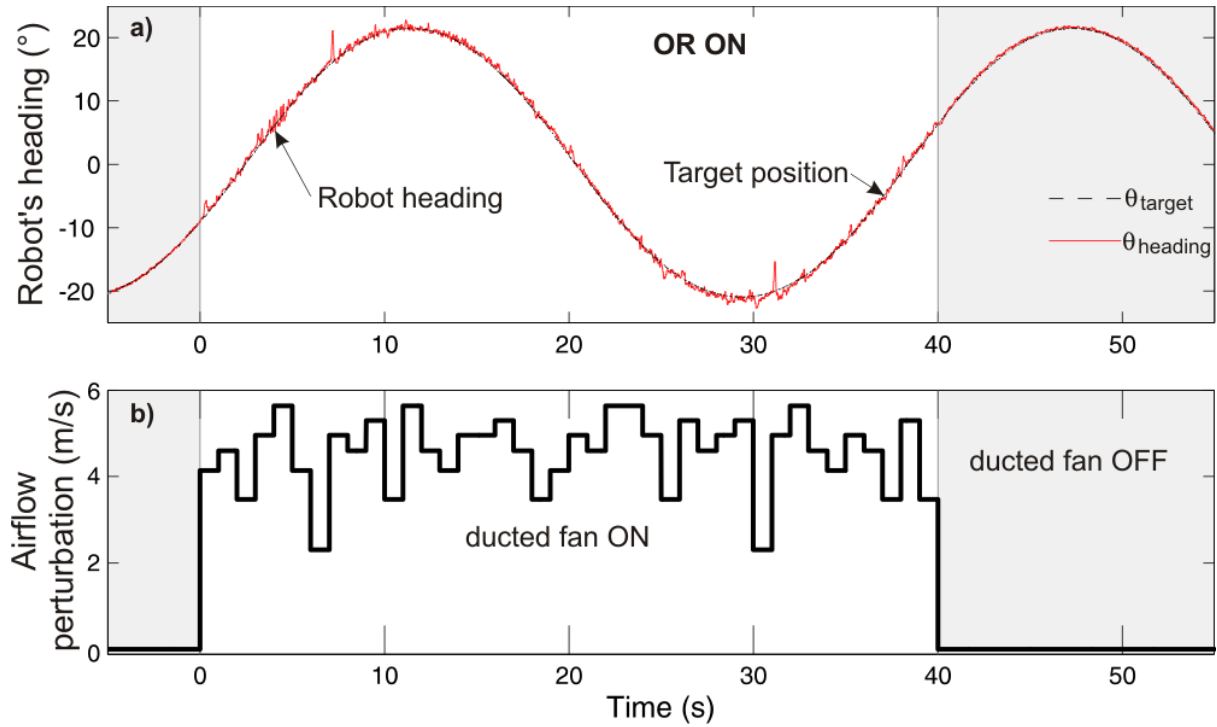


Fig. 3.13: Poursuite fine d'un bord contrasté par le robot OSCAR II en présence de rafales de vent aléatoires. Le robot OSCAR II a ses réflexes oculomoteurs activés (Réflexe Vestibulo-Oculaire (VOR) (RVO) + Réflexe de Fixation Visuelle (RFV)). Le bord contrasté, placé à $1m$ devant lui, est translaté horizontalement à $0.03Hz$ avec une amplitude de mouvement (vue du robot) de 42.4° . La vitesse maximale atteinte par le bord contrasté est de $6.3cm/s$, correspondant à une vitesse angulaire de $3.7^\circ/s$. On voit que le robot maintient son cap en direction de la cible malgré les fortes perturbations aériennes aléatoires (vent de 2.2 à $5.2m.s^{-1}$). Le découplage de l'œil aide à maintenir le contact visuel avec la cible (cf figure 3.12b) et renforce la robustesse du robot.

3.5 Bilan du robot OSCAR II

Le démonstrateur aérien de 100g présenté ici est doté d'un œil extrêmement rapide et d'un contrôle de cap qui imite le fonctionnement visuo-moteur, largement éprouvé, des insectes volants. Ce système est conçu pour maintenir l'orientation du robot en direction d'un bord contrasté, malgré les fortes perturbations aérodynamiques imposées sur sa structure. Le secret de cette réussite est le *découplage mécanique* entre l'œil et le corps du robot. L'œil du robot est doté de micromouvements rétiniens similaires à ceux observés chez la mouche, qui permettent d'obtenir une hyperacuité dans un champ visuel de $\pm 1.8^\circ$. C'est cette hyperacuité qui permet de localiser le bord contrasté avec précision. Cette localisation ne met en œuvre que deux photorécepteurs (2 pixels). Le principal avantage de ce dispositif minimaliste, comparativement aux systèmes visuels classiquement utilisés sur les plates-formes robotiques, est qu'il nécessite très peu de ressources calculatoires, ce qui permet d'embarquer tout le traitement visuo-moteur à bord de robots aériens légers. L'inconvénient possible de l'étroitesse du champ de vision est ici compensé par le degré de liberté supplémentaire dont bénéficie l'œil du robot, dont le regard peut s'orienter de manière indépendante du corps. La dynamique rapide de l'œil permet d'implanter deux réflexes oculo-moteurs :

- le Réflexe Vestibulo-Oculaire (VOR) (RVO), et
- le Réflexe de Fixation Visuelle (RFV).

Le réflexe inertiel stabilise le regard du robot lorsque celui-ci est soumis à des perturbations. Chaque fois que le cap du robot dévie, par exemple sous l'effet d'une rafale, la déviation $\theta_{heading}$ est mesurée à bord et instantanément compensée par le réflexe vestibulo-oculaire. Ce réflexe entraîne en effet une contre-rotation appropriée et immédiate de l'œil, qui permet alors de stabiliser le regard du robot. Ce Réflexe Vestibulo-Oculaire (VOR) (RVO) est couplé à un Réflexe de Fixation Visuelle (RFV). Le RFV permet au robot de fixer une cible stationnaire avec une très grande précision et pendant une durée importante (par exemple 37 minutes dans l'expérience décrite à la figure 3.10), et de poursuivre une cible visuelle en mouvement avec précision, sans être perturbé par les rafales de vent (figure 3.13 b). Le robot poursuit la cible de manière aussi robuste qu'il fixe la cible stationnaire, car dans les deux cas, le RVO stabilise le regard et permet de compenser de manière systématique toute perturbation à laquelle le corps du robot serait exposé. Le réflexe de fixation visuelle permet également de compenser la dérive inévitable du gyromètre (utilisé pour mesurer la vitesse en lacet du robot $\Omega_{heading}$).

On montre enfin que la dynamique rapide de l'œil -des saccades- permet également au robot d'exécuter des mouvements rapides de l'œil, lui permettant de changer de référence visuelle (voir fig.3.14). Ces saccades sont qualitativement identiques à celles de l'œil des primates et des nombreux insectes. Mais la réponse dynamique obtenue ici est meilleure que celle du système oculomoteur de l'homme.

Sans la stratégie de pilotage "par le regard" présentée ici, la robustesse acquise grâce au découplage tête-corps est étendue au système de contrôle du cap. Un véhicule aérien de ce type rejette donc les perturbations aérodynamiques qu'il rencontre et réoriente sa trajectoire en direction de la cible, sur laquelle le regard reste constamment verrouillé. Cette stratégie de contrôle visuo-inertielle est une étape vers l'élaboration d'aéronefs autonomes. La légèreté et la faible consommation en énergie du système le rendent particulièrement adapté aux engins aériens et aquatiques miniatures, qui sont sujets à de multiples perturbations telles que les battements d'ailes (ou les ondulations du corps), les rafales de vent (ou les courants d'eau), les effets de sol, les tourbillons, et tout autre type de perturbation aérodynamique ou hydrodynamique. La nature montre qu'il est préférable de compenser ces perturbations au plus tôt. Le réflexe visuo-inertiel réalisé ici permet de stabiliser efficacement le regard. Le fait d'ancrer le regard sur un fait saillant de l'environnement fournit une véritable référence visuelle, robuste et sans dérive, permettant de se stabiliser et de naviguer en milieu inconnu.

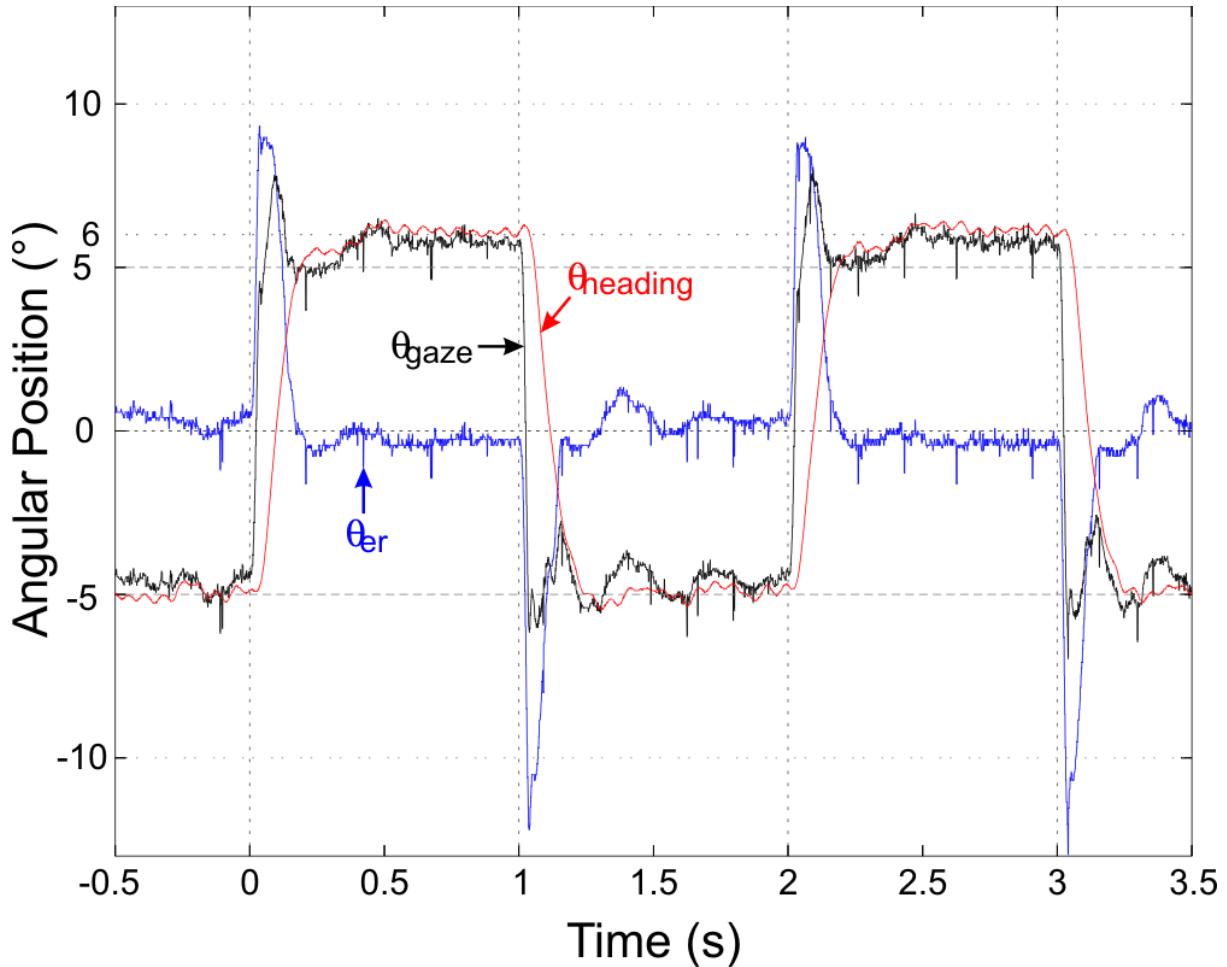


Fig. 3.14: Changement rapide de cap. Le robot OSCAR II est encore monté sur l'axe du *resolver* mesurant sa position angulaire. Il est libre de tourner autour de son axe de lacet. Deux cibles (*deux bords contrastés*) séparées de 16.5cm sont placées face au robot, à une distance de 116.5cm . Le cap du robot est d'abord verrouillé sur la 1^{ère} cible, puis à chaque seconde, un offset important ($\pm 10^\circ$) est ajouté au signal C_d (voir fig.3.5 p.181) pour que le regard (courbe noire : θ_{gaze}) se pose rapidement sur la cible connexe, grâce au mouvement oculaire très rapide (saccade ; courbe bleue : position de l'œil dans la tête θ_{er}). On voit que le cap du robot (courbe rouge : $\theta_{heading}$) rejoint la direction du regard, tandis que l'œil revient rapidement à sa position initiale naturelle *centrée* ($\theta_{er} = 0^\circ$). Les deux orientations angulaires successivement maintenues par le robot (-5° et $+6^\circ$) montrent que l'angle réel séparant les deux bords contrastés (vus du robot) est de 11° . On voit que le système de poursuite visuelle permet même au robot de se verrouiller sur la nouvelle cible malgré une consigne de saccade oculaire légèrement erronée (10° au lieu de 11°).

4. CONCLUSION

Dans ce travail de thèse, réalisé dans l'équipe biorobotique de Marseille, nous avons montré que le vivant peut être source d'inspiration pour la conception de capteurs et de robots efficaces. Notre démarche ici n'était pas d'imiter de manière fidèle les solutions élaborées par la nature, mais plutôt de s'en inspirer pour les adapter au mieux aux contraintes technologiques actuelles.

Les différents composants (capteurs, actionneurs, systèmes de traitement) de l'insecte sont le fruit d'une évolution de *350 millions d'années*, qui a convergé vers des solutions efficaces. Il peut paraître étonnant de vouloir adapter les solutions naturelles quand il suffirait d'en reproduire le fonctionnement. Ce faisant, d'inévitables difficultés techniques apparaissent car il est aujourd'hui encore difficile de faire aussi bien que la nature sur bien des points :

- La *précision*, la rapidité et la robustesse des actionneurs (par exemple, les 23 paires de muscles contrôlant la position angulaire de la tête chez la mouche),
- Le *parallélisme* (le fonctionnement du cerveau, même celui de la mouche, est totalement parallèle ; un **FPGA**, ou un circuit **VLSI** analogique, bien que parallèle, est limité au niveau de ses entrées/sorties),
- La *sensibilité* des capteurs (par exemple les photorécepteurs, sensibles à l'absorption d'un unique photon et les mécano-récepteurs capables de détecter des déplacements d'un nanomètre)

Les nombreuses différences entre les briques élémentaires constituant le vivant et celles constituant les robots réduisent l'efficacité d'une transposition directe des "solutions de la biologie" vers le domaine de la robotique. Il est pourtant possible de reproduire de manière assez fidèle, par exemple, les propriétés originales de l'optique élémentaire et du système nerveux d'un œil composé d'insecte.

Au chapitre 2.1 (p.17), nous avons décrit l'optique de l'ommatidie de l'œil composé et nous l'avons reproduite. Les caractéristiques optiques ($\Delta\varphi$ et $\Delta\rho$) obtenues, bien que

basées sur des phénomènes physiques différents par suite du changement d'échelle (diffraction chez l'insecte p.19, défocalisation sur le robot p.29) sont très similaires.

C'est avec une optique médiocre de ce type (l'angle inter-ommatidial est de l'ordre de 3°) que les insectes sont capables de naviguer dans des environnements inconnus, de poursuivre leurs congénères et d'attraper leurs proies avec une précision inégalée. Cela démontre que l'information contenue dans les signaux issus de cette optique est suffisamment riche pour réaliser toutes ces tâches. Un traitement du signal, de complexité moyenne, permet d'extraire les diverses informations.

Un premier traitement, identifié chez la mouche, permet d'extraire une information de mouvement (flux optique). Déjà, ce traitement avait été reproduit dans le robot-mouche du laboratoire, dès 1991, avant d'être repris dans d'autres robots. Alors que ces travaux s'attachaient à reproduire fidèlement le traitement identifié chez la mouche, nous avons ici proposé un traitement utilisant un algorithme de descente de gradient permettant d'obtenir un signal de sortie continu, mieux adapté à son utilisation dans des boucles de contrôle. Cet algorithme n'est aucunement inspiré du vivant, mais le principe fondamental de la mesure de flux optique utilisé, ainsi que les propriétés de l'optique restent très largement inspirées de l'insecte.

Un second traitement, dont on suppose la présence chez la mouche, lui permettrait de localiser avec précision ses congénères ou des bords contrastés de l'environnement. On suppose que la vibration de la rétine, qui a été mise en évidence chez la mouche au laboratoire, couplée à son optique originale, lui permettrait d'extraire l'information de *position angulaire*. Une vibration, couplée à une optique également similaire à celle de la mouche avait déjà été mise en œuvre à bord du robot OSCAR I. Cette première réalisation a permis de découvrir que cette vibration, couplée à une optique et un circuit DEM biomimétiques, permet de localiser avec précision un bord contrasté ou une barre fine. Un éclairage nouveau a été apporté ici sur le principe même conduisant à une mesure de position angulaire. Mais nous avons également adapté ce capteur optique au fonctionnement de microaéronefs, ce qui a abouti à un capteur totalement nouveau, appelé VODKA.

La nécessité d'un balayage périodique des axes optiques, parfaitement identique d'une période à l'autre, constitue l'inconvénient majeur du capteur OSCAR. Cette contrainte de conformité à une loi de balayage périodique particulière nécessite un actionneur dédié de haute précision, lourd, fragile et gourmand en énergie. Le nouveau capteur, VODKA, que

nous avons mis au point peut exploiter la vibration propre de l'aéronef pour réaliser une mesure de position angulaire encore beaucoup plus précise que celle du capteur [OSCAR](#). Le capteur [VODKA](#) présente donc une robustesse et une simplicité étonnantes, qui le rendent particulièrement adapté à une utilisation en microrobotique aérienne. Même si ce capteur n'utilise pas de circuit [DEM](#), il est possible qu'un traitement similaire soit effectué chez la mouche (et même chez l'homme) pour améliorer l'acuité visuelle. Un tel traitement n'a cependant pas encore été identifié.

Enfin, un système de stabilisation de la vision et de guidage visuel a été présenté ici sur un petit robot aérien nouveau appelé [OSCAR II](#). Cette fonction est plus difficile à réaliser, car elle nécessite l'utilisation d'un actionneur à la fois précis et rapide pour orienter l'œil du robot, comme peut le faire la mouche avec ses 23 paires de muscles qui contrôlent finement la tête. Malgré les performances atteintes par notre robot [OSCAR II](#), une telle approche reste d'une efficacité limitée du fait des limitations technologiques actuelles. Ainsi, même si une cible est maintenue correctement dans le champ visuel (restreint) du robot lors de perturbations aérodynamiques importantes, quelques mouvements rapides et de grande amplitude de la cible peuvent perturber la mesure de position réalisée. De nouveaux développements continuent d'explorer cette voie au laboratoire grâce à de nouvelles technologies.

Compte tenu des technologies actuelles, il pourrait être intéressant d'explorer une voie dans laquelle la vision serait stabilisée de manière électronique. Ainsi, on peut imaginer utiliser un œil panoramique qui ne traiterait que le groupe de pixels dirigé vers la cible, ou encore un mécanisme de pointage électronique (multitude de capteurs très directifs côte-à-côte, ou encore formation de voies) qui permettrait, à partir d'une multitude de capteurs, de recréer le signal tel qu'il serait vu par un capteur optique virtuel parfaitement stabilisé.

Sans même aller vers de nouveaux traitements pour stabiliser électroniquement la vision, la simple extension à une multitude de pixels de ce que nous avons réalisé ici avec seulement deux pixels permettrait de piloter un microaéronef avec une grande efficacité, en venant à bout des contraintes draconiennes de masse, de volume et de consommation de l'avionique embarquée.

4.0 CONCLUSION

5. ANNEXES

5.1 Calibration des fronts de contrastes

Le tableau 5.1 montre les mesures des contrastes des divers bords contrastés utilisés. La mesure est effectuée avec le même capteur IC-Haus que celui utilisé sur la plateforme (2.1.2 p.20). L'estimation du contraste est ainsi faite dans la même plage spectrale que celui de l'œil élémentaire à deux pixels (2.4a p.21). Le capteur IC-Haus a une sortie en courant basse impédance. Ce courant est transformé en tension par un montage transimpédance non détaillé ici.

Contraste	Conditions de mesure	U_0	U_1	U_2	Δ_{U_1}	Δ_{U_2}	$\frac{ \Delta_{U_1} - \Delta_{U_2} }{\Delta_{U_1} + \Delta_{U_2}}$
Vert-Jaune	Lampe DC	2.532V	2.478V	2.476V	193mV	201mV	2%
Vert-Jaune	Lampe Néon	2.532V	2.339V	2.324V	54mV	56mV	1.8%
Vert-Jaune	éclairage naturel	2.532V	2.492V	2.487V	40mV	45mV	5.9%
Vert-Noir	Lampe DC	2.532V	2.507V	2.347V	25mV	185mV	76.2%
Vert-Noir	Lampe DC	2.532V	2.507V	2.337V	25mV	195mV	77.2%
Vert-Noir	Lampe Néon	2.532V	2.527V	2.467V	5mV	65mV	85.7%
Vert-Noir	Lampe Néon	2.532V	2.527V	2.469V	5mV	63mV	83.0%
Vert-Noir	éclairage naturel	2.532V	2.488V	2.528V	44mV	4mV	83.3%

Tab. 5.1: Calibration des bords contrastés utilisés. La tension U_0 est la sortie du capteur dans l'obscurité. Les tensions U_1 et U_2 correspondent aux sorties du capteur sur chaque pannel du contraste. Une légère variation apparaît entre les contrastes mesurés en éclairage continu (DC) et en éclairage artificiel (néon). On préférera utiliser les mesures effectuées en éclairage continu.

5.2 Le robot OSCAR II

5.2.1 Contrôleur de l'œil

Chez l'homme, le système oculomoteur a des performances qui sont contradictoires. D'une part, les muscles extra-oculaires permettent de maintenir le regard fixe, avec une précision étonnante [Steinman 67], d'autre part, ces muscles permettent de tourner l'œil à des vitesses importantes : une saccade d'amplitude modérée est réalisée dans un intervalle de seulement 100ms [Becker 91], ce qui correspond à une vitesse de $200^\circ \cdot s^{-1}$.

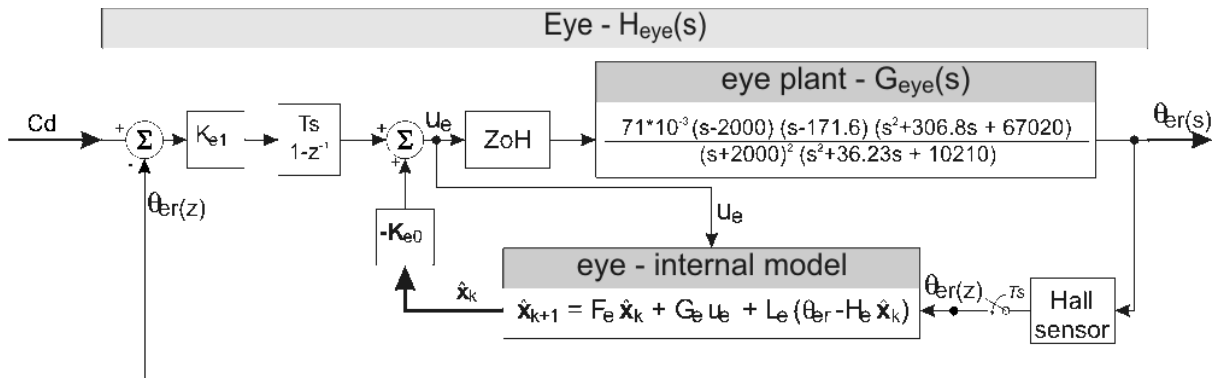


Fig. 5.1: Schéma bloc du contrôleur de l'œil qui asservit à l'entrée C_d l'angle θ_{er} (entre le cap du robot et la ligne de regard). Le modèle interne utilise à la fois la commande $U_e(z)$ et la mesure bruitée de l'angle θ_{er} pour estimer les quatre états internes représentant l'actionneur VCM utilisé. Le cinquième état est l'intégrale de l'erreur de position de l'œil, ce qui assure ainsi une erreur statique nulle.

Nous avons voulu nous rapprocher des performances du système oculomoteur de l'homme en utilisant un actionneur conventionnel pour contrôler l'orientation du regard du robot OSCAR II. Ce dispositif se compose d'un micro Voice Coil Motor (VCM) extrait d'un micro disque dur (les Microdrive Hitachi ou Magicstor donnent des résultats satisfaisants). Cet actionneur, conçu pour contrôler la position de la tête de lecture / écriture dans un disque dur miniature [Chen 06], a été utilisé ici à bon escient pour contrôler la position de l'œil (voir figure 3.3) parce qu'il offre un excellent compromis entre une vitesse élevée lors des changements de position, et une précision importante dans le positionnement.

Le passage d'une intensité dans la bobine du **VCM** génère une force de Laplace qui déplace le bras. Le contrôle du **VCM** nécessite donc une boucle de rétroaction en position. L'angle de l'œil du robot a été mesuré à l'aide d'un capteur à effet hall que nous avons placé devant un micro aimant ($1mm^3$) solidaire du tube constituant l'œil (voir fig.3.3 et fig.3.2). Une approche par retour d'état a été utilisée pour mettre en œuvre ce contrôleur composé d'un estimateur en cascade avec un retour d'état augmenté via le gain K_e (calculé avec la méthode LQG classique). Cette structure asservis l'angle θ_{er} à l'angle de consigne C_d (fig.5.1, 3.8 et 3.5). L'approche par retour d'état utilisée ici a donné de bons résultats malgré la non-linéarité de la réponse de l'œil (qui a été approchée par le modèle linéaire $G_{oeil}(s)$) et le bruit important présent sur le signal de sortie du capteur à effet Hall.

La réponse à un échelon, présentée sur la figure fig.5.2, montre la dynamique obtenue extrêmement rapide pour l'angle θ_{er} entre l'œil et le robot, avec un contrôle en boucle fermée. Le temps de montée T_{rise} est de $19ms$ et le temps de stabilisation T_{settle} est de $29ms$. Ces temps de réponses sont inférieurs à ceux obtenus avec l'approche fréquentielle ($44ms$ dans la version originelle : voir figure 4 dans [Kerhuel 07]).

L'œil du robot ainsi contrôlé atteint un pic de vitesse à $2300^\circ/s$ lors d'une saccade de 45° ce qui est environ quatre fois plus élevé que les $660^\circ/s$ atteint par notre ancien PID, et trois fois supérieur à la vitesse de saturation ($600^\circ/s$ de l'œil humain mesuré au cours d'une saccade [Robinson 64]). La réponse de ce système oculomoteur peut être considérée comme linéaire, à l'inverse du système oculomoteur de l'homme, dans lequel le temps de montée augmente avec l'amplitude des saccades [Becker 91].

5.2.2 Contrôleur de cap

Ici encore, le contrôleur réalisé utilise un retour d'état, similaire à celui utilisé pour contrôler le robot-tête (figure 5.3). Le modèle identifié de 4 états a été réduit à trois états pour réduire la charge de calcul du microcontrôleur. Un quatrième état intégral a été ajouté. Cet état permet de compenser la différence d'efficacité entre les deux hélices du robot et d'assurer ainsi une erreur statique nulle. La robustesse du compensateur LQR réalisé permet un contrôle efficace du cap du robot malgré les non-linéarités qui sont difficilement modélisables. Ce contrôleur permet également "d'encaisser" quelque peu les écarts entre le robot réel et son modèle.

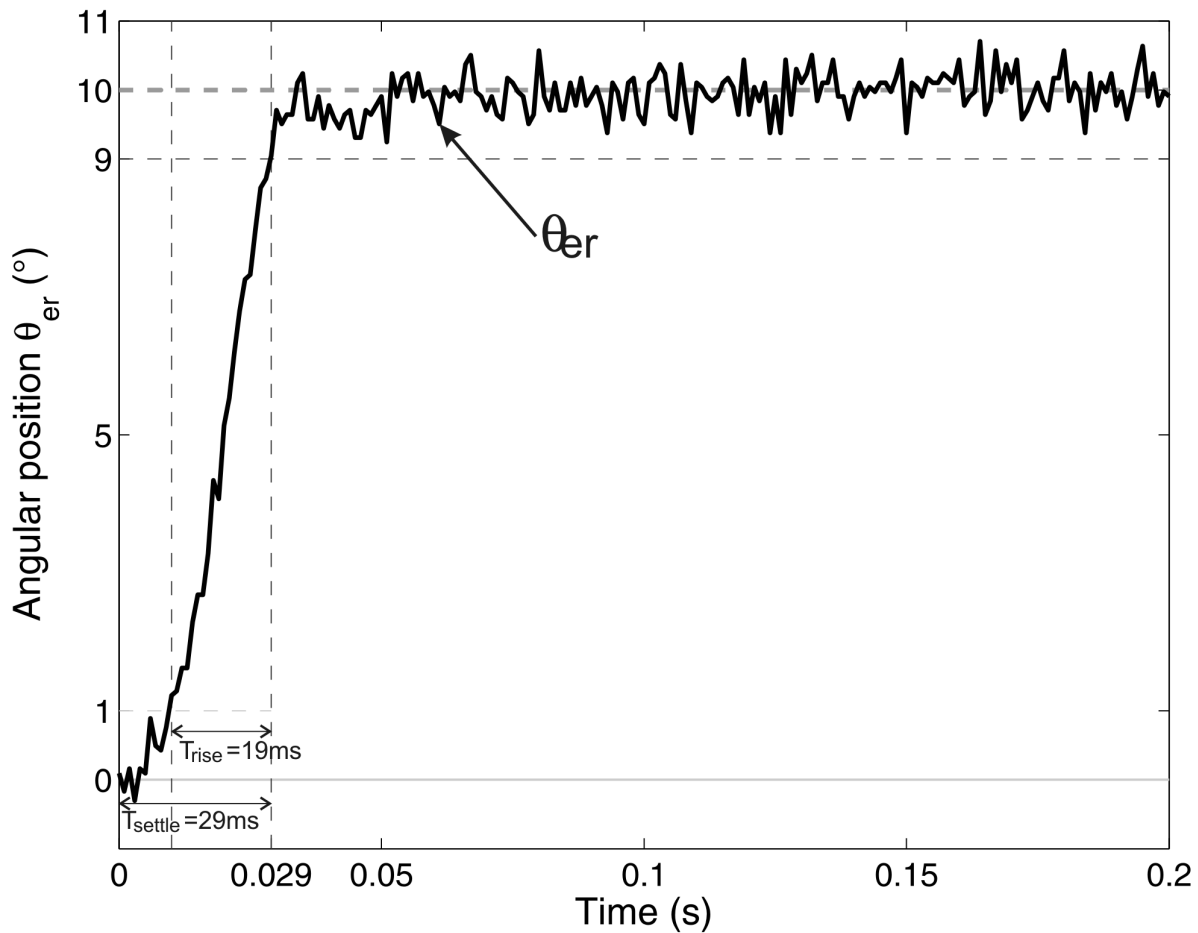


Fig. 5.2: Réponse de l'œil (θ_{er}) à un échelon de 10° appliqué en consigne sur l'entrée C_d (Fig. 5.1,3.8 et 3.5). L'actionneur Voice Coil Motor (VCM) (voir fig.3.3) est contrôlé par un retour d'état, avec lequel on obtient un temps de réponse (T_{settle}) très court (seulement $29ms$). Un capteur à effet Hall placé devant un micro-aimant, lui-même solidaire du tube de l'œil (fig.3.2), permet de mesurer l'angle θ_{er} entre l'œil et le corps du robot.

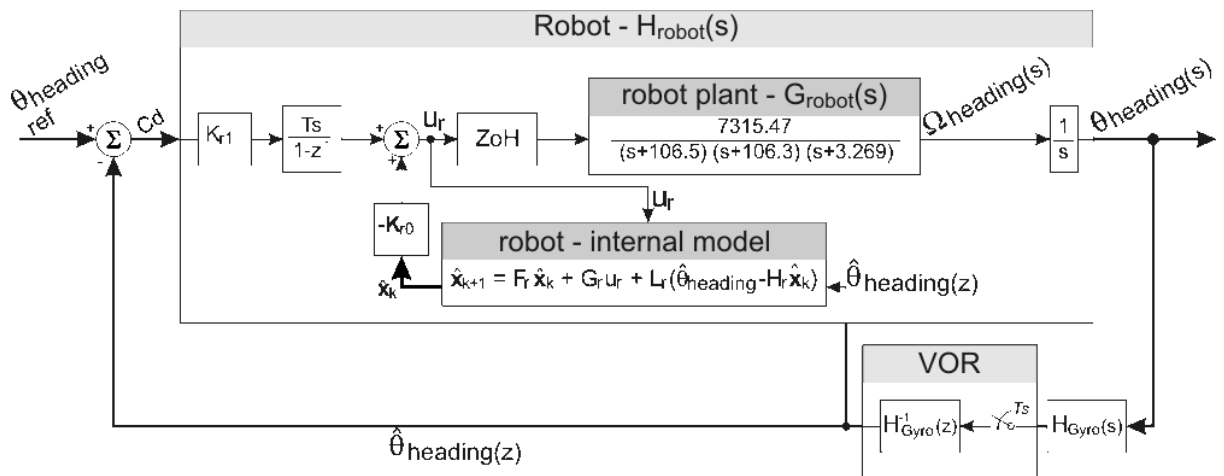


Fig. 5.3: Schéma bloc du contrôleur de cap du robot. Le modèle interne du robot est ici réalisé grâce à un modèle d'état à trois variables. Un état intégral a été ajouté. L'approche LQG classique a été utilisée pour calculer les gains vectoriels K_{r0} et K_{r1} .

5.2.3 L'électronique embarquée

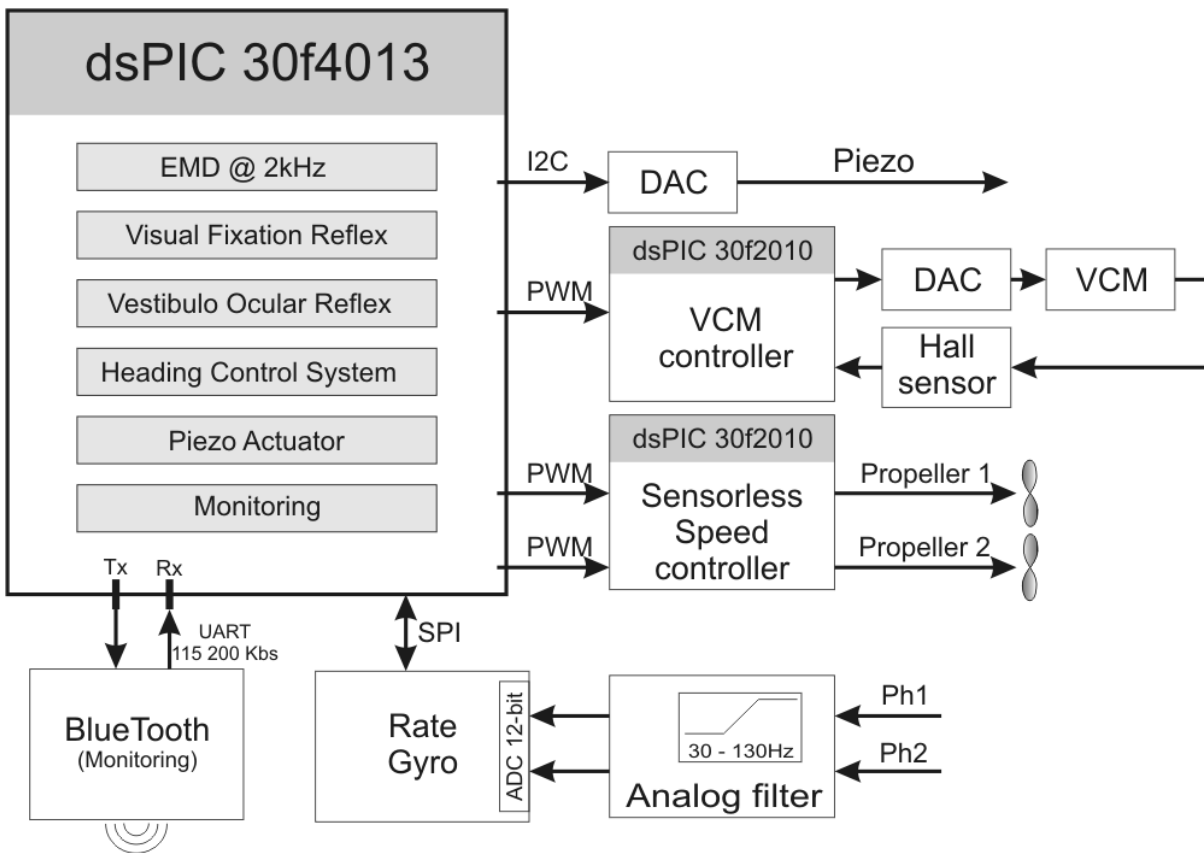


Fig. 5.4: Schéma simplifié de l'électronique embarquée. Le robot est équipé de trois microcontrôleurs Microchip dsPIC. Sur le microcontrôleur principal (dsPIC 30F4013) tourne un modèle Simulink à fréquence d'échantillonnage multiple ("multirate"), qui effectue les principales tâches de contrôle. Deux microcontrôleurs secondaires (dsPIC 30f2010) sont utilisés pour contrôler respectivement l'orientation de l'œil et la vitesse de rotation des hélices. Le microcontrôleur principal transmet la consigne de position angulaire de l'œil et de vitesse angulaire des deux hélices via un signal MLI. Les deux signaux visuels analogiques (Ph_1 et Ph_2) sont échantillonnés par ce microcontrôleur principal, qui contrôle également le signal de déplacement de la rétine (déplacement de la barre piézo-électrique). Un émetteur/récepteur Bluetooth connecté au périphérique UART du microcontrôleur permet de transmettre les enregistrements du robot vers le PC, mais également de recevoir des instructions transmises par le PC (par exemple pour ajuster un gain). Cette liaison radio permet également de reprogrammer le microcontrôleur principal via le bootloader *tinybl*d [Chiculita 08].

Une photographie de la carte électronique principale est représentée sur la figure 5.5. L'électronique numérique embarquée dans le robot est composée du microcontrôleur principal (dsPIC 30f4013) qui supervise deux microcontrôleurs plus petits (dsPIC 30f2010) (voir fig.5.4). L'un de ces deux microcontrôleurs contrôle la vitesse de rotation de chaque hélice en boucle fermée (contrôleur de vitesse sans capteur décrit dans [Viollet 08]). L'autre contrôle la position angulaire de l'œil θ_{er} avec un asservissement (décrit sur le schéma de la figure 5.1) qui utilise des amplificateurs analogiques de puissance alimentant la bobine du VCM.

Le schéma simulink chargé dans le dsPIC 30f4013 est en charge d'

- extraire l'erreur rétinienne ε_r avec un traitement décrit au chapitre 2.4 p.76,
- estimer la variation de cap du robot $\hat{\theta}_{heading}$ via le gyromètre,
- implémenter le Réflexe de Fixation Visuelle,
- implémenter le Réflexe Vestibulo-Oculaire (VOR),
- implémenter le contrôle de cap du robot,
- commander l'actionneur piézo-électrique de la rétine.

Le dsPIC principal gère donc deux types d'informations sensorielles : visuelle (les signaux des deux photodiodes) et inertielle (le gyromètre). Elle commande également un amplificateur de tension élevé utilisé pour contrôler la position de la lame piézo-électrique en charge du processus de microbalayage rétinien [Viollet 05]. Le périphérique Bluetooth fournit une communication radio en full duplex entre le robot et la station sol (PC tournant sous Matlab). Cette liaison radio permet de surveiller à distance l'évolution des différentes variables, de reprogrammer le microcontrôleur principal (dsPIC 30f4013) et accessoirement de transmettre des ordres (marche/arrêt).

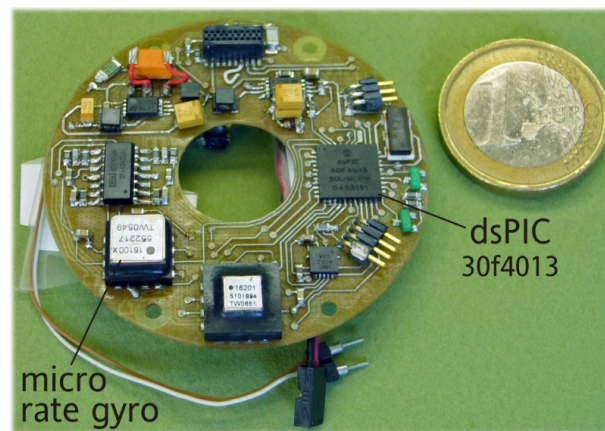


Fig. 5.5: Rondelle principale du robot OSCAR II comprenant le pilote automatique du robot. Cette carte comprend le microcontrôleur principal (dsPIC 30f4013) et le gyromètre (ADIS16100). Toutes les entrées/sorties de cette carte électronique sont électriquement isolées des autres équipements électroniques (barreau piézo, *VCM*, contrôleur de vitesse angulaire sans capteur “sensorless”). Cette carte est alimentée par une petite batterie Li-Po de 3.6V-100mAh.

INDEX

- action dérivée, 41
- actionneur, 83, 86, 100, 102, 104, 124, 132, 159, 161, 163, 173, 175, 176, 178, 197, 202, 204, 207
 - hélice, 175
 - moteur DC, 86
 - piézo-électrique, 86
- micro-aéronef, 169
- aile volante, 169
- tâche d'airy, 19
- algorithme de descente, 58
- algorithme de flux optique
 - DEM, 53
 - limites, 55
 - intensity-based, 48
 - poursuite, 58
 - résultats expérimentaux, 70
 - variantes, 64
 - time to travel, 53
 - token-based, 48
- amplificateur opérationnel, 40
- antenne, 38
- anti-repliement, 40
- avionique, 169
- axes optiques, 18

- balayage, 84
- batterie, 175, 208
- bembex, 171
- bidirectionnelle, 53, 70
- Bluetooth, 207

- bord contrasté, 26, 28
- boucle d'asservissement, 57
- boucle de contrôle, 55
- bruit, 53, 72
- Butterworth, 43

- canaux semi-circulaires, 179
- CAO, 81
- capteur à effet hall, 176
- capteur de position angulaire
 - OSCAR, 76
 - VODKA, 102
- carbone, 176
- carte électronique hybride, 39
- CCD, 79
- cellules pigmentaires, 19, 36
- cellules rétinienne, 36
- compression, 53
- cône cristallin, 36
- conformité, 86
- contraste, 57
- contrôle, 177
- conversion courant-tension, 40
- convolution, 20, 27
- coupe, 36

- $\Delta\varphi$, 52, 58
- $\Delta\rho$, 52
- Δt , 58
- Détecteur Elementaire de Mouvement (DEM), 38
- démodulation, 121, 162

- asynchrone, 123
- détecteur d'enveloppe, 124
- synchrone, 123
- dépassement, 42
- dérivée temporelle, 41
- détection de mouvement, 38
- Diagramme de Bode, 44
- diffraction, 19
- discontinuité, 57
- discret, 68
- division par 0, 119
- mini-drone, 169
- dSpace, 186, 190, 191
- dSpace RTI1104, 29
- dynamique, 55, 72
- échantillonnage, 40, 45, 53, 68
- échantillonnage spatial, 18, 33
- endurance, 186
- erreur, 72
- évitement d'obstacle, 171
- expérimentation, 70
- facettes, 17
- filtre
 - analogique, 40
 - butterworth, 42
 - lamina : Passe-haut, 38
 - numérique
 - Réponse Impulsionnelle Finie, 43
 - Réponse Impulsionnelle Infinie, 43
 - passé-bande, 40, 89
 - passé-bas, 37, 42
 - passé-haut, 38
 - spatial, 31
- fixation visuelle, 142, 186
- FLIR, 169
- flux optique, 46, 72, 74
 - définition, 46
- focal, 22
- dé-focalisation, 22
- fonction de sensibilité, 26
- fonction de transfert, 41
- fonction inverse, 58
- fréquence spatiale, 57
- Fonction de Transfert de Modulation (FTM), 31
- game de contraste, 57
- flou gaussien, 22
- gaussienne, 25, 31
- GPS, 169
- guêpe des sables, 171
- guide d'onde, 19, 37
- gyromètre, 70, 72, 74
- hélicoptère, 169
- Ic-haus, 40
- identification
 - $\Delta\rho$, 25, 28
 - $\Delta\varphi$, 25, 28
 - ν_{co} , 33
 - focal, 30
- identification des paramètres optiques, 25
- information, 57
- intensité lumineuse, 58
- lamina, 36, 38
- lentille, 23
- lentille convexe, 20
- liaison radio, 169
- limite de résolution de l'optique, 31
- lobula, 36
- lobula plate, 36

- LS2C, 40
- luminance, 35, 37, 57
 - modélisation, 28
- machine à claques, 190
- MC2 microflyer, 169
- medulla, 36
- microroulement conique, 176
- microvibration, 78
- MOT, 76, 83
- mouche, 37, 46, 83
- muscle, 76
- Nyquist, 34
- œil composé, 17
- oiseaux, 169
- ommatidie, 17, 35, 36, 52
- ommochrome, 37
- optique, 52
- oreille interne, 179
- perturbation aérodynamique, 190, 191
- photodiode, 40, 72
 - modélisation, 28
- photorécepteur, 20, 52, 70
- phototransduction, 17, 19, 35
- pointage électronique, 38
- polynôme, 43
- potentiel d'action, 37
- poursuite fine, 77, 145, 171
- précision, 53
- prototypage rapide, 207
- radar, 169
- rafraîchissement, 57, 70
- réinitialisation, 58
- ressources calculatoires, 45
- rétine, 76, 83
- rhabdomère, 17, 19, 36, 38
- rotation, 70
 - dispositif, 102
- rotation des axes optiques, 83
- saccade, 77, 196, 203
- sens préféré, 70
- sensibilité spectral, 21
- sensibilité directionnelle, 31
- seuil, 53, 55
- sonar, 169
- source ponctuelle, 25
- spike, 37
- stabilisateur d'image, 172
- tension analogique, 58
- transformée de Fourier, 31
- transitoire, 57, 89
- translation
 - de la lentille, 102
 - de la rétine, 102
- variation d'éclairement, 37
- verrouillage visuelle
 - cible en mouvement, 144, 193
 - cible fixe, 142, 188
- vibration, 102
- vitesse angulaire
 - mesure de position, 86
 - variable, 86
- vitesse angulaire de défilement, 46
- vitesse linéaire, 57
- \oplus , 68
- zone de danger, 46

BIBLIOGRAPHIE

- [Amic 02] S. Amic. Intégration des fonctions de détection de mouvements par le traitement parallèle des signaux visuels. Master's thesis, Ecole Nationale Supérieure d'Electronique et de Radioélectricité de Grenoble (ENSERG/INPG), Grenoble, Travaux de Master réalisés dans l'équipe Biorobotique, Marseille. 2002.
- [Ballard 89] D. H. Ballard. *Reference frames for animate vision*. In Proc. 2nd Int'l. Congress of Neuroethology, pages 1635–1641, Berlin, September 1989.
- [Becker 91] W. Becker. Vision and visual dysfunction (vol 8), chapitre 5 : Saccades, pages 95–137. GR.H.S. Carpenter (Ed) Macmillan Press, Ltd, 1991.
- [Beyeler 09] A. Beyeler, J.-C. Zufferey & D. Floreano. *Vision-based control of near-obstacle flight*. *Autonomous Robots*, vol. 27, no. 3, pages 201–219, October 2009.
- [Blanès 86] C Blanès. Appareil visuel élémentaire pour la navigation à vue d'un robot mobile autonome. Master's thesis, DEA de Neurosciences (M.S. thesis), Université de la Méditerranée (Aix-Marseille II), Marseille, 1986.
- [Blanès 91] C Blanès. *Guidage visuel d'un robot mobile autonome d'inspiration biologique, 2nd partie*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), Grenoble, 1991.
- [Boeddeker 03] N. Boeddeker, R. Kern & Martin Egelhaaf. *Chasing a dummy target : smooth pursuit and velocity control in male blowflies*. In Proc. R. Soc. Lond.B 270, pages 393–399, 2003.
- [Brückner 06] A. Brückner, J. Duparré, A. Bräuer & A Tünnermann. *Artificial compound eye applying hyperacuity*. *Opt. Express*, vol. 14, no. 25, pages 12076–12084, 2006.
- [Buchner 82] E. Buchner. Behavioural analysis of spatial vision in insects., volume 74. Plenum, 1982.

- [Carpenter 88] R. H. S. Carpenter. *Movements of the eyes*, 2nd edition, chapitre 2 : Vestibular eye movements. PION, London, 1988.
- [Chen 06] B. M. Chen, T. H. Lee, K. Peng & V. Venkataramanan. *Hard disk drive servo systems* 2nd edition. Springer, Berlin, 2006.
- [Chiculita 08] C. Chiculita. *Tiny PIC bootloader* : <http://www.etc.ugal.ro/cchiculita>, October 2008.
- [Clifford 00] R. W. Clifford, P. C. Know & G. N. Dutton. *Does extraocular muscle proprioception influence oculomotor control?* Br. J. Ophthalmol, vol. 84, pages 1071–1074, 2000.
- [Collett 75] T. S. Collett & M. F. Land. *Visual control of flight behaviour in the hoverfly *Syrirta pipiens* L.* Journal of Comparative Physiology A : Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology, vol. 99, no. 1, pages 1–66, March 1975.
- [Conroy 09] J. Conroy, G. Gremillion, B. Ranganathan & J. Humbert. *Implementation of wide-field integration of optic flow for autonomous quadrotor navigation.* Autonomous Robots, vol. 27, no. 3, pages 189–198, October 2009.
- [Dancause 07] N. Dancause, M. D Taylor, E. J. Plautz, J. D Radel, T. Whittaker, R. J. Nudo & A. G. Feldman. *A stretch reflex in extraocular muscles of species purportedly lacking muscle spindles.* Exp Brain Res, vol. 180, pages 15–21, 2007.
- [Ferrier 93] N. J. Ferrier & J. C. Clark. *The Harvard binocular head.* International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, vol. 7, no. 1, pages 9–31, 1993.
- [Franceschini 71] N. Franceschini & K. Kirschfeld. *Etude optique in vivo des éléments photorécepteurs dans l’œil composé de *Drosophila*.* Biological Cybernetics, vol. 8, pages 1–13, 1971.
- [Franceschini 75] N. Franceschini. *Sampling of the visual environment by the compound eye of the fly : Fundamentals and applications*, chapitre A.5, pages 98–125. A. W. Snyder and R. Menzel, eds, 1975.
- [Franceschini 86] N. Franceschini, C. Blanes & L. Oufar. *Appareil de mesure, passif et sans contact, de la vitesse d’un objet quelconque.* Rapport technique 51549, ANVAR/DVAR, Paris, France, 1986.

- [Franceschini 91] N. Franceschini, R. Chagneux, K. Kirschfeld & A. Mücke. *Vergence and eye movements in flies*. In H. Penzlin (eds) N. Elsner, editeur, 19th Göttingen Neurobiology Conference, page 275, Stuttgart, G. Thieme, 1991.
- [Franceschini 92] N. Franceschini, J. M. Pichon & C. Blanes. *From insect vision to robot vision*. Phil Trans Roy Soc Lond B, vol. 337, pages 283–294, 1992.
- [Franceschini 97] N. Franceschini & R. Chagneux. *Repetitive scanning in the fly compound eye*. In Göttingen Neurobiology Report, volume 2. Thieme, 1997.
- [Franceschini 99] N. Franceschini. Cerveaux et machines, chapitre Reconstruire pour mieux comprendre : de la mouche au robot, pages 247–268. Hermès, 1999.
- [Franceschini 04a] N. Franceschini. *Visual guidance based on optic flow : a biorobotic approach*. J Physiol Paris, vol. 98, no. 1-3, pages 281–292, 2004.
- [Franceschini 04b] N. Franceschini, S. Viollet & M. Boyron. *Procédé et dispositif de détection en hyperacuité d'un bord contrasté sensiblement rectiligne et système de fixation et de poursuite fine de ce bord contrasté*, 2004.
- [Franklin 98] G.F. Franklin, J.D. Powell & M. Workman. Digital control of dynamic systems - 3rd ed. Addison Wesley, 1998.
- [Gauthier 84] G. B. Gauthier, J. P. Piron, J. P. Roll, E. Marchetti & B. Martin. *High-frequency vestibulo-ocular reflex activation through forced head rotation in man*. Aviat Space Environ Med, vol. 55, no. 1, pages 1–7, Jan 1984.
- [Grossman 88] G. E. Grossman, R. J. Leigh, L. A. Abel, D. J. Lanska & S. E. Thurston. *Frequency and velocity of rotational head perturbations during locomotion*. Exp Brain Res, vol. 70, no. 3, pages 470–476, 1988.
- [Hafed 09] Z. M. Hafed, L. Goffart & R. J. Krauzlis. *A neural mechanism for microsaccade generation in the primate superior colliculus*. Science, vol. 323, no. 5916, pages 940–943, Feb 2009.
- [Hassenstein 56] B. Hassenstein & W. Reichardt. *Systemtheoretische Analyse der Zeit-, Reihenfolgen- und Vorzeichenbewertung bei der Bewegungspertzeption des Rüsselkäfers Chlorophanus*. Zeitschrift für Naturforschung B, vol. 11(9), pages 513–524, 1956.

- [Hateren 99] J. H. Van Hateren & C. Schilstra. *Blowfly flight and optic flow. II. Head movements during flight*. J. Exp Biol, vol. 202, pages 1491–1500, 1999.
- [Heisenberg 71] M. Heisenberg. *Separation of receptor and lamina potentials in the electroretinogram of normal and mutant Drosophila*. J Exp Biol, vol. 55, no. 1, pages 85–100, Aug 1971.
- [Hengstenberg 88] R. Hengstenberg. *Mechanosensory control of compensatory head roll during flight in the blowfly Calliphora erythrocephala Meig.* J. Comp Physiol A, vol. 163, pages 151–165, 1988.
- [Hengstenberg 92] R. Hengstenberg. *Control of head pitch in Drosophila during rest and flight*. In Proc. of 20th Göttingen Neurobiology Conference G. Thieme Verlag, Stuttgart, page 305. Elsner N., Richter D. (eds), 1992.
- [Horridge 77] G. A. Horridge. *The compound eye of insects*. Scientific American, vol. 237, pages 108–120, 1977.
- [Hoshino 98] K. Hoshino, F. Mura, H. Morii, K. Suematsu & I. Shimoyama. *A small-sized panoramic scanning visual sensor inspired by the fly's compound eye*. In Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, volume 2, pages 1641–1646, 16–20 May 1998.
- [Hoshino 01] K. Hoshino, F. Mura & I. Shimoyama. *A one-chip scanning retina with an integrated micromechanical scanning actuator*. IEEE J. MEMS, vol. 10, no. 4, pages 492–497, Dec. 2001.
- [Huterer 02] M. Huterer & K. E. Cullen. *Vestibuloocular reflex dynamics during high-frequency and high acceleration rotations of the head on body in rhesus monkey*. J Neurophysiol, vol. 88, pages 13–28, 2002.
- [Juusola 97] M. Juusola & A. S. French. *Visual acuity for moving objects in first- and second-order neurons of the fly compound eye*. J Neurophysiol, vol. 77, no. 3, pages 1487–1495, Mar 1997.
- [Keller 78] E. L. Keller. *Gain of the vestibulo-ocular reflex in monkey at high rotational frequencies*. Vis. Res., vol. 18, pages 311–115, 1978.
- [Kerhuel 07] L. Kerhuel, S. Viollet & N. Franceschini. *A Sighted aerial robot with fast gaze and heading stabilization*. In Proc. of IEEE Conf on Intelligent Robots and Systems (IROS), pages 2634–2641, San Diego, CA, USA, October 2007.

- [Kerhuel 08] L. Kerhuel. *dsPIC blockset for Simulink* : <http://www.kerhuel.eu>, October 2008.
- [Kerhuel 09] L. Kerhuel, S., Viollet & N. Franceschini. *Method and device for measuring the angular position of a rectilinear contrasting edge of an object, and system for fixing and tracking a target comprising at least one such contrasting edge*. patent pending, 2009.
- [Kerhuel 10] L. Kerhuel, S. Viollet & N. Franceschini. *Steering by Gazing : An Efficient Biomimetic Control Strategy for Visually-guided Micro-Air Vehicles*. IEEE Transactions on Robotics, vol. in press, 2010.
- [Kern 98] R. Kern & D. Varjù. *Visual position stabilization in the hummingbird hawk moth, *Macroglossum stellatarum* L.* J Comp Physiol A 182, pages 225–237, 1998.
- [Kirschfeld 69] K. Kirschfeld & N. Franceschini. *Ein Mechanismus zur Steuerung des Lichtflusses in den Rhabdomeren des Komplexauges von *Musca**. Kybernetik, vol. 6, pages 13–22, 1969.
- [Land 69] M. F. Land. *Movements of the retinae of jumping spiders (*Salticidae : dendryphantinae*) in response to visual stimuli*. J Exp Biol, vol. 51, no. 2, pages 471–493, Nov 1969.
- [Land 74] M. F. Land & T. S. Collett. *Chasing behaviour of Houseflies (*Fannia canicularis*)*. Journal of Comparative Physiology A : Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology, vol. 89, no. 4, pages 331–357, December 1974.
- [Land 97] M. Land & T. Collett. *From living eyes to seeing machines, chapitre A Survey of Active Vision in Invertebrates*, pages 16–36. Oxford University Press, 1997.
- [Landolt 01] O. Landolt & A. Mitros. *Visual Sensor with Resolution Enhancement by Mechanical Vibrations*. Autonomous Robots, vol. 11, no. 3, pages 233–239, November 2001.
- [Lenz 08] A. Lenz, T. Balakrishnan, A. G. Pipe & C. Melhuish. *An adaptative gaze stabilization controller inspired by the vestibulo-ocular reflex*. IOP Bioinspiration & Biomimetics, vol. 3, page 035001, 2008.
- [Lewis 97] A. Lewis. *Visual navigation in a robot using Zig-Zag behavior*. In Proceedings of Neural Informations Processing Systems (NIPS), pages 822–828, 1997.

- [Linfoot 64] E. H. Linfoot. *Fourier Methods in Optical Image Evaluation*. 1964.
- [Liske 77] E. Liske. *The influence of head position on the flight behaviour of the fly, Calliphora Erythrocephala*. *J. Insect Physiol*, vol. 23, pages 375–179, 1977.
- [Lurie 00] B. Lurie & P. Enright. *Classical feedback control with matlab*. Control Engineering. Marcel Dekker, 2000.
- [Maini 08] E. Maini, L. Manfredi, C. Laschi & P. Dario. *Bioinspired velocity control of fast gaze shifts on a robotic anthropomorphic head*. *Autonomous Robots*, vol. 25, no. 1, pages 37–58, August 2008.
- [Meyer 05] J.-A. Meyer, A. Guillot, B. Girard, M. Khamassi, P. Pirim & A. Berthoz. *The Psikharpax project : towards building an artificial rat*. *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 50, no. 4, pages 211–223, March 2005.
- [Miyachi 08] R. Miyauchi, N. Shiroma & F. Matsuno. *Compact image stabilization system using camera posture information*. *J. Field Robot.*, vol. 25, no. 4-5, pages 268–283, 2008.
- [Moeckel 09] R. Moeckel & S.-C. Liu. *Flying Insects and Robots, chapitre Motion Detection Chips for Robotic Platforms*. Springer, Berlin, 2009.
- [Mücke 91] A. Mücke & N. Franceschini. *Procion staining : novel applications*. In H.Penzlin (eds) N. Elsner, editeur, 19th Göttingen Neurobiology Conference, page 276, Stuttgart, G. Thieme, 1991.
- [Mura 96] F. Mura & N. Franceschini. *Obstacle avoidance in a terrestrial mobile robot provided with a scanning retina*. In Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pages 47–52, 19–20 Sept. 1996.
- [Netter 02] T. Netter & N. Franceschini. *A robotic aircraft that follows terrain using a neuromorphic eye*. In Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System, volume 1, pages 129–134, 30 Sept.–5 Oct. 2002.
- [Nyquist 28] H. Nyquist. *Certain topics in telegraph transmission theory*. *Transaction of the A. I. E. E.*, no. 2, pages 617–644, Feb. 1928.
- [Olberg 00] R. M. Olberg, A. H. Worthington & K.R.Venator. *Prey pursuit and interception in dragonfly*. *J Comp Physiol A186*, pages 155–162, 2000.

- [Panerai 02] F. Panerai, G. Metta & G. Sandini. *Learning visual stabilization reflexes in robots with moving eyes*. Neurocomputing, vol. 48, pages 323–337, 2002.
- [Paulk 06] A. Paulk & C. Gilbert. *Proprioceptive encoding of head position in the black soldier fly, *Hermetia illucens* (L.) (Stratiomyidae)*. The Journal of Experimental Biology, vol. 209, pages 3913–3924, 2006.
- [Preuss 92] T. Preuss & R. Hengstenberg. *Structure and kinematics of the prosternal organs and their influence on head position in the blowfly *Calliphora erythrocephala* Meig.* J Comp Physiol A 171, pages 483–493, 1992.
- [Pudas 07] M. Pudas, S. Viollet, F. Ruffier, A. Kruusing, S. Amic, S. Leppavuori & N. Franceschini. *A miniature bio-inspired optic flow sensor based on low temperature co-fired ceramics (LTCC) technology*. Sensors and Actuators A : Physical, vol. 133, no. 1, pages 88–95, January 2007.
- [Riley 08] D. T. Riley, W. M. Harmann, S. F. Barrett & C. H. G. Wright. *Musca domestica inspired machine vision sensor with hyperacuity*. Bioinspiration & Biomimetics, vol. 3, no. 2, page 026003 (13pp), 2008.
- [Robinson 64] D. A. Robinson. *The mechanics of human saccadic eye movement*. Journal of Physiology, vol. 174, pages 245–264, 1964.
- [Ruffier 03] F. Ruffier, S. Viollet, S. Amic & N. Franceschini. *Bio-inspired optical flow circuits for the visual guidance of micro air vehicles*. In Circuits and Systems, 2003. ISCAS '03. Proceedings of the 2003 International Symposium on, volume 3, pages III–846–III–849vol.3, 25-28 May 2003.
- [Ruffier 04] F. Ruffier. *Pilote automatique biomimétique - Système générique inspiré du contrôle visumoteur des insectes pour : le décollage, le suivi de terrain, la réaction au vent et l'atterrissage automatiques d'un micro-aéronef*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, Laboratoire de Neurobiologie, September 2004.
- [Ruffier 05] F. Ruffier & N. Franceschini. *Optic flow regulation : the key to aircraft automatic guidance*. Robotics and Autonomous Systems, vol. 50, no. 4, pages 177 – 194, 2005. Biomimetic Robotics.
- [Sandeman 80] D. Sandeman & H. Markl. *Head Movements in Flies (*Calliphora*) Produced by Deflexion of the Halteres*. J Exp Biol, vol. 85, no. 1, pages 43–60, April 1980.

- [Satoh 08] A. K. Satoh, B. X. Li, H. Xia & D. F. Ready. *Calcium-activated Myosin V closes the Drosophila pupil*. *Curr Biol*, vol. 18, no. 13, pages 951–955, Jul 2008.
- [Serres 08] Julien Serres. *De l'abeille au robot : "la régulation du flux optique"*. PhD thesis, Université de Montpellier II, January 2008.
- [Shannon 49] C. E. Shannon. *Communication in the Presence of Noise*. Proceedings of the IRE, vol. 37, no. 1, pages 10–21, Jan. 1949.
- [Shaw 81] S. R. Shaw. *Neurons without impulses : : their significance for vertebrate and invertebrate nervous systems*, chapitre Anatomy and physiology of identified non-spiking cells in the photoreceptor-lamina complex of the compound eye of insects, especially Diptera, pages 61–116. Cambridge University Press, 1981.
- [Shibata 01] T. Shibata & S. Schaal. *Biomimetic gaze stabilization based on feedback-error learning with nonparametric regression networks*. *Neural Networks*, vol. 14, pages 201–216, 2001.
- [Snyder 79] A. W. Snyder. *Handbook of sensory physiology*, volume VII/6A, chapitre Physics of Vision in Compound Eyes, pages 225–313. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1979.
- [Steinman 67] R. M. Steinman. *Voluntary Control of Microsaccades during Maintained Monocular Fixation*. *Science*, vol. 155, pages 1577–1579, 1967.
- [Strausfeld 87] N. J. Strausfeld, H. S. Seyan & J. J. Milde. *The Neck Motor System of the Fly Calliphora erythrocephala. 1. Muscles and Motor Neurons*. *J. Comp. Physiol*, vol. A 160, pages 205–224, 1987.
- [Takizawa 05] S. Takizawa, S. Ushida, T. Okatani & K. Deguchi. *2DOF motion stabilization of biped robot by gaze control strategy*. In *Intelligent Robots and Systems, 2005. (IROS 2005)*. 2005 IEEE/RSJ International Conference on, pages 1102–1107, 2-6 Aug. 2005.
- [Twombly 06] X. Twombly, R. Boyle & S. Colombano. *Active stabilization of images acquired on a walking robotic platform*, pages 851–860. G.Bebis et al. (Eds.), *ISVC 2006, LNCS 4292*, 2006.
- [Ullman 81] S. Ullman. *Analysis of visual motion by biological and computer systems*. *Computer*, vol. 14, pages 57–69, 1981.
- [Ushida 06] S. Ushida, K. Yoshimi, T. Okatani & K. Deguchi. *The Importance of Gaze Control Mechanism on Vision-based Motion Control of a Biped*

- Robot*. In Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference on, pages 4447–4452, Oct. 2006.
- [Viola 89] P. Viola. *Neurally inspired plasticity in oculomotor processes*. In Proceedings of Neural Information Processing Systems (NIPS), pages 290–297, 1989.
- [Viollet 99a] S. Viollet & N. Franceschini. *Biologically-inspired visual scanning sensor for stabilization and tracking*. In Intelligent Robots and Systems, 1999. IROS '99. Proceedings. 1999 IEEE/RSJ International Conference on, volume 1, pages 204–209vol.1, 17-21 Oct. 1999.
- [Viollet 99b] S Viollet & N. Franceschini. *Visual servo system based on a biologically inspired scanning sensor*. In Sensor Fusion and Decentralized control in Robotics II, volume 3839, pages 144–155. SPIE, 1999.
- [Viollet 99c] S. Viollet & N. Franceschini. *Visual servo system based on a biologically-inspired scanning sensor*. In Sensor fusion and decentralized control in robotics II, SPIE, volume 3839, pages 144–155, Boston, 1999.
- [Viollet 01] S. Viollet. *Capteur visuel neuromimétique et applications à la stabilisation, la fixation visuelle et la poursuite fine d'objets par un micro-aéronef*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, Laboratoire de Neurobiologie, September 2001.
- [Viollet 04] S. Viollet & N. Franceschini. *A miniature biomimetic gaze control system*. In IEEE, editeur, Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004 IEEE International Conference on, pages 504–510, 2004.
- [Viollet 05] S. Viollet & N. Franceschini. *A high speed gaze control system based on the Vestibulo-Ocular Reflex*. Robotics and Autonomous systems, vol. 50, pages 147–161, 2005.
- [Viollet 06] S. Viollet, J. Michelis & N. Franceschini. *Towards a bio-inspired, low-cost and non-emissive powerlines detector*. In Proceedings of the 32nd European Rotorcraft Forum ERF'32, 2006.
- [Viollet 08] S. Viollet, L. Kerhuel & N. Franceschini. *A 1-gram dual sensorless speed governor for micro-air vehicles*. In Proc. IEEE MED'08, pages 1270–1275, Ajaccio, France, 2008.

- [Viollet 09] S. Viollet & N. Franceschini. *A hyperacute optical position sensor based on biomimetic retinal microscanning*. Sensors and Actuators A, vol. in prep, 2009.
- [Wagner 92] R. Wagner, I. W. Hunter & H. L. Galiana. *A Fast Robotic Eye/head System : Eye Design and Performance*. In Proc. of IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, volume 14, pages 1584–1585, 1992.
- [Westheimer 81] G. Westheimer. *Visual hyperacuity*. Ottoson, Sensory Physiology 1, Springer, Berlin, 1981.
- [Yamaguchi 94] T. Yamaguchi & H. Yamasaki. *Velocity Based Vestibular-Visual Integration in Active Sensing System*. In Proc. IEEE Intern. Conf. on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, pages 639–646, Las Vegas, USA, 1994.
- [Zeil 08] J. Zeil, N. Boeddeker & J. M. Hemmi. *Vision and the organization of behaviour*. Current Biology, vol. 18, pages 320–323, 2008.
- [Zufferey 06] J.-C. Zufferey & D. Floreano. *Fly-inspired Visual Steering of an Ultra-light Indoor Aircraft*. IEEE Transactions on Robotics, vol. 22, no. 1, pages 137–146, 2006.
- [Zufferey 08] J.-C. Zufferey. *Bio-inspired Flying Robots : Experimental Synthesis of Autonomous Indoor Flyers*. EPFL/CRC Press, Lausanne, 2008.

Liste des publications relatives au projet de thèse

- **L. Kerhuel**, S. Viollet and N. Franceschini (2010), “*Steering by Gazing : An Efficient Biomimetic Control Strategy for Visually-guided Micro-Air Vehicles*”. IEEE Transactions on Robotics, in press.
- **L. Kerhuel**, N. Franceschini, S. Viollet, (2009), “*Method and device for measuring the angular position of a rectilinear contrasting edge of an object, and system for fixing and tracking a target comprising at least one such contrasting edge*”, demande de brevet en cours.
- **L. Kerhuel**, S. Viollet, F. Ruffier, (2009), “*Method and device for measuring the angular velocity of a light transition zone and steering aid system for fixing and tracking a target comprising at least one such light transition zone*”, demande de brevet en cours.
- J. Serres, S. Viollet, **L. Kerhuel** and N. Franceschini (2009), “*Régulation de vitesse d’un micromoteur à courant continu sans capteur au moyen d’un microcontrôleur dsPIC programmé par une passerelle Matlab/Simulink*”. La Revue 3 E.I, n°56 pp. 66-74.
- S. Viollet, **L. Kerhuel** et N. Franceschini (2009), “*A vision-based steering control system for aerial vehicles*”, dans Aerial Vehicles, <http://intechweb.org>, ISBN 978-953-7619-41-1
- S. Viollet, **L. Kerhuel** and N. Franceschini (2008) , “*A 1-gram dual sensorless speed governor for micro-air vehicles*”, In Proc. of the IEEE Mediterranean Conf. on Control and Automation MED’08, Ajaccio, France, pp. 1270-1275.
- **L. Kerhuel**, S. Viollet and N. Franceschini (2008) “*Insect-based gaze control system and heading stabilization*”, In Proc. of the International Conference of Invertebrate Vision Bäckeskog, Suède.
- **L. Kerhuel**, S. Viollet and N. Franceschini (2007) , “*A sighted aerial robot with fast gaze and heading stabilization*”, In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems IROS’07, San Diego, USA, pp. 2634-2641.
- **L. Kerhuel**, S. Viollet and N. Franceschini (2007), “*A sighted aircraft with ultrafast gaze stabilization*”, In Proc. of the Flying Insects and Robots Conference, Ascona, Switzerland, pp 59-60, <http://fir.epfl.ch>
- **L. Kerhuel**, S. Viollet and N. Franceschini (2006) “*Insect Based Visual Processing for Micro-Flying Robots*”, in Proc. of the Sensory Ecology, Lund, Suède.

Capteurs optiques minimalistes & réflexes oculomoteurs biomimétiques.
Application à la robotique aérienne

RESUME : La navigation visuelle des robots mobiles s'appuie traditionnellement sur des imageurs de type « caméra », dotés de plusieurs centaines de milliers de pixels lus séquentiellement. Le traitement de tels flux d'images nécessite une puissance de calcul qu'il serait difficile d'embarquer à bord d'un micro-aéronef de quelques grammes ou dizaines de grammes. Il existe pourtant déjà quelques agents aériens dont les performances de navigation en milieu inconnu sont remarquables, et qui pourtant fonctionnent de toute autre façon. Les oiseaux et les insectes, en particulier, montrent une capacité inégalée à éviter les obstacles et à poursuivre leurs proies ou leurs congénères. Cette capacité étonnante découle de leur perception particulière de l'environnement. Si les insectes, aux faibles capacités cognitives, perçoivent leur environnement de manière si efficace, c'est grâce aux capteurs minimalistes qu'ils embarquent. Certains insectes comme la mouche améliorent encore leur perception de l'environnement en stabilisant leur système visuel avec à un découplage tête-corps associé à un réflexe inertiel, équivalent au réflexe vestibulo-oculaire des mammifères. Cette stabilisation de la « plate-forme visuelle » permet de simplifier les traitements visuels subséquents et de mettre en œuvre des stratégies efficaces de navigation.

Toute la première partie (« capteurs visuels ») de ce travail prend appui délibérément sur un œil élémentaire composé de seulement deux photorécepteurs (deux pixels). Nous avons d'abord amélioré les performances d'un capteur de *vitesse angulaire* bio-inspiré et revu le principe du capteur OSCAR, tous deux construits précédemment au laboratoire. Puis, nous avons développé et construit un nouveau type de capteur visuel, appelé VODKA, qui localise de manière ultrafine la *position angulaire* d'une cible visuelle.

Dans la seconde partie (« réflexes visuo-inertiels »), nous avons développé un robot aérien miniature, appelé OSCAR II. Equipé de nos capteurs visuels et d'un réflexe « vestibulo-oculaire », OSCAR II, qui ne pèse que 100 grammes, est capable non seulement de fixer du regard une cible visuelle stationnaire, mais aussi de la poursuivre en lacet si elle vient à se déplacer, et ce même lors de fortes perturbations aérodynamiques. Avec sa capacité additionnelle de faire des saccades oculaires, OSCAR II préfigure les micro-véhicules aériens de demain, qui se dirigeront là où portera leur regard.

MOT-CLES : Capteur optique, localisation, insecte, flux optique, vision, micro-aéronef, automatique, stabilisation, réflexe vestibulo-oculaire, fixation visuelle, poursuite fine, biorobotique, biomimétisme.

Minimalist optical sensors & biomimetic oculomotor reflexes.
Application to aerial robots

ABSTRACT: Visual navigation in autonomous robots is usually based on video-cameras using several hundred thousands of pixels with sequential reading. Real time processing of such incoming data flows require major computing resources that would be hard to embed on a micro aerial vehicle of several grams or tens of grams. There already exist, however, lots of flying agents whose navigation performance in unknown environments is remarkable, even though they operate on a quite different basis. Birds and insects, in particular, show a unique ability to avoid obstacles and pursue preys or conspecifics. This amazing ability is due to their unique perception of the environment. Insects with their low cognitive abilities perceive their environment quite efficiently thanks to minimalist sensors. Some insects, like flies, improve their perception of the environment by stabilizing their visual system through de-coupling their head from the body and using an inertial reflex, similar to the mammalian "vestibulo-ocular reflex". Stabilization of the "visual platform" is beneficial in that it simplifies the subsequent visual processing and enables efficient navigational strategies to be implemented.

The first part of this work, dedicated to "visual sensors", focuses on an elementary eye composed of only two photoreceptors (two pixels). We first improved the performance of a bio-inspired *angular speed* sensor, and revisited the working principle of the OSCAR sensor, both previously built at our laboratory. We then developed and constructed a new visual sensor, called VODKA, which allows the angular position of a contrasting edge or bar to be localized with utmost accuracy.

In the second part, dedicated to visuo-inertial reflexes, we developed a micro aerial robot, called OSCAR II. Equipped with our visual sensors and an inertial sensor, OSCAR II, which weighs only 100 grams, is able to maintain its gaze locked onto a stationary target, and to pursue a moving target in yaw, even in the presence of strong aerial disturbances. With its added ability to perform eye saccades, OSCAR II bodes well for tomorrow's micro-aerial vehicles, whose heading will follow the gaze.

KEYWORDS: optic flow, vision, micro aerial vehicle, control, vestibulo ocular reflex

DISCIPLINE : Systèmes Automatiques et Microélectroniques

LABORATOIRE :

Institut des Sciences du Mouvement Etienne-Jules Marey
CNRS/Université de la Méditerranée (UMR 6233) Equipe Biorobotique (CP938)
163, Avenue de Luminy
13288 MARSEILLE cedex 09, FRANCE
